РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ ГЕОСФЕР РАН

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСФЕРАХ

Сборник научных трудов ИДГ РАН

ВЫПУСК 5

Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида

Под редакцией
д.ф.-м.н. Ю.И. Зецера

Москва
ГЕОС
2014

УДК 523.68

Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. – М.: ГЕОС, 2014. – 160 с.

ISSN 2222-8535

Специальный выпуск **«Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида»** посвящен уникальному геофизическому явлению – внедрению в пространство Земли относительно большого по размерам космического тела, получившего название – Челябинский метеороид. Первоначальное изучение проблем движения метеороида в ионосфере и атмосфере, эффектов, связанных с энерговыделением в этих геосферах, а также ударов осколков метеороида по поверхности Земли – были темами научных статей сотрудников Института, опубликованных в первой главе предыдущего сборника «Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4». Следующий этап исследований связан с определением физических и геофизических механизмов, ответственных за наблюдавшиеся и зарегистрированные эффекты. Результаты этих исследований, полученные сотрудниками ИДГ РАН и других институтов, и составляют основу настоящего сборника.

Рецензенты:
д.ф.-м.н. *А.В. Витязев*, д.ф.-м.н. *Г.Г. Кочарян*

Ответственный за выпуск:
д.ф.-м.н. *В.В. Шувалов*

©ИДГ РАН, 2014
©ГЕОС, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 4

Падение Челябинского метеорита – типичное событие в истории Земли (*В.В. Светцов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова, В.В. Шувалов*) 7

Орбита и происхождение Челябинского объекта (*С.А. Нароенков*, *В.В. Емельяненко, О.П. Попова*) 20

Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида (*И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев, О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов, Ю.В. Поклад, Д.В. Егоров*) 26

Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела (*В.В. Шувалов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова*) 48

Фрагментация Челябинского метеороида (*О.П. Попова, П. Дженнискенс, Д.О. Глазачев*) 59

Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления (*Ю.С. Рыбнов, О.П. Попова, В.А. Харламов*) 78

Ионосферный эффект Челябинского события (*М.Ю. Кузьмичева, Т.В. Лосева, А.Н. Ляхов*). 86

Оценка сейсмического эффекта, вызванного падением Челябинского космического тела (*В.В. Светцов, В.В. Шувалов*) 95

Сейсмические колебания, вызванные ударной волной от Челябинского болида в ближней зоне (*О.А. Усольцева, Р.А. Дягилев, С.Н. Мулев*) 104

Оценка пространственных координат источника излучения звукового сигнала при взрыве Челябинского метеорита по данным регистрации акустических сигналов (*В.А. Харламов, О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов, Е.Д. Подобная, П. Дженнискенс*) 116

Проникновение фрагмента Челябинского метеорита через лед озера Чебаркуль: предварительное моделирование (*Б.И. Иванов*) 124

Атмосферный шлейф Челябинского метеороида (*Н.А. Артемьева, В.В. Шувалов*) 134

Челябинское событие: опрос очевидцев (*А.П. Карташова, О.П. Попова, П. Дженнискенс, С. Короткий, Е. Бирюков, И. Сердюк, В.В. Емельяненко, Д.О. Глазачев, С.А. Хайбрахманов, А.Е. Дудоров, А.Я. Скрипник, Ю.С. Рыбнов*) 146

Abstract 156

ПРЕДИСЛОВИЕ

Утром 15 февраля 2013 года, примерно в 9 часов 20 минут местного времени, в районе г. Челябинска в атмосферу Земли под углом ≈20 градусов к горизонту вошло космическое тело размером около 20 метров. Это событие стало явлением, привлекшим всеобщее внимание. Интерес к нему был вызван совокупностью, как минимум, нескольких факторов:

– достаточная исключительность события в пределах жизни одного поколения: для внеземных тел размером Челябинского метеороида частота столкновений с Землей оценивается как один раз в 60–100 лет;

– внезапность появления: сближение с Землей этого тела достаточно внушительных размеров, прошло незамеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения;

– падение метеороида произошло в населенной местности возле крупного города, что, с одной стороны, обеспечило большое число очевидцев этого события, с другой – привело к значительным разрушениям на большой площади и продемонстрировало реальность для населения так называемой «астероидно-кометной опасности»;

– процесс падения Челябинского метеороида вызвал широкий спектр физических и геофизических явлений, затронувших верхние и нижние геосферы;

– наличие в настоящее время наблюдательных средств широкого спектра и достаточно развитой сети наблюдений, существующая возможность оперативного обмена данными между исследователями с помощью Интернета, а также возросшие интерес, опыт и квалификация ученых и инженеров, работающих в научных направлениях, связанных с проблемами внедрения космических тел.

В результате первого этапа исследований, последовавшего непосредственно после падения метеороида, появилось много отечественных и зарубежных работ, посвященных динамике движения метеороида в ионосфере и атмосфере, регистрации эффектов, связанных с энерговыделением в этих геосферах, ударами осколков метеороида по поверхности Земли, вариациями геоэлектрического и геомагнитного полей. Этому этапу исследований посвящена отдельная глава нашего предыдущего сборника «Динамические процессы в геосферах. Выпуск 4», опубликованного в 2013 году.

Следующий этап исследований связан с изучением физических и геофизических механизмов, ответственных за наблюденные и зарегистрированные эффекты. Работы сотрудников нашего Института (некоторые выполнены совместно с сотрудниками других институтов) по данному этапу исследований составляют основу настоящего сборника. Челябинское явление не получило еще общепринятого названия. Поэтому мы посчитали возможным оставить в статьях сборника те названия этого явления, которые дали ему авторы.

Сборник открывает статья В.В. Светцова с соавторами «Падение Челябинского метеорита – типичное событие в истории Земли». Это обзорная статья, раскрывающая читателю перечень проблем, с которыми сталкиваются научные работники, специализирующиеся в области исследования явлений взаимодействия со средой внедряющихся космических тел. В работе рассмотрены основные физические явления, происходящие при взаимодействии метеороидов размером в первые десятки метров с атмосферой – торможение, абляция, фрагментация, распространение ударной волны. Описаны современные методы регистрации и моделирования болидных явлений.

Далее статьи сборника расположены в хронологическом порядке перемещения метеороида в пространстве Земли. Статья С.А. Нароенкова с соавторами «Орбита и происхождение Челябинского объекта» посвящена определению орбиты метеороида и исследованию его движения до внедрения в атмосферу Земли. В статье И.Х. Ковалевой с соавторами «Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида» предложен новый механизм генерации электромагнитного сигнала в диапазоне частот от единиц герц до единиц килогерц при таких падениях. Проведены оценки возмущений параметров ионосферной плазмы и характеристики электромагнитных сигналов, которые могут быть зарегистрированы на поверхности Земли.

Как известно, движение внедряющегося тела в атмосферу Земли сопровождается ударной волной. В статье В.В. Шувалова с соавторами «Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела» путем численного моделирования рассматривается генерация и распространение ударной волны в атмосфере Земли в процессе падения метеороида. Показано, что за формирование ударной волны «отвечает» выделение энергии на протяженном участке траектории, и ниже 20 километров выделилась лишь незначительная часть начальной энергии. В статье определяется максимальное избыточное давление в разных точках земной поверхности и оценивается размер зоны повреждений. Определяются времена прихода и форма импульса давления воздушной волны.

Характер движения метеороида и его энерговыделения связаны с его фрагментацией. В статье О.П. Поповой с соавторами «Фрагментация Челябинского метеороида» предлагается модель фрагментации метеороида в атмосфере, на базе которой возможно воспроизведение наблюдательных данных по световой кривой и кривой торможения, а также оценка поля рассеяния выпавших фрагментов и их полная масса.

Образовавшаяся в процессе движения и последующего «взрывного» энерговыделения ударная волна преобразуется в акустическую, которая на значительных расстояниях регистрируется как инфразвуковая волна. В статье Ю.С. Рыбнова с соавторами «Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления» предлагается новая методика оценки энергии болида. Полученная по разработанной методике оценка энергии Челябинского болида составляет ≈1000 кТ, что превышает принятую на сегодняшний день оценку (500±100 кТ) и поэтому требует дальнейшего обоснования.

Возмущения в атмосфере, вызванные пролетом метеороида, вызывают возмущения и в ионосфере. Статья М.Ю. Кузьмичевой с соавторами «Ионосферный эффект Челябинского события» посвящена обоснованию одного из механизмов образования возмущений, наблюдавшихся в ионосфере на больших расстояниях от траектории метеороида. Представлены результаты трехмерных газодинамических расчетов, позволяющие объяснить указанный механизм.

Ударная волна, дошедшая до поверхности Земли, вызывает инициированные ею сейсмические колебания, зарегистрированные на значительных расстояниях от источника. В статье В.В. Светцова, В.В. Шувалова «Оценка сейсмического эффекта, вызванного падением Челябинского космического тела» приведены теоретические оценки магнитуды в источнике этих колебаний. Показано, что эта магнитуда соответствует магнитуде от сферически-симметричного взрыва с энергией равной кинетической энергии метеороида на высоте около 35 км.

В статье О.А. Усольцевой с соавторами «Сейсмические колебания, вызванные ударной волной от Челябинского болида в ближней зоне» рассматриваются сейсмические эффекты, зарегистрированные в районе поселка Коркино, находящемся в 10 км от области максимального разрушения. Определены параметры сейсмиче-

ского сигнала и вычислены координаты акустического источника, вызвавшего эти колебания. Обнаружено, что амплитуда колебаний акустического сигнала в ближней зоне существенно превышает амплитуды колебаний такого сигнала, зарегистрированные на больших расстояниях. В статье В.А. Харламова с соавторами «Оценка пространственных координат источника излучения звукового сигнала при взрыве Челябинского метеорита по данным регистрации акустических сигналов» приведена методика расчета пространственных координат и результаты вычислений пеленгов и координат места излучения звукового сигнала.

Как известно, Челябинский метеороид после входа в атмосферу разрушился. Основная масса мелких осколков выпала на поверхность с малой скоростью. Однако, по крайней мере, один крупный фрагмент (≈600 кг) упал на дно озера Чебаркуль с образованием округлой полыньи. В статье Б.А. Иванова «Проникновение фрагмента Челябинского метеорита через лед озера Чебаркуль: предварительное моделирование» проведен анализ процесса образования этой полыньи с учетом минимальной (обнаруженной) массы фрагмента и его скорости.

Одним из наиболее продолжительных последствий пролета Челябинского метеороида был шлейф, оставленный им в атмосфере. Этот красивый след подобен гигантскому инверсионному следу самолета и был хорошо виден над Уралом в течение получаса. В статье Н.А. Артемьевой, В.В. Шувалова «Атмосферный шлейф Челябинского метеороида» описывается численное моделирование шлейфа в течение первых 3 минут после пролета метеороида. Анализируется также возможность образования баллистического плюма, возникающего при небольших ударах, как явления важного с точки зрения возможного выноса вещества и образования акустико-гравитационных волн, переносящих атмосферные возмущения вплоть до ионосферы.

В статьей А.П. Карташевой и др. «Челябинское событие: опрос очевидцев» приведены данные, полученные по результатам посещения в процессе проведения специальной экспедиции более 50 населенных пунктов в Челябинской и прилежащих к ней областях. Эти посещения позволили выявить на основании разработанной методики опроса некоторую дополнительную информацию, связанную с Челябинским событием. Это, например, ощущения тепла, степень и характер полученных травм (поражения глаз и ушей, головные боли), информация о запахах и акустических (шумовых) эффектах. С помощью полученных данных может быть уточнен прогноз поражающих факторов внедрения космических тел, что представляет несомненный практический интерес для медицинских служб и служб МЧС.

Основные результаты исследований, проведенных на данном этапе и посвященных, в основном, изучению механизмов явлений, сопровождающих внедрение космических тел в пространство Земли, необходимы как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения. Поэтому мы надеемся, что публикация данного сборника будет полезна широкому кругу специалистов.

В публикуемых материалах не затронуты чрезвычайно важные проблемы, касающиеся структурного анализа вещества фрагментов Челябинского метеорита. Эта проблема всесторонне и на высоком уровне обсуждалась и обсуждается в публикациях наших коллег из других Институтов и мы с интересом и уважением следим за этими работами.

Очень часто задается вопрос: зачем изучать явление, вероятность которого очень мала. Ответ: даже очень малая вероятность события не гарантирует, что это событие не произойдет завтра и в данном месте.

Профессор, д.ф.-м.н. *Ю.И. Зецер*

ПАДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА – ТИПИЧНОЕ СОБЫТИЕ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

В.В. Светцов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова, В.В. Шувалов

Челябинское событие (далее ЧС) описывается в контексте множественных столкновений Земли с космическими объектами разного размера на протяжении всей ее эволюции. Падения тел размером менее 10 м происходят довольно часто, метровых – в среднем около одного раза в неделю, но, как правило, эти падения происходят в местах, удаленных от жилых районов, и поэтому фиксируются только специалистами. Челябинский метеороид (далее ЧМ), хотя и имел довольно большой размер ~20 м, представлял собой типичный каменный астероид. Такие тела сталкиваются с Землей примерно один раз в 50–100 лет, но уникальность этого события связана главным образом с местом падения – в район с высокой плотностью населения и развитой промышленностью. В статье рассмотрены основные физические явления, происходящие при взаимодействии метеороидов размером в первые десятки метров с атмосферой – торможение, абляция, фрагментация, распространение ударной волны. Описаны современные способы регистрации и моделирования болидных явлений. В заключительной части формулируются актуальные задачи для дальнейших исследований.

Опасные последствия столкновений астероидов и комет с Землей

Столкновения космических тел (астероидов и комет) с Землей происходили регулярно еще до полного формирования нашей планеты и на протяжении всей ее жизни. Удары крупных (>100–300 м) космических тел приводят к образованию кратеров размером от нескольких километров до сотен километров и способны изменить ход эволюции биосферы. Падения небольших тел случаются гораздо чаще, но, как правило, не связаны со значительными по площади и времени действия последствиями. Железные астероиды в среднем прочнее каменных и с большей вероятностью достигают поверхности Земли и оставляют ударный кратер на ее поверхности. Кометы, средняя плотность ядер которых меньше нормальной плотности воды, наоборот, легче тормозятся атмосферой. Но и те и другие сталкиваются с Землей значительно реже, чем каменные тела, которые составляют наибольшую долю объектов, сближающихся с Землей. Поэтому мы исследуем в первую очередь удары каменных тел, таких как ЧМ.

Падения космических тел на Землю представляют собой реальную опасность для человечества (см., например, [Шустов, 2011]). В процессе эволюции Земли неоднократно происходили массовые вымирания видов животных и растений, и одно из них на границе мелового и палеогенового периодов (65 млн лет назад) совпадает по времени с ударом космического тела диаметром 10–15 км [Alvarez et al., 1980; Hildelbrand et al., 1991; Schulte et al., 2010]. Такие крупные удары происходят чрез-

вычайно редко, раз в 100 миллионов лет, и изучение их последствий представляет интерес главным образом с точки зрения изучения эволюции Земли и жизни на нашей планете. В ближайшее столетие Земле не угрожает столкновение с 10-километровым телом (хотя и имеется незначительная вероятность столкновения с долгопериодической кометой). Более того, орбиты 85% астероидов сближающихся с Землей (АСЗ) с диаметром более 1 км вычислены с высокой точностью, а угроза столкновения с ними почти исключена (http://neo.jpl.nasa.gov/stats/). Поэтому гораздо более актуальным является изучение ударов существенно меньших по размеру тел – начиная от первых десятков метров до сотни метров. Во-первых, столкновения с такими телами происходят не так уж редко – примерно раз в 50–1000 лет [Neukum and Ivanov, 1994; Brown et al., 2013]. Во-вторых, такие тела весьма трудно выявить заранее, в лучшем случае тела в несколько десятков метров можно надеяться обнаружить за несколько дней до столкновения, таким образом, все действия по предотвращению последствий таких ударов должны быть чрезвычайно быстрыми. В-третьих, последствия могут быть не только локальными (как в случае удара, образовавшего кратер Метеор размером 1,2 км), но и региональными (Тунгусское событие 1908 года) в зависимости от типа космического объекта и его траектории. И, наконец, современная цивилизация является чрезвычайно чувствительной по отношению к явлениям, которые были несущественными еще сто лет назад: сильные электромагнитные возмущения при ударе космического тела могут привести к полной потере дальней космической связи, а сам взрыв космического тела в атмосфере может быть воспринят как ядерная атака недружественной державы; известные по Тунгусскому событию 1908 года разрушения и пожары на территории в две тысячи квадратных километров могут случиться не в пустынных районах Сибири, а над крупнейшими европейскими городами, плотинами, ядерными электростанциями и другими уязвимыми объектами.

Масштаб ударного события определяется, главным образом, энергией космического тела, которая зависит от его размера, плотности и скорости. Плотности и скорости типичных космических тел меняются в не очень широких пределах, и поэтому часто масштаб события характеризуют просто размером тела, как величиной более наглядной. Плотность и прочность могут заметно влиять на последствия падения небольших тел, которые разрушаются, тормозятся и выделяют энергию в атмосфере. Для оценки угрозы ударов космических тел были разработаны различные шкалы, например, Туринская [Binzel, 2000] (см. рис. 1). Эта шкала оценивает вероятность угрозы на основе двух параметров: вероятности столкновения и кинетической энергии (или размера) ударника.

Эффекты, вызванные падениями космических тел, можно условно разделить по времени их действия на кратковременные (от секунд до первых часов) и долговременные (сутки – годы), а по радиусу воздействия – на локальные (<10 км), региональные (<1000 км) и глобальные. Долгосрочные глобальные последствия характерны для самых крупных ударных событий (размер ударника >10 км) и, как правило, связаны с выбросом в атмосферу значительного количества мелких частиц и химически активных газов [Toon et al., 1997]. Пыль, сажа от пожаров и сульфатные аэрозоли, если порода в месте падения содержит соединения серы, приводят к понижению прозрачности атмосферы, экранировке солнечного излучения и к понижению температуры поверхности (эффект ядерной зимы). Парниковые газы (углекислый газ, метан, вода) оказывают противоположное действие, экранируя инфракрасное излучение с поверхности и приводя к существенному повышению температуры. Суммарный эффект до сих пор не ясен по двум причинам: во-первых, точное опи-

Рис. 1. Туринская шкала для оценки опасности ударов космических тел

сание выбросов в атмосферу, включая химический и физический составы, трудно воспроизвести при моделировании ударов; во-вторых, климатические модели (типа глобальной циркуляции атмосферы) несовершенны, особенно при наличии сильных начальных возмущений. Краткосрочные эффекты падений связаны, в основном, с прохождением ударных волн (УВ) в атмосфере и литосфере, генерацией волн цунами в гидросфере (при ударе в воду). Воздушные ударные волны возникают при пролете космического тела в атмосфере со скоростью, во много раз превышающей скорость звука, и при расширении ударного плюма (облака пара и газа) после удара о поверхность. Разрушающее воздействие ударных волн определяется скачком давления на фронте УВ и скоростью газа за этим фронтом. Кроме того, сильные ударные волны в атмосфере нагревают воздух до высоких (тысячи и даже десятки тысяч градусов) температур, излучение горячего газа может вызвать пожары вблизи места удара. Большая база данных по действию УВ была собрана после проведения ядерных испытаний в 50–60 годы [Glasstone and Dolan, 1977] и широко используется при оценке последствий ударов космических тел.

В зависимости от размера ударника можно выделить 3 сценария удара космического тела. Небольшие тела (<10 м) в большинстве случаев тормозятся в атмосфере на большой высоте, УВ быстро затухают и достигают поверхности как пакет слабых акустических волн. Тела размером от 20 до 100 м тормозятся на высотах от нескольких километров до 20–30 км. В этом случае УВ достигают поверхности, вызывая значительные разрушения (например, при падении Тунгусского космического тела). Тела размером более 100 м, помимо того, что создают УВ в атмосфере, в среднем достигают поверхности с достаточно большой скоростью, что приводит к образованию УВ в литосфере. Распространение УВ в земной коре приводит к образованию ударного кратера с диаметром в десятки раз превышающим размер ударника. Более того, УВ слабо затухают в твердых телах и могут привести к землетрясениям, оползням, обрушениям на значительных расстояниях. При

ударе в воду образуются волны цунами, которые могут распространяться на большие расстояния без существенного затухания. Отметим, что границы между разными сценариями условны и зависят от типа ударника. Приведенные выше значения граничных размеров характерны для каменных тел, для кометоподобных тел они выше, для железных – ниже.

Тунгуска и другие известные падения XX–XXI веков

Самое мощное и впечатляющее падение космического тела в последние столетия – Тунгусское событие 30 июня 1908 года [см., например, Vasilyev, 1998; Светцов, Шувалов, 2005]. Вывал леса на площади более 2000 км^2, пожар, охвативший около 500 км^2 тайги, сейсмическое событие магнитудой 4,8–5,2, региональное геомагнитное возмущение, аномальные атмосферные явления на обширной территории России и Европы, акустико-гравитационные волны, обогнувшие Земной шар, и в то же время отсутствие кратера и сколь-нибудь малых фрагментов метеорита долгое время казались загадочными.

По вывалу леса, магнитуде сейсмического сигнала и амплитуде акустико-гравитационной волны можно приблизительно определить, что выделившаяся энергия составляет около 10 Мт ТНТ (1 кт ТНТ = $4{,}18 \cdot 10^{12}$ Дж), что соответствует кинетической энергии каменного тела диаметром 50–80 м или рыхлого ледяного размером ~100 м при характерной скорости 20 км/с. Кроме того, по характеру вывала леса и возникновению пожара ясно, что выделение энергии произошло на высоте 5–10 км. Как такое крупное тело могло затормозиться в атмосфере долго оставалось неясным, порождая множество альтернативных гипотез – от ядерного взрыва инопланетного космического корабля до взрыва большого объема природного газа. Но показания очевидцев, наблюдавших падение, отсутствие признаков радиации и обнаружение иридия в слоях торфа 1908 года [Назаров и др., 1990] говорили в пользу гипотезы удара астероида или кометы. Объяснить торможение достаточно крупного тела в атмосфере удалось только в 80-е годы – при движении в атмосфере оно разрушается и расплющивается под действием аэродинамических нагрузок, превращаясь в груду камней, и поэтому тормозится гораздо эффективнее, чем единое твердое тело [Григорян, 1979; Chyba et al., 1993]. Интересно, что тела, подобные Тунгусскому, 50–100 м в диаметре, имеют гораздо больше шансов полностью испариться в атмосфере, чем тела размером порядка 1–10 м, в том числе Челябинский метеорит. Крупные тела проникают в более плотные слои атмосферы, где испытывают большие нагрузки и дробятся на мелкие фрагменты, а потоки излучения возрастают благодаря большим оптическим толщинам в плотных слоях нагретого воздуха [Svetsov, 1996].

Еще одной интересной особенностью падений тел размером в десятки метров и более является образование атмосферного плюма. А именно, после торможения и выделении энергии космического объекта нагретый воздух, пары и частицы тела ускоряются вверх вдоль разреженного следа, оставленного падающим телом в атмосфере, и, поднимаясь вверх, образуют расширяющийся объем вещества ударника и воздуха, поднятого из нижних слоев атмосферы. Плюм не образуется при падении тел меньшего размера и при малых углах наклона траектории (как в случае Челябинского метеорита), потому что след оказывается тонким и быстро перемешивается с окружающим воздухом из-за развития неустойчивостей [Shuvalov, 1999]. Именно в плюме вещество Тунгусского космического тела в виде паров, мелких

капель и частиц было выброшено в верхние слои атмосферы, а затем упало вниз, затормозившись на высотах порядка 80–90 км и создав облако частиц диаметром порядка 1000 км [Shuvalov and Artemieva, 2002; Artemieva and Shuvalov, 2010]. Затем это вещество, подхваченное высотными зональными ветрами, дующими на запад со скоростями около 50 м/с [Portnyagin and Solovjova, 2000], распространилось вплоть до Англии и произвело наблюдавшиеся атмосферные эффекты.

Проекцию траектории Тунгусского космического тела на поверхность Земли удалось определить. Но так как остались неизвестными и скорость входа в атмосферу, и угол наклона траектории к поверхности, то орбиту космического тела определить невозможно. В слоях торфа, датируемых 1908 годом, было обнаружено вещество космического тела в виде повышенных концентраций ряда элементов. Соотношение этих элементов довольно хорошо соответствует углистому хондриту [Hou et al., 2005]. Но нельзя и исключить тело кометного происхождения, минеральная составляющая которого может быть близка к углистым хондритам.

Другое знаменитое событие – Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь 12 февраля 1947 года – связано с падением железного астероида с начальной массой от 200 до 500 т [Немчинов, Попова, 1997]. В этом случае тело тоже разрушалось в атмосфере, но не сохраняло свою связность – отдельные фрагменты расходились в полете за счет аэродинамических сил [Passey and Melosh, 1980; Artemieva and Shuvalov, 2001]. По обобщению показаний очевидцев фрагментация происходила в несколько стадий на высотах 58, 34, 16 и 6 км [Дивари, 1959]. Отдельные фрагменты, массой до 1700 кг, затормозившись, достигли поверхности со скоростями до нескольких километров в секунду и образовали кратерное поле размером 0,3×0,6 км, причем диаметр самого большого кратера был более 25 м [Светцов, 1998; Artemieva and Shuvalov, 2001]. Всего было собрано несколько десятков тысяч фрагментов общей массой более 27 т, но вся масса выпавшего вещества примерно в 3 раза больше. Численное моделирование падения [Немчинов, Попова, 1997] дало хорошее согласие с результатами натурных исследований при угле наклона траектории к поверхности около 40°, скорости входа в атмосферу 12–15 км/с и начальной кинетической энергии астероида 3,5–13 кт ТНТ.

Интересное кратерообразующее падение тела с высокой прочностью – железный метеорит Стерлитамак массой более 1500 кг (размером несколько меньше метра), который, затормозившись в атмосфере 17 мая 1990 года, достиг поверхности Земли со скоростью более 2 км/с и образовал кратер диаметром около 10 м [Ivanov, Petaev, 1992]. Несколько больший кратер диаметром 13 м образовал перуанский каменный метеорит Каранкас 15 сентября 2007 года, который оказался обыкновенным хондритом класса H [Tancredi et al., 2009]. Особенность места падения этого метеорита состоит в том, что грунтовые воды содержат ядовитые вещества – соединения мышьяка и, возможно, серу. Выделение в атмосферу ядовитых газов после удара вызвало отравление местных жителей, что говорит еще об одном факторе астероидной опасности. Напомним, что одна из гипотез массового вымирания биоты 65 млн лет назад – выделение в атмосферу серы, которая содержалась в осадочных породах в месте падения астероида, образовавшего кратер Чиксулуб в Мексике.

Менее прочный каменный астероид 2008 TC_3 массой около 80 т и размером около 4 м вошел в атмосферу 7 октября 2008 года и разрушился на высотах 45–33 км над Нубийский пустыней в Судане [Jenniskens et al., 2009]. Было найдено около 600 фрагментов метеорита, названного Алмахата Ситта, общим весом около 11 кг [Shaddad et al., 2010]. Фрагменты были классифицированы как редкий класс метеоритов – аномальный урелит и среди них встречались фрагменты энстатитовых и

обычных хондритов. Это был первый случай, когда удар небольшого тела был заранее предсказан – астероид был обнаружен астрономами примерно за сутки до входа в атмосферу.

Отметим еще одно падение, показывающее возможность полного разрушения и испарения, крупных малопрочных каменных метеорных тел в атмосфере, а именно падение 3 сентября 2004 г. над Антарктикой очень крупного болида, доатмосферная масса которого оценивается в 10^6 кг [Klekociuk et al., 2005]. Разрушение тела произошло на высотах 32 и 25 км. Через несколько часов после падения, на высоте более 20 км было обнаружено облако микрочастиц размером 1–10 мкм, масса которого составляла также около 10^6 кг, что подтверждает полное разрушение и испарение тела.

Способы наблюдения и регистрации потенциально опасных объектов

Астрономические наблюдения за астероидами размером от нескольких метров до первых десятков метров в настоящее время практически невозможны ввиду их малого размера. Такие тела могут быть обнаружены на подлете к Земле только случайно, как, например, упоминавшийся выше 4-метровый астероид 2008 TC_3. Говорить о регулярном наблюдении за такими объектами, вычислении их траекторий и оценке возможности столкновения с Землей не приходится, то есть пока нам остается смириться с тем фактом, что падения типа ЧМ не могут быть предсказаны заранее, а могут быть зарегистрированы в большинстве случаев лишь после их входа в атмосферу.

Система геостационарных спутников министерства обороны США (МО США) была создана для глобального контроля за проведением ядерных взрывов и других военных испытаний на поверхности или в атмосфере Земли. За восемь лет (1994–2002 гг.) система зарегистрировала около 300 вспышек излучения в атмосфере в инфракрасном и видимом диапазонах – возможных болидных явлений. Восстановление параметров метеороидов по этим данным является довольно сложной задачей, так как требует знания спектров излучения и эффективности преобразования кинетической энергии в световую [Nemchinov et al., 1997; Brown et al., 2002]. К сожалению, полный набор этих данных в настоящее время недоступен для научного анализа, были опубликованы только результаты наблюдений за 1996–1998 годы. В случае падения астероида TC_3 2008 была опубликована излученная энергия и словесное описание световой кривой (зависимость мощности излучения от времени) [Jenniskens et al., 2009], а для ЧМ – только величина излученной энергии. В последнем случае авторам статьи [Brown et al., 2013] была дана возможность откалибровать максимум световой кривой, полученной из наземных наблюдений, по спутниковым данным.

Система наблюдений с земли обычно охватывает меньшие площади (порядка 10^6 км^2), но позволяет при хороших погодных условиях регистрировать световые кривые, спектры излучения и при базисных наблюдениях (то есть при регистрации с нескольких независимых точек наблюдения) определять траектории болидов и возможное место падения метеоритов. Такие системы были развернуты в США [Prairie Network, McCrosky et al., 1976], Канаде [Halliday et al., 1996], Европе [European Network, Oberst et al., 1998] и в Австралии [Desert Fireball Network (DFN), Towner et al., 2012]. Две последние системы являются действующими в настоящее время и позволяют обнаруживать метеориты после их регистрации в атмосфере,

давая, таким образом, уникальную возможность сравнения неявно определенных параметров (плотность, тип объекта) с лабораторными измерениями in situ. Всего по одному метеориту было найдено во время работы Прерийной и Канадской сетей (Lost City и Innisfree), несколько метеорито-образующих болидов было зарегистрировано локальными наблюдательными сетями (Grimsby, Villalbeto de la Peña и др.), полет нескольких метеоритов (Pribram, Neuschwanstein, Jesenice) был зарегистрирован Европейской сетью. Случайные видео и фоторегистрации также оказываются очень полезными при изучении входов космических тел в атмосферу, они помогли найти такие метеориты как Moravka, Tagish Lake и другие. Недавно развернутая система DFN имеет очень хорошие перспективы, так как поиск метеоритов в пустынных районах Австралии значительно эффективнее (два метеорита зарегистрированы и найдены всего за 4 года наблюдений).

Движение метеороидов в атмосфере создает сильные акустические возмущения [ReVelle, 1976]. Длинные инфразвуковые волны (<20 Гц) распространяются на большие расстояния и могут быть зарегистрированы международной мониторинговой системой IMS, которая, как и геостационарные спутники, была создана для военных целей, но способна регистрировать крупные болидные события [Arrowsmith 2008]. Расшифровка акустических сигналов является нетривиальной задачей и часто дает неоднозначные результаты (например, в случае падения метеорита Каранкас).

Сейсмические сигналы появляются в результате взаимодействия ударных или акустических волн, распространяющихся в атмосфере, с поверхностью земли и могут служить дополнительным источником информации. Как правило, сейсмографы являются частью IMS (International Monitoring System). Таким образом, заметная часть крупных метеороидов (>1 м) может быть в настоящее время зарегистрирована спутниками МО США (оптические данные) и/или системой IMS (акустические и сейсмические данные).

Дополнительные данные, способные помочь поиску метеоритов, может предоставлять такая система наблюдений как погодные радары, чья эффективность была продемонстрирована недавно [Fries and Fries, 2010]. Действие радаров основано на Допплер-эффекте, они способны «увидеть» метеороид на высотах <20 км, то есть на той части траектории, где метеорное тело, затормозившись, перестает излучать и оказывается невидимым для оптических наблюдений. Точность таких радарных наблюдений невысока, но позволяет существенно сузить площадь поиска потенциальных метеоритов.

Пролет ЧМ продемонстрировал, что современная любительская видео- и фотосъемка может служить чрезвычайно эффективным механизмом регистрации пролета метеороидов. Именно сотни фото-видеозаписей плюс запись камер наблюдения позволили воспроизвести траекторию этого полета, оценить светимость и энерговыделение, выявить высоты интенсивной фрагментации и даже обнаружить самый крупный фрагмент ЧМ, достигший поверхности.

Физические процессы при движении метеороида в атмосфере и численное моделирование

При движении космического тела в атмосфере Земли с космической скоростью (>11 км/с) происходит несколько важных процессов. Во-первых, тело тормозится. Интенсивность торможения определяется размером тела, его формой, плотно-

стью, скоростью и плотностью атмосферы. Во-вторых, образующаяся УВ сильно нагревает воздух, который начинает излучать (поэтому мы и видим болид). Часть излучения попадает на космическое тело и испаряет его, то есть происходит процесс абляции. Интенсивность абляции зависит от скорости тела и его свойств, выраженных в коэффициенте абляции, который может быть определен экспериментально, по наблюдениям или вычислен методами радиационной газовой динамики.

Эти два процесса были поняты и подробно исследованы еще в 30-х годах прошлого века. Зная коэффициенты торможения и абляции, а также начальные условия (при входе в атмосферу), решить дифференциальные уравнения, описывающие эти процессы, не составляет большого труда. Однако существует еще один процесс, важность которого была осознана сравнительно недавно – разрушение или фрагментация метеороида под действием аэродинамических сил [Григорян 1979; Chyba et al., 1993]. Дело в том, что метеороид, проникая во все более плотные слои атмосферы, подвергается возрастающим динамическим нагрузкам. Когда нагрузки, выражающиеся в первую очередь давлением за ударной волной перед телом, превышают обычно невысокую прочность метеороида [Popova et al., 2011], происходит потеря целостности объекта, его разрушение на отдельные части. Разрушенное тело под действием аэродинамических сил начинает деформироваться: тело становится подобным капле жидкости, оно изменяет свою форму (сплющивается), а куски разрушенного метеороида разлетаются (из одного тела образуется несколько). Фрагменты разрушенного метеороида имеют большую прочность, чем исходное тело, и в течение некоторого времени летят, не разрушаясь. В зависимости от природы объекта и его размера, процесс движения разрушенного метеороида можно описать двумя приближенными способами. Один предполагает, что тело сохраняет свою целостность, но меняет форму, сильно расширяясь в направлении, перпендикулярном его скорости, и постепенно превращаясь в «блин» [Chyba et al., 1993]. Другой способ рассматривает независимое движение образовавшихся фрагментов [Passey and Melosh, 1980, Artemieva and Shuvalov, 2001]. Первый сценарий больше подходит для описания крупных малопрочных тел (Тунгуска, кометные тела), второй – для описания небольших или очень прочных тел (например, железных метеороидов). Обе модели содержат свободные параметры и, как правило, варьируя эти параметры и комбинируя обе модели, удается «подогнать» результаты моделирования под наблюдения [например, Popova et al., 2013]. Тем не менее, ни одна модель не является совершенной, и ни одно космическое тело не подчиняется в точности ни одному из сценариев. Кроме того, эти модели не позволяют оценить интенсивность ударных волн и вызванные этими волнами эффекты на поверхности.

Казалось бы, наилучшие результаты могут быть получены путем математического моделирования – численного решения уравнений радиационной газовой динамики, описывающих обтекание космического тела атмосферным газом. Такие задачи решались многократно, хотя и с разной степенью точности. Однако существует несколько проблем, которые ограничивают возможности численного моделирования. Во-первых, корректное описание разрушения и последующей деформации разрушенного тела возможно только для «идеальных» объектов, прочностные свойства которых хорошо известны и могут быть описаны известными реологическими соотношениями. Реальные космические тела таковыми не являются и, более того, каждый метеороид по-своему уникален. Во-вторых, оптические свойства метеороидов тоже заранее неизвестны. В-третьих, для аккуратного описания сверхзвукового потока вокруг тела размер вычислительных ячеек должен быть много

меньше размера самого тела (в 10–50 раз). При этом длина траектории в атмосфере может составлять сотни километров (как в случае ЧМ), то есть размер требуемой разностной сетки и время вычислений выходят за пределы возможностей современных компьютеров и вряд ли могут быть оправданы, принимая во внимание указанные неопределенности физической модели. Именно поэтому первый подход является наиболее целесообразным, если нужны быстрые оценки, а второй (часто, с существенными упрощениями постановки задачи) может быть использован для выяснения таких деталей, как избыточное давление и скорость «ветра» на поверхности [см. статью Шувалова и др., 2014, этот сборник].

Челябинское падение – основные факты

Событие 15.02.2013, Челябинский болид, выделяется в ряду других болидных явлений, прежде всего наличием большой области разрушений, но, кроме того, большим количеством разнообразных данных: огромным числом любительских видео и фото съемок, регистрацией оптического излучения и пылевого следа спутниковыми системами наблюдений, многочисленными записями инфразвуковых и сейсмических сигналов, описанием поля рассеяния метеоритов.

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на протяжении 540 км с севера на юг от Нижнего Тагила до города Карталы и на 900–1000 км с запада на восток (от Самары, Оренбурга до Тюмени) [Емельяненко и др., 2013]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить траекторию пролета болида [Borovicka et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Popova et al., 2013]. Эта траектория согласуется также с траекторией, определенной на основе снимков следа болида спутниками Meteosat [Miller et al., 2013].

Общая картина Челябинского события хорошо установлена [Емельяненко и др., 2013]. Утром 15 февраля, примерно в 09.20 местного времени, в районе г. Челябинска (Россия) в атмосферу Земли под углом менее 20 градусов к горизонту вошло космическое тело размером 16–19 м. Сближение с Землей объекта достаточно внушительных размеров прошло не замеченным всеми существующими средствами космического и наземного наблюдения за небесными телами. И только после его вторжения в атмосферу произошли явления, которые вызвали разрушения и привлекли внимание широкой общественности. При взаимодействии с атмосферой появилось сильное свечение (болид). Через несколько секунд начался значительный рост яркости, максимальная вспышка произошла примерно через 11–12 секунд после начального появления болида. По сообщениям очевидцев, в момент максимальной вспышки свечение было много ярче солнечного, ощущался жар. И до вспышки, и после нее в небе был хорошо виден след от болида. Через несколько минут (в зависимости от расстояния до траектории) на поверхность земли пришла взрывная волна (то есть ударная волна, вызванная преобразованием кинетической энергии тела в тепловую при его торможении). По сообщению МЧС разрушения от взрывной волны были зафиксированы в Челябинске и десяти районах области. Самые большие разрушения имели место в Челябинске, Коркино, Копейске и поселке Роза. За медицинской помощью обратилось более 1600 человек, госпитализировано 69 человек, из них 13 детей. Большинство из них пострадало от выбитых стекол. Двое пострадавших были помещены в реанимацию. По числу пострадавших падение этого метеорита не имеет аналогов.

Излучение Челябинского болида было очень ярким, он относится к суперболидам, то есть болидам ярче –17 звездной величины. Для Челябинского события были опубликованы координаты места максимальной яркости (54,8N, 61,1E), соответствующая высота и скорость (23,3 км и 18,6 км/с), а чуть позднее – и величина излученной энергии, $3{,}75 \cdot 10^{14}$ Дж, что соответствует примерно 90 кт ТНТ (http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs/). Координаты места максимальной яркости оказываются не очень далеко от траектории Челябинского метеороида, определенной по видеозаписям [Borovicka и др., 2013; Popova et al., 2013].

Двадцать инфразвуковых (ИЗ) станций организации по контролю за ядерными вооружениями (СТВТО) зарегистрировали падение Челябинского астероида [LePichon et al., 2013]. Кроме того, ИЗ сигнал был зарегистрирован и другими станциями, в том числе микробарометрами Института динамики геосфер РАН в Москве и геофизической обсерваторией ИДГ РАН «Михнево» (Серпуховской р-н Московской области) [Рыбнов и др., настоящий сборник; Popova et al., 2013].

Сейсмические колебания, вызванные входом болида в атмосферу, были зарегистрированы сейсмическими станциями на расстояниях в сотни и тысячи километров. Предварительно определенные координаты источника сейсмических колебаний (55.150°N, 61.410°E, USGS web-site http://comcat.cr.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2013lra1#summary) находились достаточно далеко от оцененной траектории полета метеороида.

Более поздние оценки [Tauzin et al., 2013] позволили точнее определить местоположение источника сейсмических возмущений, которое неплохо согласуется с траекторией. Магнитуда соответствующего сейсмического события оценивается в 2,7–4 по разным источникам.

Уроки Челябинского события

С точки зрения проблем астероидной опасности, ЧМ представляет уникальный случай небольшого и весьма типичного ударного события над густонаселенным промышленным районом, наглядно демонстрируя давнюю идею о том, что в XXI веке даже сравнительно небольшие ударные события могут оказаться опасными, так как их действие определяется не только полной энергией ударника, но и свойствами «мишени» [Немчинов и др., 2005]. Другими словами, взаимодействие воздушных УВ с поверхностью или попадание крупных фрагментов в чувствительные точки цивилизации (электростанции, химические заводы, плотины, военные объекты) может привести к катастрофическим последствиям, далеко превосходящим по своим масштабам предсказания по стандартным моделям [Collins et al., 2005]. Необходима разработка базы данных по последствиям ударов, которая включает в себя в качестве входных параметров не только основные доатмосферные параметры метеороидов, но и возможные точки удара.

В современном мире ключевой проблемой является информация. Ее отсутствие может вызвать опасную панику среди населения и привести к неадекватным ответным действиям. Понятно, что падение такого тела, как ЧМ, предсказать заранее или «перехватить» в атмосфере невозможно. Так же невозможно, по-видимому, быстро определить параметры космического объекта. Но исключить техногенные катастрофы в районе с многочисленными потенциально опасными объектами и панику можно за счет своевременного информирования населения и оперативной работы соответствующих служб.

ЧМ выявил и другую серьезную социальную проблему – неготовность людей адекватно реагировать на необычное событие. Астрономия исключена из обязательных школьных программ, а такие вещи, как астероиды и ударные волны, вряд ли изучаются на уроках физики. Даже программы по основам безопасности жизнедеятельности (ОБЖ) уделяют минимальное внимание техногенным катастрофам (1 урок, четыре страницы в учебнике). Поколение, выросшее в годы холодной войны, когда угроза применения ядерного оружия была реальной, знало, что делать, если за окном происходит необычно яркая вспышка. После пролета ЧМ тысячи людей пострадали только потому, что бросились к окнам выяснять причины такой вспышки. К сожалению, не удалось организовать и грамотный сбор бесценного метеоритного вещества, большую часть которого собрали местные жители, не составляя описания, не сохраняя данные о месте находки и массе экземпляра. А сообщения местных правоохранительных органов о незаконности (и даже опасности) сбора этого вещества вынудило жителей скрывать от ученых собранные коллекции, что привело к значительной потере информации о поле рассеяния метеорита.

С точки зрения изучения метеоритных явлений главными особенностями ЧС являются его размер (события такого масштаба происходят по меркам человеческой жизни редко, примерно раз в 50–100 лет) и множество полученных наблюдательных данных. Анализ этого явления позволяет проверить уже существующие физические и математические модели входа в атмосферу сравнительно небольших космических тел (10–100 м в диаметре). Ранее единственным примером такого события была Тунгуска 1908 года [Vasilyev, 1998] с очень ограниченным количеством научных наблюдений, оставляющим широкий простор для квазинаучных спекуляций. Опубликованные в этом сборнике статьи [Шувалов и др.; Иванов; Светцов и Шувалов] демонстрируют работоспособность существующих физических моделей и надежность реализующих их численных методов. Упрощенные методы расчета пролета метеороидов с учетом торможения, абляции и фрагментации [Popova et al., 2013; Borovicka et al., 2013; Попова и др., этот сборник] также подтвердили свое соответствие реальности. Однако сравнение моделей с конкретным событием выявило некоторые проблемы, к которым относятся следующие:

1. Количество собранного материала ЧМ оказалось незначительным по сравнению с теоретическими оценками. В большинстве случаев, когда была определена масса тела, доля собранного вещества лежит в диапазоне 0,1–10% от начальной массы метеорного тела, что соответствует наиболее употребительной модели. Но для некоторых крупных метеороидов, в том числе и для ЧМ, она составляла только 0,01–0,02% [Popova et al., 2011]. По-видимому, «стандартные» модели нуждаются в доработке, так как они либо рассматривают движение фрагментов как независимое друг от друга, либо описывают многочисленные мельчайшие фрагменты в приближении «блинной» модели, в то время как для крупных объектов «коллективные» эффекты (например, мелкая пыль в горячем следе крупного фрагмента) могут стать преобладающими. Моделирование движения совокупности целых относительно крупных фрагментов, мелких частиц и пара представляет из себя серьезную проблему, которую еще предстоит решить.

2. Во всех моделях, опубликованных в данном сборнике, излучение или не учитывается совсем, или трактуется приближенно. Неравновесные процессы диссоциации и ионизации не рассматриваются, а отсутствие подробных коэффициентов поглощения вещества космического тела не позволяет получить детальный спектр его излучения.

3. Процесс абляции космического тела трактуется как испарение твердого фрагмента под действием падающего на него излучения, рождающегося в ударно-сжатом слое. Между тем, при абляции происходит плавление и отрыв мелких частиц, что приводит к снижению эффективной энергии, необходимой для испарения и, следовательно, к более интенсивной абляции.

4. Предложенная и описанная в данном сборнике новая модель возникновения электрофонных шумов требует экспериментального подтверждения и дальнейшего теоретического развития.

Эти проблемы определяют направления дальнейших исследований Челябинского события и других метеорных явлений.

Литература

Григорян С.С. Движение и разрушение метеоритов в планетных атмосферах // Космические исследования. 1979. V. 17. P. 875–893.

Дивари Н.Б. Явления, сопровождавшие падение метеорного дождя, и его атмосферная траектория // Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 1. С. 26–48.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013. V. 47. P. 1–16.

Мелош Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. М.: Мир, 1994. 336 с.

Назаров М.А., Корина М.И., Барсукова Л.Д. и др. Вещественные следы Тунгусского болида // Геохимия. 1990. № 5. С. 627–639.

Немчинов И.В., Попова О.П. Анализ Сихотэ-Алинского события 1947 г. и его сравнение с явлением 1 февраля 1994 г. // Астрономический вестник. 1997. Т. 31. № 5. С. 458–471.

Немчинов И.В., Светцов В.В., Шувалов В.В. Основные факторы астероидной опасности. Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 12–61.

Светцов В.В. Загадки кратерного поля Сихотэ-Алиня // Астрономический вестник. 1998. Т. 32. № 1. С. 76–88.

Светцов В.В., Шувалов В.В. Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г. Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 167–199.

Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы / УФН. 2011. Т. 181. С. 1104–1108.

Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction // Science. 1980. V. 208. P. 1095–1108.

Artemieva N.A. and Shuvalov V.V. Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research. 2001. V. 106. P. 3297–3310.

Artemieva N.A. and Shuvalov V.V. Tunguska explosion – final remarks // Lunar and Planetary Science Conference 41. 2010. Abstract, 1268.

Binzel R.P. The Torino Impact Hazard Scale // Planetary and Space Science. 2000. V. 48. No. 4. P. 297–303.

Borovička J. and 6 co-authors. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. P. 235–237.

Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden S.P. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.

Brown P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. P. 238–241.

Chyba C.F., Thomas P.J., and Zahnle K.J. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature. 1993. V. 361. P. 40–44.

Collins G.S., Melosh H.J., Marcus R.A. Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // Meteoritics and Planetary Science. 2005. V. 40. P. 817–840.

Fries M. and Fries J. Doppler weather radar as a meteorite recovery tool // Meteoritics and Planetary Science. 2010. V. 45. P. 1476–1487.

Glasstone S., Dolan P.J. The Effects of Nuclear Weapons, 3rd edition. Washington, DC: United States Department of Defense and Department of Energy, 1977. 653 p.

Halliday I., Griffin A.A., Blackwell A.T. Detailed data for 259 fireballs from the Canadian camera network and inferences concerning the influx of large meteoroids // Meteoritics and Planetary Science. 1996. V. 31. P. 185–217.

Hildebrand A.R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo-Z A., Jacobsen S.B., Boynton W.V. Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico // Geology. 1991. V. 19. P. 867–870.

Hou Q.L., Kolesnikov E.M., Xie L.W. and 3 co-authors. Discovery of probable Tunguska cosmic body material: anomalies of platinum group elements and rare-earth elements in peat near the Explosion Site / (1908) // Planetary Space Science. *2000.* V. 48. P. 1447–1455.

Ivanov B.A., *Petaev M.* Mass and Impact Velocity of the Meteorite Formed the Sterlitamak Crater in 1990 // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference. V. 23. P. 573.

Jenniskens P., Shaddad M. H., Numan D. and 32 co-authors. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // *Nature. 2009. V. 458. P. 485–488.*

Klekociuk A.R., Brown P.G., Pack D.W. and 6 co-authors. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid // Nature. 2005. V. 436. P. 1132–1135.

Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., and N. Brachet. Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3732–3737.

McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A. Prairie network fireball. I – General information and orbits // Meteoritika. 1978. No. 37. P. 44–59.

Miller S.D., Straka W.C., Bachmeier A.S., Schmit T.J., Partain P.T., Noh Y.-J. Earth-viewing Satellite Perspectives on the Chelyabinsk Meteor Event // PNAS. 2013; DOI 10.1073/pnas.1307965110.

Nemtchinov I. et al. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus. 1997. V. 130. P. 259–274.

Neukum G., Ivanov B.A. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial planet? And asteroid cratering data // In: Hazards due to Comets and Asteroids (ed. T. Gehrels). Tucson, London. Univ.Arizona Press, 1994. P. 359–416.

Oberst J., Molau S., Heinlein D. et al. The «European Fireball Network»: current status and future prospects // Meteoritics and Planetary Science. 1998. V. 33. P. 49–56.

Passey Q.R. and Melosh H.J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. 1980. V. 42. P. 211–233.

Popova O., Borovička J., Hartmann W.K. et al. Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids // Meteoritics and Planetary Science. 2011. V. 46. P. 1525–1550.

Popova O.P. and 59 co-authors. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite Rrecovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Portnyagin Y.I., Solovjova T.V. Global empirical wind model for the upper mesosphere/lower thermosphere // Ann. Geophysicae. 2000. V. 18. P. 300–315.

Schulte P. and 40 co-authors. The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary // Science. V. 327. P. 1214–1218.

Shaddad M.H. and 19 co-authors. The recovery of asteroid 2008 TC_3 // Meteoritics and Planetary Science. 2010. V. 45. P. 1557–1589.

Shuvalov V.V. Atmospheric plumes created by meteoroids impacting the Earth // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 5877–5890.

Shuvalov V.V. and Artemieva N.A. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planeary and Space Science. 2002. V. 50. P. 181–192.

Svetsov V.V. Total ablation of the debris from the 1908 Tunguska explosion // Nature. 1996. V. 383. P. 697–699.

Tagliaferri E., Spalding R., Jacobs C., Worden S.P., and Erlich A. Hazards due to Comets and Asteroids (ed. Gehrels, T.) // Tucson: Univ. Arizona Press, 1994. P. 199–221.

Tancredi G. and 15 co-authors. A meteorite crater on Earth formed on September 15, 2007: The Carancas hypervelocity impact // Meteoritics and Planetary Science. V. 44. P. 1967–1984.

Tauzin B., Debayle E., Quantin C., Coltice N. Seismo-acoustic coupling induced by the breakup of the 15 Feb 2013 Chelyabinsk Meteor // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3522–3526

Toon O.B., Zahnle K., Morrison D., Turco R.P., Covey C. Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets // Reviews of Geophysics. 1997. V. 35. P. 41–78.

Towner M.C. and 6 co-authors. Towards a Digital Desert Fireball Network for Meteorite Recovery // 75th Annual Meeting of the Meteoritical Society, held August 12–17, 2012 in Cairns, Australia. Published in Meteoritics and Planetary Science Supplement. 2012. A. 5123.

Vasilyev N.V. The Tunguska Meteorite problem today // Planetary and Space Science. 1998. V. 46. P. 129–150.

ОРБИТА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО ОБЪЕКТА

***С.А. Нароенков*[1], *В.В. Емельяненко*[1], *О.П. Попова*[2]**

[1] – Институт астрономии РАН, [2] – Институт динамики геосфер РАН

С использованием полученных из наблюдений астрометрических положений [Popova et al., 2013] была определена орбита Челябинского объекта. На основании полученной орбиты исследовано движение объекта в прошлом и изучена возможность связи Челябинского объекта с астероидами 86039 (1999 NC43) и 2008 DJ.

Введение

Челябинское событие (15 февраля 2013 г.) явилось самым мощным воздушным взрывом метеороида в атмосфере Земли со времени Тунгусского события в 1908 г. Это было неожиданное событие, которое произошло в густонаселенном регионе. В соответствии с официальными отчетами более 7320 сооружений и зданий было повреждено и 1613 человек обратились за медицинской помощью, в основном с порезами от битого оконного стекла.

С астрономической точки зрения, Челябинское событие дало огромное количество наблюдательной информации для детального изучения этого небесного тела. Общее описание первых результатов исследования челябинского тела было дано в работе [Емельяненко и др., 2013]. Более подробный анализ проведен в работах [Popova et al., 2013; Borovicka et al., 2013; Brown et al., 2013].

В данной работе мы представляем наши результаты по определению орбиты и исследованию взаимосвязи Челябинского объекта с другими околоземными объектами.

Орбита тела

На сегодняшний день в метеорной астрономии имеются детально разработанные методы определения доатмосферной орбиты тела, общим для которых является предварительное вычисление радианта и скорости на бесконечности [Jenniskens et al., 2012; Borovicka et al., 2013]. Такой подход хорош в случае метеоров с достаточно короткой траекторией в атмосфере, но в случае Челябинского объекта упрощенная модель движения объекта может дать неправильные результаты при определении доатмосферной орбиты. Поэтому мы определили орбиту напрямую, используя астрометрические координаты объекта, как всегда определяем орбиты астероидов, то есть решили обратную задачу орбитальной динамики с использование метода наименьших квадратов. При использовании этого метода всегда можно определить не только орбитальные параметры объекта, но и погрешности определения элементов орбиты. Единственным недостатком метода является только его плохая сходимость при итерационном процессе улучшения, если первоначальная орбита известна с недостаточной точностью. В нашем случае, мы использовали в качестве первоначальной орбиту из работы [Popova et al., 2013].

Обратная задача орбитальной динамики состоит в определении орбитальных параметров из астрометрических наблюдений в рамках выбранной модели движения небесных тел. В модели сил воздействующих на исследуемое тело мы учли притяжение Солнца, планет и Луны. Кроме того, мы включили торможение метеороида в атмосфере в виде $-A\rho_A V\vec{V}$, где ρ_A – плотность атмосферы, $\vec{V}$ – скорость объекта относительно атмосферы. Коэффициент A является неизвестным и очень трудным для описания, поскольку зависит в том числе и от абляции, и фрагментации тела в атмосфере. Таким образом, мы определили внеатмосферную орбиту тела: 1) исходя из наблюдений явления в верхней атмосфере, считая изменение A очень малым; 2) изменяя величину A мы нашли наилучший вариант внеатмосферной орбиты, который хорошо представляет все наблюдения.

Для нашего исследования астрометрические наблюдения (прямое восхождение α и склонение δ) были получены на основе пяти видеозаписей, сделанных в Коркино, Первомайском, Белорецке, Снежинске и Каменск-Уральске [Popova et al., 2013]. Наше моделирование показало, что наилучшие результаты при уточнении орбиты достигаются, если использовать все наблюдения с $t <$ 03:20:32.2 UTC и $A = 0$. Этот момент времени соответствует максимальной яркости болида, его основной вспышке. Наши вычисления хорошо совпадают с предположением, что до высоты 25 км торможение было незначительным [Popova et al., 2013]. В таблице 1 приведены наши результаты определения кеплеровых элементов орбиты. Величина O-C для нашей орбиты составила 2265″. На рисунках 1 и 2 представлены значения азимута и высоты из наблюдений и моделирования. Цифровые значения обозначают

Таблица 1

Доатмосферная орбита Челябинского объекта (Эпоха J2000)

T_0	2013.02.15.0 TT
a (AU)	1,8804986±0,068
E	0,608988648±0,017
Ω (deg)	108,926276±0,536
Ω (deg)	326,445884±0,002
i (deg)	5,938266±0,427
M_0 (deg)	16,872985±1,069

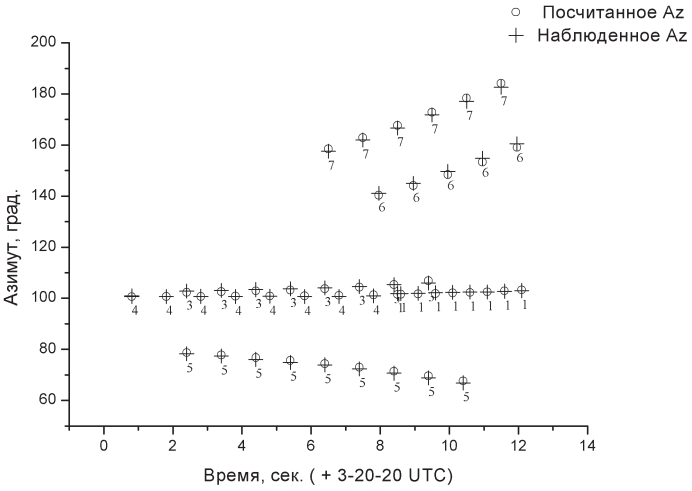


Рис. 1. Изменение азимута Челябинского объекта от времени (наблюденное и модельное)

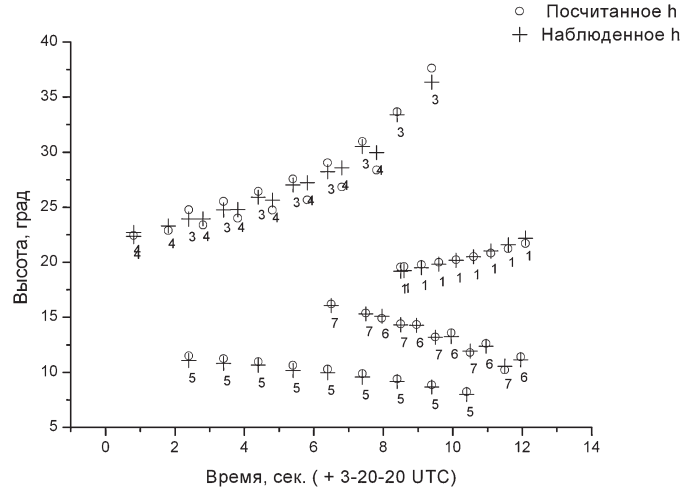


Рис. 2. Изменение высоты Челябинского объекта от времени (наблюденное и модельное)

пункты, откуда были сделаны наблюдения: 1 – Чебаркуль, 3 – Коркино, 4 – Первомайский, 5 – Белорецк, 6 – Снежинск, 7 – Каменск-Уральский.

Различия в орбитальных элементах между нашей орбитой и орбитами, определенными в работах [Popova et al., 2013; Borovicka et al., 2013] находятся в пределах статистической неопределенности.

Для вычисленной орбиты мы определили трек падения объекта на земную поверхность. По нашим расчетам, траектория полета Челябинского объекта проходила примерно в 34 км от Челябинска, с азимутом – 284°. Так как сейчас определено место в озере Чебаркуль, куда упал ~650-кг осколок, то мы сопоставили координаты места падения метеорита с проекцией нашей траектории падения на поверхность Земли. Расстояние между местом падения и нашей траекторией падения составило 600 метров. Данные результаты могут являться подтверждением правильности метода определения орбиты.

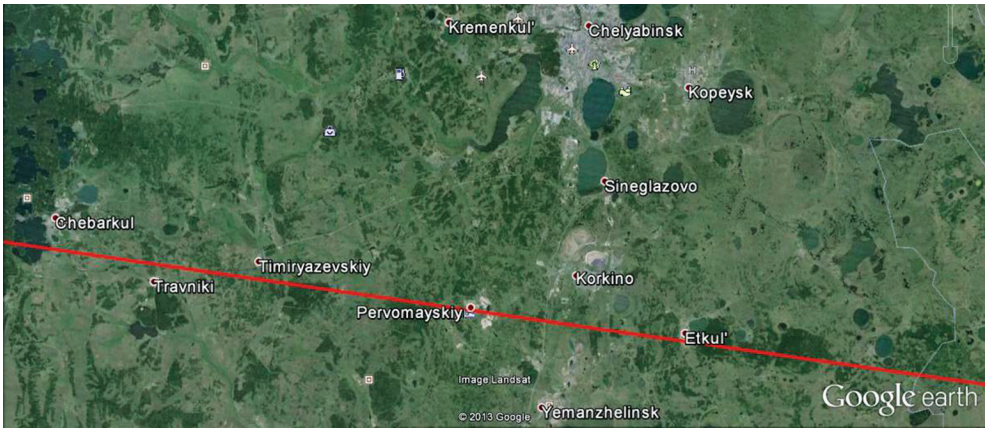


Рис. 3. Траектория полета Челябинского объекта

Поиск астероидов, связанных с Челябинским объектом

Первая попытка определить астероиды с близкими орбитальными параметрами для Челябинского тела была сделана в работе [Marcos, 2013]. Результаты работы являются сомнительными, так как доатмосферная орбита объекта определена очень грубо.

Для орбиты Челябинского болида мы нашли астероиды близкие по орбитальным параметрам. Для анализа был взят каталог астероидов JPL Small-Body Database. Анализ близости орбит проводился с помощью D-критерия (Dsh) [Southworth-Hawkins, 1963]. Наименьшие значения критерия Dsh были получены для астероидов 2008 DJ – Dsh = 0,061 и 86039 (1999 NC43) – Dsh = 0,0526. Эти астероиды были отмечены как близкие в работе [Borovicka et al., 2013]. Для более подробного изучения этого семейства астероидов мы провели численное интегрирование орбит назад во времени на 2000 лет. Интегрирование проводилось с помощью интегратора Эверхарта. На рис. 4 представлено изменение величины Dsh для пар астероидов Chelyabinsk – 2008 DJ и Chelyabinsk – 1999 NC43. Значение D-критерия для астероида 2008 DJ в прошлом было еще меньше, чем сейчас. Мы считаем, что астеро-

ид 2008 DJ вероятно может быть более тесно связан с метеоритом Челябинск, чем астероид 1999 NC43.

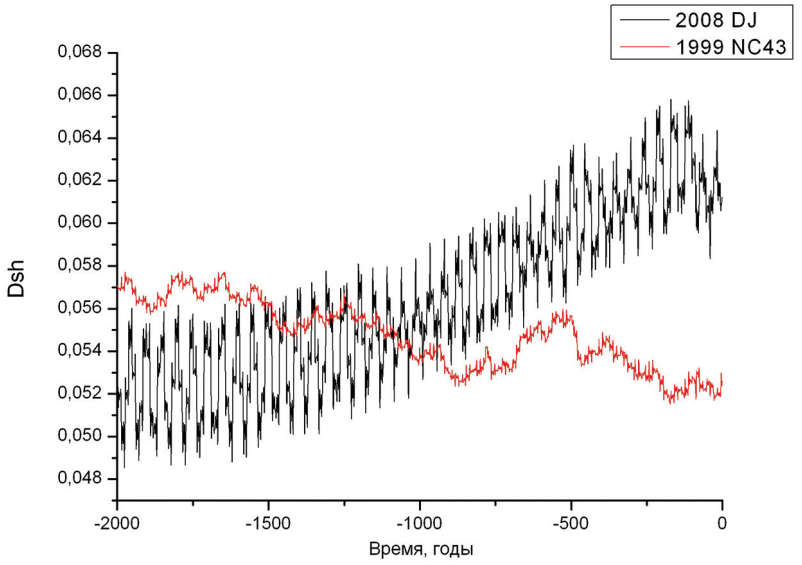


Рис. 4. Изменение D-критерия для пар астероидов 2008DJ – Челябинск и 1999NC43 – Челябинск

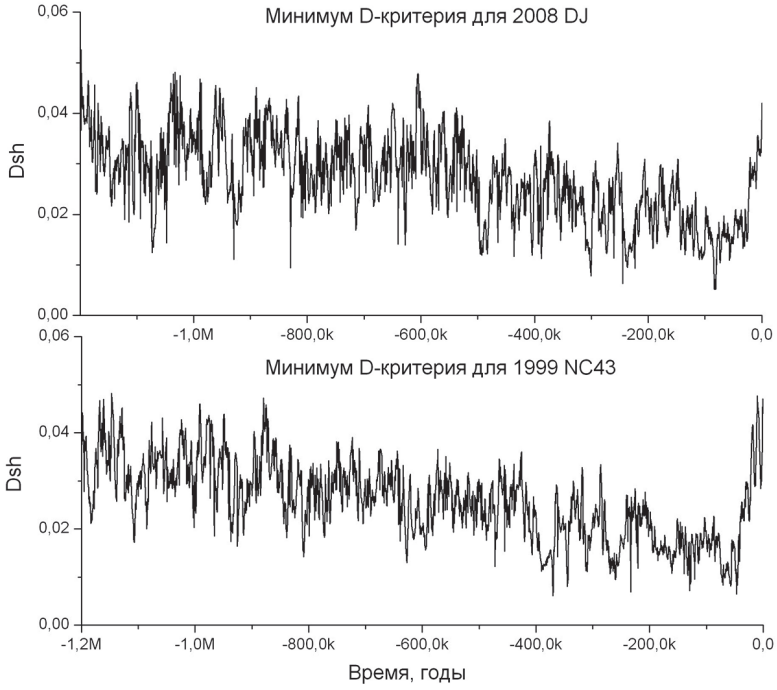


Рис. 5. Изменение минимума D-критерия для клонов астероидов 2008 DJ – Челябинск и 1999 NC43 – Челябинск

Для подтверждения этой теории мы провели исследование долговременной эволюции трех объектов. Для этого мы провели сравнение величины D-критерия между всеми парами клонов астероидов Chelyabinsk – 2008 DJ и Chelyabinsk – 1999 NC43 и исследовали минимальные значения D-критерия всех пар клонов. Для объекта Chelyabinsk количество виртуальных частиц составило – 800, для 1999 NC43 и 2008 DJ – 300, так как орбиты этих объектов известны более точно. Временной интервал сравнения составил 1,2 млн лет.

Мы нашли, что минимум D-критерия для клонов астероидов 2008 DJ и Chelyabinsk достигает 0,005 за ~80 000 лет. Для клонов астероидов 1999 NC43 и Chelyabinsk минимум значения D-критерия 0,006 достигается за время порядка ~47 000 лет. Но это значение времени теоретическое. Затем мы пытались определить момент времени, когда мог произойти распад родительского тела. Мы провели оценку отношения количества орбит клонов, для которых D-критерий был менее 0,04 (или менее 0,02) к общему количеству орбит клонов в каждый момент времени. Результаты оказались близкими к нулю как для случая $D < 0,02$, так и для $D < 0,04$. К сожалению, мы не смогли достоверно определить момент, когда эта ассоциация астероидов могла образоваться.

Заключение

Челябинское событие, несомненно, является уникальным в своем роде. Одна из причин – это большое количество видеоматериала, который был получен очевидцами событий. И благодаря развитию сети Интернет, этот материал стал доступен для анализа и исследования. Для определения доатмосферной орбиты Челябинского болида был использован метод, ранее не применявшийся для таких тел. Результаты наших расчетов не противоречат результатам других авторов. Применяемый нами метод наименьших квадратов позволил определить более точно орбиту объекта и ошибки кеплеровых элементов орбиты Челябинского объекта. Для орбиты Челябинского объекта были выявлены 2 астероида близкие по орбитальным параметрам. Сравнение эволюции астероидов 2008 DJ и 1999 NC43 показывает, что астероид 2008 DJ является более близким по орбитальным параметрам к Челябинскому объекту.

Литература

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 1–16.

Borovička J, Spurný P., Brown P.,Wiegert P., Kalenda P.,Clark D., Shrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503, p. 235–237.

Brown, P.G., Spalding R.E., et al. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature. 2002. V. 420. P. 294–296.

Brown, P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature.2013. V. 503, p. 238–241.

Jenniskens P. et al. CAMS Cameras for all sky meteor surveillance to establish minor meteor showers // Ikarus, 216, p. 40–61

De la Fuente Marcos C., R. de la Fuente Marcos. The Chelyabinsk superbolide: a fragment of asteroid 2011 EO40? // arXiv.org. 2013. – arXiv:1307.7918.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science. 2013. № 342. P. 1069-1073.

Southworth, R.B., Hawkins, G.S. Statistics of meteor streams // Smithsonian Contrib. 1963. Astrophys. 7, 261–285.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ПАДЕНИИ МЕТЕОРОИДА

И.Х. Ковалева, А.Т. Ковалев, О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов, Ю.В. Поклад, Д.В. Егоров

Рассмотрены электромагнитные возмущения различной природы и масштабов, сопровождающие падения метеороидов. Предложен новый механизм генерации электромагнитного сигнала в диапазоне частот от Гц до килогерц при таких падениях. Проанализированы особенности падения Челябинского метеороида. Проведены оценки возмущений параметров ионосферной плазмы и характеристики электромагнитных сигналов, которые могут быть зарегистрированы на Земле. Предложена модель формирования электрофонных шумов в результате резонансного возбуждения циклотронных частот ионов приземной плазмы.

Введение

При оценке возмущений, сопровождающих падения метеороидов, как правило, ориентируются на два различных типа экспериментальных данных, к которым относятся: 1 – оптические и радарные наблюдения, 2 – измерения акустических возмущений и электромагнитных полей. На основе данных 1 и 2-го типов проводится оценка возмущений, различающихся по масштабу на несколько порядков величины, представляющих собой, по сути, локальный и масштабный отклики на данное возмущение. При рассмотрении электромагнитных эффектов, сопровождающих падения метеороидов, традиционно основное внимание уделяется эффектам, которые могут возникнуть вблизи падающего тела или в его следе. Рассматривается локальная область сильного возмущения, регистрируются ее параметры, строятся модели генерации в ней электромагнитных возмущений ОНЧ-КНЧ частотного диапазона [Keay, 1992a; Beech et al., 1995; Price and Blum, 2000; Jenniskens, 1996] и/или электрофонных шумов (сигналов, приходящих к Земле в виде электромагнитного возмущения и возбуждающих у поверхности Земли вторичное звуковое возмущение на частотах электромагнитного шума) [Keay, 1980a,b; Kaznev, 1994; Keay, 1994; Keay and Ceplecha, 1994; Vinkovic´ et al., 2000; Zgrablic´ et al., 2002]. Состояние нижней ионосферы как среды, в которой так же происходит взаимодействие метеороида с веществом, как правило, не анализируется. Наличие или отсутствие регистрации того или иного вида электромагнитного сигнала не связывается с состоянием среды. Работы, посвящённые нелокальным возмущениям ионосферы, сопровождаю-

щим падение метеороида, обычно связаны с возмущением ионосферы акустической волной, приходящей из области основного энерговыделения на траектории метеороида (вызванного разрушением и торможением метеороида и его фрагментов). При этом существующие теории не могут объяснить многие свойства низкочастотных электромагнитных сигналов и электрофонных шумов. В качестве объяснения предлагается взаимодействие геомагнитного поля с турбулентной плазмой, образующейся в головной части метеороида (это объяснение подходит только для метеороидов, долетающих до низких высот) [Bronshten, 1983] или формированием сигнала в процессе взрыва [Keay, 1992b]; разделение зарядов при прохождении ударной волны через ионизованную метеороидом плазму [Beech and Foschini, 1999]. Также предлагалась модель зарядки метеороида в процессе абляции [Bronshten, 1991]. Высказывались предположения о возможном наличии нескольких механизмов формирования электромагнитного сигнала от метеороидов. Это связано в частности с тем, что электромагнитный сигнал приходит раньше времени максимального свечения и, следовательно, источник электромагнитного шума может возникать в ионосфере во время прохождения метеороида (например, [Price and Blum, 2000; Zgrablic´ et al., 2002]). В данной работе сделана попытка проанализировать возможные ионосферные источники электромагнитных шумов и определить их параметры. Анализируется возможность генерации геофизических возмущений на больших, по сравнению с размером метеороида и его следа, ионосферных масштабах. В качестве нового механизма формирования возмущения предлагается фотоионизация области высот ионосферы, содержащей легкоионизуемые молекулы NO. Электромагнитный шум в этом случае возникает в результате возбуждения ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых волн на градиентах концентрации ионов NO^+ [Ковалева 2012, 2013] и магнитозвуковой волны. Электромагнитные возмущения нижней ионосферы рассматриваются как возмущения среды, находящейся вблизи положения локального равновесия при учёте пространственного распределения концентраций ионов, соответствующих данному времени суток. Это распределение определяет направление распространения электромагнитных шумов и, следовательно, области, где возможна их наземная регистрация.

Крупномасштабное ионизационное возмущение, формирующееся в результате фотоионизации

Необходимо отметить, что кроме прямого воздействия на ионосферу пролетающего метеороида, возникает пятно возмущения за счёт его излучения. Эта область возмущения имеет гораздо меньшую амплитуду, но значительно больший масштаб. При своем движении метеороид проходит слой ионосферы, содержащий легкоионизируемую компоненту нейтральной части среды – молекулы NO. Интерес к этой малой составляющей нейтральной ионосферы возрос в последние годы, так как выяснилось, что благодаря низкому порогу фотоионизации эти молекулы играют существенную роль как в процессах ионизации на высотах порядка 100 км, так и в процессах энергообмена [Bailey, Barth 2002; Barth, Bailey 2004; Hedin, Rapp, Khaplanov et al., 2012]. Из-за значительной изменчивости NO (в зависимости от уровня солнечного излучения и ряда других процессов) определить точную концентрацию этого вида молекул в день падения метеорита затруднительно, но можно сказать, что в зимний период в средних широтах эта концентрация достигает максимальных значений. Высотная зависимость концентрации NO (по модели [Bailey, Barth,

2002]) приведена на рис. 1,а. Именно эта зависимость использовалась при оценке возникающего фотоионизационного следа метеороида.

При моделировании фотоионизационного гало вокруг метеороида использовались следующие предположения, полученные на основе наблюдений Челябинского метеороида.

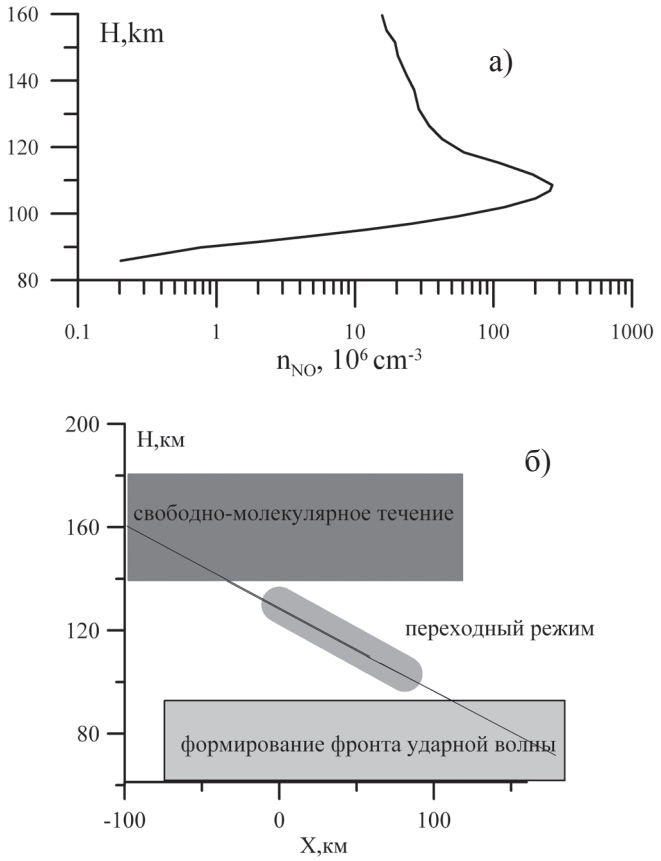


Рис. 1. (а) – высотная зависимость концентрации NO; (б) – схема различных режимов взаимодействия метеороида с атмосферой

Свечение начинается в переходной области от свободномолекулярного течения к непрерывному потоку с формированием ударной волны (как изображено на рис. 1,б). На рис. 1,б эти области отмечены на траектории Челябинского метеорита. В переходной области (высоты 140–100 км) осуществляется нагрев поверхности метеороида и формирование слоя паров (плазмы) вблизи метеороида. Как известно [Bronshten, 1983], поверхность метеороида нагревается до температуры испарения, то есть, примерно, до 1500–2000 К, а слой паров и воздуха перед и вокруг тела нагревается до более высоких температур. В качестве очень грубой оценки взята температура 3000 К. В отличие от свечения в области формирования ударной волны ультрафиолетовое излучение в переходной области поглощается нелокально, сечения взаимодействия гораздо слабей, пробеги фотонов достаточно велики и по-

этому для оценок производимой этим излучением ионизации окружающей ионосферной плазмы использовался метод Монте-Карло. При моделировании траекторий отдельных фотонов учитывалось релеевское рассеяние (в несколько упрощённом виде) и неупругие процессы фотоионизации на компонентах среды с учётом изменения с высотой состава нейтральных компонент ионосферной плазмы и зависимостей сечений от длины волны. Высотная зависимость мощности, излучаемого метеороидом света, оценивалась на основе высотной зависимости свечения в видимом диапазоне длин волн, приведенном на рис. 2,а [Popova et al., 2013]. Пороговое значение рассматриваемых длин волн ультрафиолетового излучения и его место на спектре абсолютно черного тела для двух температур приведено на рис. 2,б. Мощность, излучаемая в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, оценивалась на основе этого спектра.

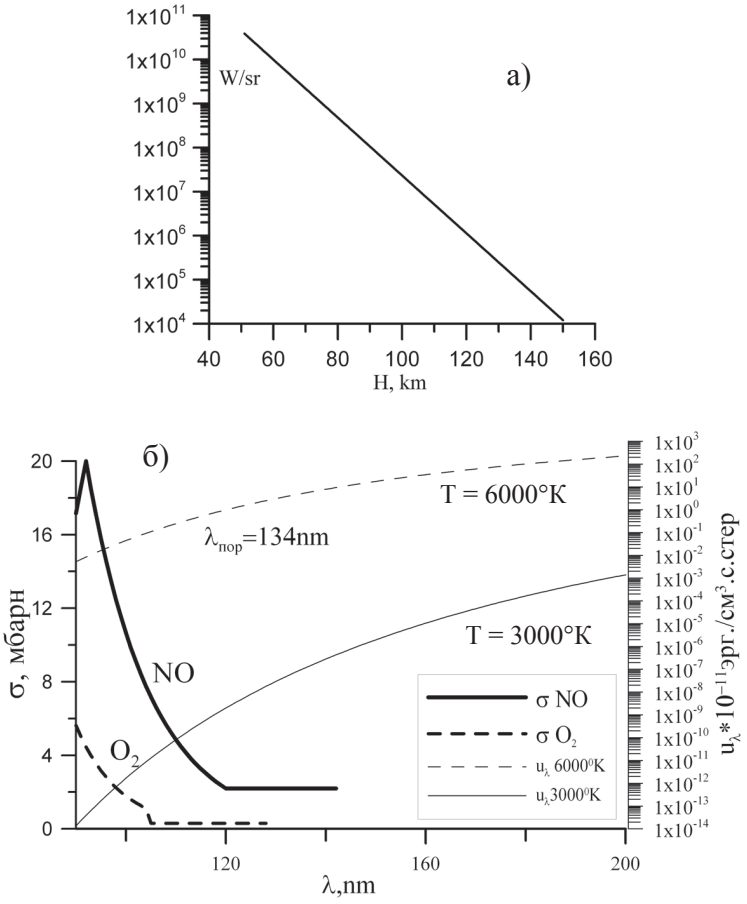


Рис. 2. (а) – зависимость мощности излучения в видимом диапазоне длин волн от высоты при падении Челябинского метеороида; (б) – сечения фотоионизации NO и O_2; модельный спектр излучения для двух температур

В результате моделирования получено следующее распределение дополнительной ионизации в ионосфере на начальной стадии полета (до формирования ударной

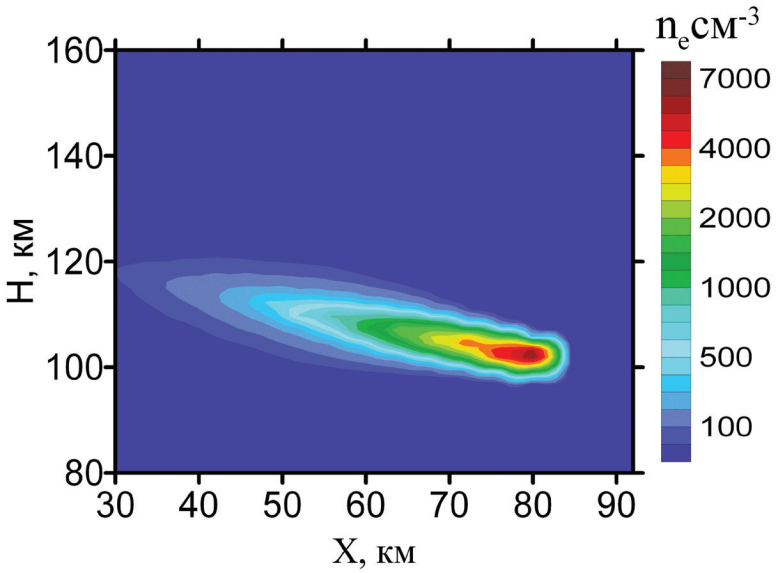


Рис. 3. Распределение уровней ионизации (см$^{-3}$) в вертикальной плоскости, содержащей траекторию метеороида

волны). На рис. 3 приведено распределение уровней ионизации в см$^{-3}$ в вертикальной плоскости, содержащей траекторию метеороида. Ноль по горизонтали соответствует точке прохождения высоты 130 км.

Из рисунка видно, что метеороид создает за несколько секунд ионизованную область (дополнительную ионизацию) на высотах 100–120 км (на масштабе ~40 км). Безусловно, полученная в процессе моделирования оценка уровней ионизации, пространственной формы возмущения является качественной. Слишком много параметров моделирования имеют оценочные значения (форма спектра, мощность излучения и т.д.). Вместе с тем моделирование демонстрирует наличие процесса образования ионизационного пятна в области вхождения метеороида в плотные слои ионосферы (высоты ~100 км) до формирования ударной волны и взрывного разрушения. Рассмотрим, как это возмущение может возбудить, в частности, дрейфовые волновые структуры. Возмущение ионосферы накладывается на те градиенты концентраций ионов, которые присутствуют в ионосфере в естественных условиях. Для примера на рис. 4 приведено изменение концентрации ионов NO^+ на высоте 105 км в долготном направлении (ось направлена на

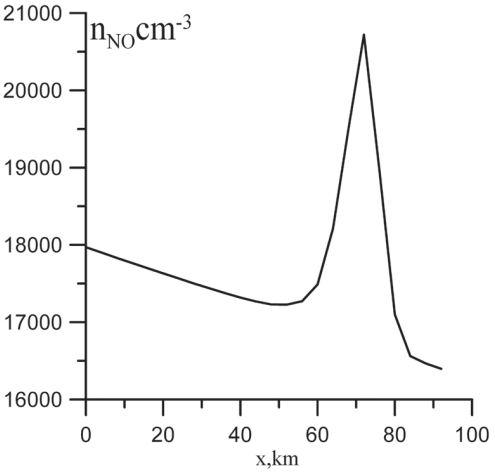


Рис. 4. Изменение уровня ионизации в направлении восток-запад на высоте 110 км

запад) при падении Челябинского метеороида. Общее направление градиента плотности ионов связано с изменением концентрации ионов в утренние часы. Хорошо видно, что в области входа метеороида сформировался резкий пик концентрации NO^+ с наибольшим градиентом в западном направлении.

Нелокальные электромагнитные возмущения

Кроме локального энерговыделения в следе метеороида существует целый ряд каналов передачи энергии метеороида в окружающую среду. Эти вторичные возмущения могут иметь гораздо большие масштабы и также могут быть источниками электромагнитных возмущений различной природы.

Рассмотрение формирующегося при торможении и разрушении метеороида акустического возмущения и сопровождающих его движение возмущений электронной концентрации на высоте *F* слоя выходит за рамки настоящей работы. Отметим только, что при рассмотрении движения нелинейной ионосферной АГВ/ВГВ волны необходимо учитывать и модификацию диффузионных свойств среды, описанную выше, и те движения ионизованных компонент плазмы, которые присутствуют в ионосфере и оказывают влияние на движение акустической волны, определяя предпочтительное направление ее распространения. Акустическое возмущение может конвертироваться в ионно-звуковую моду, что происходит на высотах 150–200 км. Время, за которое акустическое возмущение от точки основного энерговыделения достигает этих высот, составляет $5 \cdot 10^2$ с. Все эффекты возникают после разрушения метеороида в плотных слоях атмосферы.

Рассмотрим эффекты, возникающие до основного энерговыделения. В результате очень быстрого формирования области повышенной ионизации, рассмотренной в предыдущем разделе, возможно формирование быстрой магнитозвуковой волны. На рис. 5 показан результат расчета магнитозвукового импульса, сгенерированного появлением ионизованного следа с параметрами, близкими к рис. 3: максимальное увеличение ионизации равно 15%, длина следа – 60 км, диаметр – 20 км. На

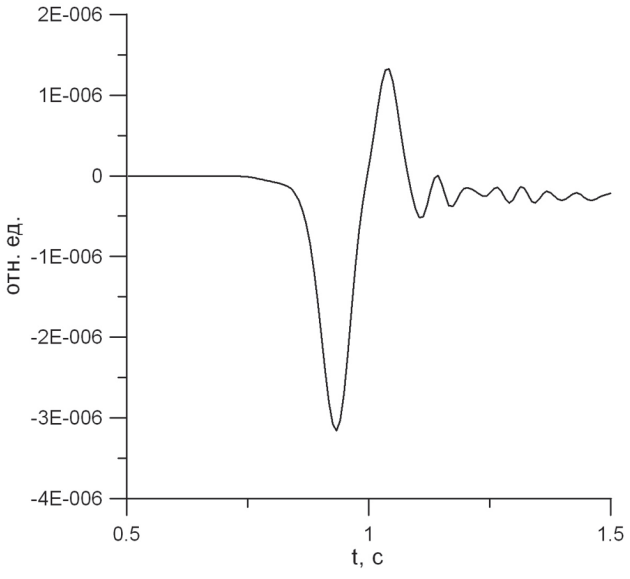


Рис. 5. Волновая форма импульса быстрой магнитозвуковой волны, формируемой ионосферной областью повышенной ионизации

рисунке показано электрическое поле волны (в относительных единицах) на расстоянии 200 км к западу от центра следа, направление магнитного поля – вертикально вниз. Характерная частота импульса порядка 1 герца. При учёте таких дополнительных факторов, как наличие электрического поля в ионосфере, наклона относительно вертикали магнитного поля, влияния проводящей поверхности Земли, форма импульса несколько изменится. Данный расчёт представляет собой качественную оценку.

Формирование нелинейных градиентно-дрейфовых ионно-циклотронных волновых структур

Кроме магнитозвукового сигнала на градиенте концентрации ионов NO^+, приведенном на рис. 4 будут возбуждаться диссипативные градиентно-дрейфовые ионно-циклотронные нелинейные волны, перенося плазму в западном направлении, осуществляя релаксацию возмущения [Kovaleva, 2012; Kovaleva, 2013]. При увеличении градиента плотности какого-либо вида ионов поперек магнитного поля возбуждаются волновые структуры, переносящие ионы против градиента. Частоты волновых структур отвечают дисперсионному соотношению ионно-циклотронных волн.

Дисперсионное соотношение для плазмы, содержащей два вида ионов, предполагает два решения:

$$\eta(\omega^2 - \alpha^2)(\omega^2 - \alpha_P^2)(k^2 + 1) = (1 - \delta_P)(\omega^2 - \alpha_P^2) + \delta_P \frac{M_1}{M_2}(\omega^2 - \alpha^2).$$

Здесь $\eta = 1 - \delta_P + \delta_P M_1/M_2$ (в плазме с концентрацией n_0 содержится $(1 - \delta_P)$ ионов с массой M_1 и δ_P ионов примеси с массой M_2), $\alpha = eB_0/cM_1$, $\alpha_P = eB_0/cM_2$. В выражении: ω, k – используются в безразмерном виде (соответственно ω, деленная на ионную плазменную частоту и k, умноженное на дебаевский радиус). Поэтому в возбуждаемом на градиенте плотности спектре будет два максимума, один из которых располагается в диапазоне частот ~30–50 Гц. Амплитуды солитонов и затронутый возбуждением диапазон частот определяются превышением градиента плотности над пороговым уровнем.

При этом амплитуды возбуждаемых солитонов имеют частотную зависимость, подобную представленной на рис. 6,а. При увеличении градиента растут захватываемый возбуждением диапазон частот и амплитуды солитонов.

При изменении по мере движения солитона параметров среды, параметры устойчивых солитонов постепенно изменяются, поэтому солитон подстраивается к этим изменениям, меняя свою амплитуду и частоту через излучение линейной волны. На границе плазмы возможен полный распад солитона. Оценим то линейное возмущение, которое при этих процессах формируется. Подробное решение, соответствующее перестройке солитона (решения уравнения Шредингера) при потере устойчивости, было получено в работах [Кузнецов, Михайлов, 1994; Kuznetsov, Mikhailov, Shimokhin, 1995]. На рис. 6,б приведена временная зависимость амплитуды такого импульса. Частота примерно соответствует частоте колебаний солитона. При этом необходимо отметить, что в отличие от солитона линейный волновой пакет расплывается при удалении от точки рождения. Поэтому сказать какими будут временные параметры импульса возбуждения, (приходящего в тропосферу в виде электромагнитного сигнала) на высотах тропосферы сложно. Примем, что

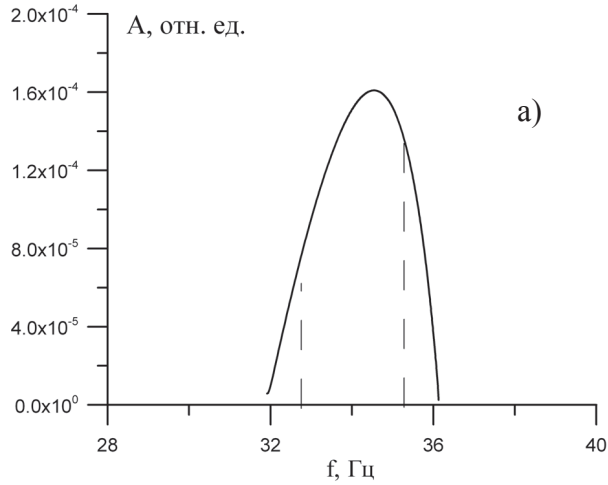
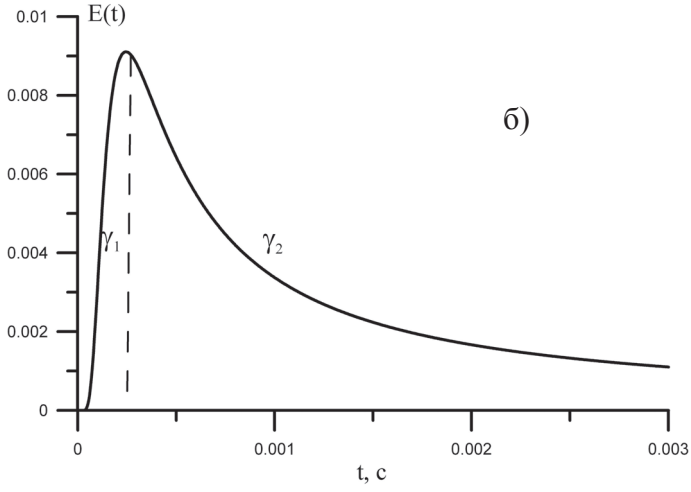


Рис. 6. (а) – зависимость амплитуд солитонов от частоты при некотором превышении порогового градиента; (б) – форма волнового импульса, испускаемого солитоном в процессе перестройки



импульс можно представить двумя характеризующими его экспонентами γ_1 (роста) и γ_2 (спада) $\gamma_1 >> \gamma_2$. Частотное распределение таких импульсных волновых пакетов, зависимость их амплитуд от частоты в этом случае должны воспроизводить частотную зависимость амплитуд солитонов, представленную на рис. 6,а. Пунктирами на этом графике схематично представлены несколько пиков, на которых могут возбуждаться резонансы. Соотношение их амплитуд будет отражать частотную зависимость амплитуд солитонов.

Тропосферный отклик на приходящие электромагнитные шумы

Ионно-циклотронный резонанс, возбуждаемый при движении заряда в среде с сильной диссипацией в постоянном магнитном и переменных низкочастотных полях рассматривается на протяжении нескольких десятилетий в связи с процессами в биологических средах, демонстрирующих циклотронные резонансы [Durney

et al., 1988; Lednev, 1991; Edmonds, 1992; Thompson et al., 1995; Vincze et al., 2008]. Рассматриваются линейные и нелинейные резонансы.

Для качественного рассмотрения достаточно использовать простейшую так называемую модель Лоренца. В этом случае рассматривается движение заряда в скрещенных полях, постоянном магнитном $B_0 = (0, 0, B_0)$ и волновом электрическом $\widetilde{E} = (E_x, 0, 0)$ при интенсивных соударениях ν.

Система уравнений содержит диссипативный член и силу Лоренца

$$m_i n_i \frac{dV_X}{dt} + \nu n_i V_X = e n_i (E_x + V_Y B_0)$$

$$m_i n_i \frac{dV_Y}{dt} + \nu n_i V_Y = -e n_i V_X B_0$$

Если нормировать время на циклотронную частоту $\omega_{Ci} = eB_0/m_i$ (разделив уравнения на eB_0), разделить оба уравнения на n_i, то система уравнений запишется в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{dV_X}{dt} - V_Y + \beta V_X = E_0 \exp(\gamma t - it) \\ \dfrac{dV_Y}{dt} + V_X + \beta V_Y = 0, \end{cases}$$

где β – безразмерная частота соударений; $E_0 = E_X/B_0$.

Система преобразуется в колебательное уравнение:

$$\frac{d^2 V_Y}{dt^2} + 2\beta \frac{dV_Y}{dt} + (1 + \beta^2) V_Y = -E_0 \exp(\gamma t - it)$$

Решение в случае $\beta >> \gamma$ можно представить в виде:

$$V_Y \approx -\frac{E_0}{\beta^2} e^{\gamma t - it}; \quad V_X \approx \frac{E_0}{\beta} e^{\gamma t - it}$$

Или в размерном виде для импульса электромагнитного излучения, рассмотренного выше

$$V_X \approx \frac{E_X \omega_{Ci}}{B_0 \nu} \exp(\gamma_1 \omega_{Ci} t - i\omega_{Ci} t) \text{ для } 0 < t < t_1$$

и

$$V_X \approx \frac{E_X \omega_{Ci}}{B_0 \nu} [\text{const} - \exp(-\gamma_2 \omega_{Ci} t)] \exp(-i\omega_{Ci} t) \text{ для } t > t_1.$$

Движение ионов оказывает влияние на движение нейтрального воздуха через диссипативный тензор $\overline{G} = \begin{bmatrix} \lambda_{XX} & \lambda_{XY} \\ \lambda_{YX} & \lambda_{YY} \end{bmatrix}$ (ion drag), члены которого $\lambda_{XY} = \lambda_{YX} \sim \alpha_i \left(\dfrac{\nu_i}{\omega_i} \right) \sim n_i$ концентрации ионов так как $\alpha_i = \dfrac{5 \cdot 10^{-10} n_i}{1 + (\nu_i/\omega_i)^2}$ [Brasseur, Solomon, 2005]. В уравнения движения для нейтрального воздуха член входит в виде произведения $\overline{G}V$, то есть, пропорционален скорости ионов относительно нейтральной составляющей. Таким образом, при достаточном уровне ионизации и наличии электромагнитного шума на резонансных циклотронных частотах можно ожидать появление на этих же частотах звукового шума – электрофонного эффекта. Так как скорости ионов при резонансном ускорении пропорциональны циклотронной частоте, то особенно интенсивным этот эффект будет на циклотронных частотах легких ионов приземной

плазмы, ионно-циклотронные частоты которых больше. Кроме основного резонанса возможно возбуждение гармоник циклотронных частот тропосферных ионов $n \cdot \omega_{Ci}$.

Для рассмотрения реакции ионов на приходящий из ионосферы электромагнитный шум применительно к средней и нижней атмосфере необходимо рассмотреть ионный состав среды.

Состав тропосферных ионов в спокойных и возмущённых условиях

Состав торпосферных ионов очень изменчив, зависит от времени суток, сезона, погодных условий и места, где проводятся измерения (в городских или сельских условиях). В качестве первичных в результате различных процессов образуются легкие ионы N_2^+, N^+, O_2^+, O^+, NO^+, H^+ и так далее и электроны, которые за время порядка 10^{-5} вступают в ряд химических реакций (электроны прилипают к молекулам, образуя отрицательные ионы). Далее легкие ионы NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, и так далее вступают в дальнейшие химические реакции, образуя за время $\sim 10^{-3}$ с кластерные ионы типа $O_2^-(H_2O)_n$, $H^+((CH_3)_2CO)_x(H_2O)_y$, $NO_3^-HNO_3$, $C_3H_3O_4^-HNO_3$, $H^+B_b(H_2SO_4)_x(H_2O)_y$, где B в большинстве случаев группа атомов, соответствующая ацетону и т.д. Подробный обзор экспериментальных данных по тропосферным ионам и расхождениям в измерениях различных авторов дан в работе [Hirsikko et al., 2011]. Тяжёлые ионы живут в атмосфере десятки минут и более. Эти ионы становятся зародышами аэрозольных частиц. В целом в плазмохимической кинетике участвует несколько сотен различных химических соединений. Огромную роль играют примесные ионы, в том числе, возникающие в результате промышленных выбросов NO, NO_2, N_2O, соединений углерода, серы, выхлопных газов. Типичные концентрации ионов 200–2500 см$^{-3}$. В настоящее время существуют модели расчета стационарных распределений концентраций или динамических изменений (обычно на интервалах времени доли секунд). Поэтому значительное внимание исследователей уделено экспериментальным регистрациям ионного состава атмосферы, имеющего значительные вариации. Для того, чтобы продемонстрировать некоторое распределение атмосферных ионов по массам, на рис. 7,а приведён пример измерений масс положительных ионов воздуха масс-спектрометром [Junninen, et al., 2010]. Хорошо видно разделение на группу легких и тяжелых ионов.

Из рис. 7,а видно, что наибольшие концентрации отдельных положительных ионов можно зафиксировать для двух групп масс: с самых легких – до 150 а.е. и 250–400 а.е. Легкие ионы с массами менее 50 этим прибором не регистрировались. В качестве основных отрицательных легких ионов можно выделить NO_3 (62) и HSO_4 (97). По другим источникам [например, Lee et al., 2008] в качестве основных легких ионов, регистрируемых в сельской местности, называют NO_3^-, $NH_4^+SO_4^{2-}$. По данным работы [Eisele et al., 1989] к наиболее распространенным легким ионам можно отнести $C_5H_5NH^+$, $(CH_3)_3NH^+$, $C_3H_3NOH^+$ с массами 60, 70 и 130 а.е. Соответственно циклотронные частоты легких ионов находятся в диапазоне 8÷45 Гц. Циклотронные частоты, соответствующие более тяжелым положительным ионам с массой 320, 330 а.е., лежат в диапазоне 2–3 Гц. Следовательно, в этих двух частотных диапазонах можно искать основные циклотронные резонансы. В случае, если диапазон возбуждающих электромагнитных шумов лежит на других частотах, могут возбуждаться гармоники основных резонансов этих ионов.

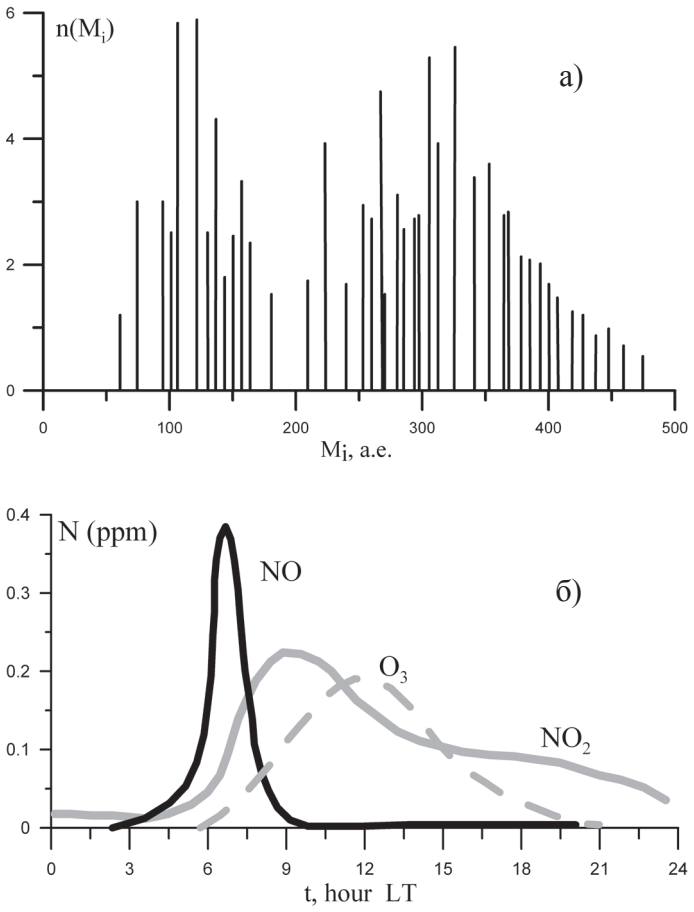


Рис. 7. (а) – пример измерения распределения положительных ионов по массе в тропосфере; (б) – изменение в течении дня концентраций примесных ионов в городской приземной атмосфере (ppm-доля 10^{-6} от основных компонент воздуха)

В возмущенных условиях при резком увеличении уровня ионизации состав приземной плазмы будет отличаться от стационарного в сторону преобладания легких ионов. При этом надо иметь в виду, что даже динамические плазмохимические атмосферные модели неприменимы в случае фотоионизации воздуха при падении метеороида. Это связано с тем, что в обычные модели заложен стандартный спектр солнечного излучения с учетом поглощений в ионосфере и стратосфере, что не реализуется при прохождении метеороида до более плотных слоев. В этом случае на воздушную среду тропосферы воздействует нехарактерное для обычных условий жесткое ультрафиолетовое излучение, постоянно меняющее свои характеристики. Поэтому получить точное распределение легких ионов не представляется возможным, но можно сделать некоторые качественные оценки. В случае быстрого возникновения УФ источника целый ряд легко фотоионизуемых нейтральных атмосферных примесей формирует (очень быстро, за время ~ секунды) достаточно большую область атмосферы с повышенной ионизацией. Состав ионов будет зависеть от того, в городских или сельских условиях произ-

водится возмущение среды и от времени суток (см., например, [Bradshaw et al., 2000]). На рис. 7,б приведён качественный суточный ход концентраций примесных газов в городе при наличии промышленного загрязнения (в зависимости от местного времени). Максимумы концентраций NO, NO_2 приходятся на утренние часы (время падения Челябинского метеороида). В Челябинске, как и во всех промышленных городах уральского региона, примесные газы значительно превышают средний уровень [Панкратова и др., 2011]. За средний уровень можно принять концентрации, приведённые в табл. 1. К легкоионизуемым примесным газам города относятся прежде всего, NO, NO_2, в сельской местности – NH_3. В той же таблице приведены пороговые длины волн (нм) для ионизации основных и некоторых примесных газов.

Таблица 1

N_2	O_2	NO	NO_2	NH_3
$2.1 \cdot 10^{19}$	$5.6 \cdot 10^{18}$	$1.6 \cdot 10^{9}$	$2.2 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{11}$
79.57	102.67	134.03	127.03	122

Спектры излучения крупных метеорных тел являются в основном линейчатыми с присутствием некоторого континуума [Голубь и др., 1997; Borovichka et al., 1998]. Очень грубо эффективную температуру излучения на последней стадии полета можно оценить как 4000–6000°К. Эта неопределенность в оценке температуры оказывает определяющее влияние на возможность точной оценки уровня фотоионизации в приземных слоях атмосферы, образуемой свечением этого тела. Как показано на рис. 2,б при двух возможных температурах 3000 и 6000°К уровень излучения вблизи порога фотоионизации основных компонент воздуха O_2 и N_2 различается примерно на 10 порядков. Поэтому сказать какой вклад внесет ионизация основных компонент воздушной смеси трудно. Но в любом случае фотоионизация примесных газов внесет свой вклад в образование ионов приземной плазмы.

Итак, на основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что у поверхности Земли можно ожидать регистрацию резонансных флуктуаций электрического и магнитного полей на циклотронных частотах приземных ионов в двух диапазонах частот: около 2–3 Гц и в области 8–70 Гц или на гармониках этих частот. Состав примесных ионов в городе и за его пределами различен, следовательно, несколько различным будет частотное распределение резонансных пиков в различных местах регистрации одного события. При этом, сигналы будут иметь вид, характерный для техногенных шумов (то есть спектр излучения будет иметь вид частотных пиков на конкретных частотах. Такой вид спектра сохраняется продолжительное время, так как флуктуации геомагнитного поля, регистрируемые у поверхности Земли, находятся в диапазоне $10^{-4} \div 10^{-5}$ от значений постоянного магнитного поля. Сами сигналы (при более детальном анализе волновых форм) будут иметь вид коротких всплесков. Срыв регистрации излучения или изменение его мощности будут коррелировать с теми ионосферными крупномасштабными флуктуациями геомагнитного и электрического полей, которые или приводят к резким изменениям условий генерации или формируют области интенсивной турбулентности (что приводит к быстрому затуханию ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых солитонов – источника электромагнитного шума, возбуждающего резонанс).

Экспериментальные данные по сигналам на циклотронных частотах в спокойных условиях

То, что такое электромагнитное излучение существует, подтверждают экспериментальные данные ГФО ИДГ РАН «Михнево». На рис. 8 приведено временное распределение низкочастотных флуктуаций магнитного поля в течение часа с 3 до 4 часов UT 15.02.2013 г. На рис. 8,а – частотное распределение флуктуаций магнитного поля в B_z компоненте. Шумановские резонансы можно регистрировать в районе 20 и 30 Гц (шумы резонатора Земля – ионосфера вблизи частот 7,8; 14,1; 20,3; 26,4; 32,4 Гц и т.д.) с постоянно меняющейся частотой, техногенные импульсы (строго определённой длительности и с определёнными интервалами между ними) и циклотронная линия (помеченная стрелкой) с постоянно меняющейся мощностью, и скачками меняющейся частотой. Это связано с тем, что при сдвигах частот шумов, возбуждающих резонансы, резонанс соответствует то одному, то другому иону из смеси тропосферных ионов. В течение дня максимум данной линии постепенно сдвигается с 38,86 до 40,01 Гц и обратно, постоянно реагируя кратковременными сдвигами частоты на различные флуктуации.

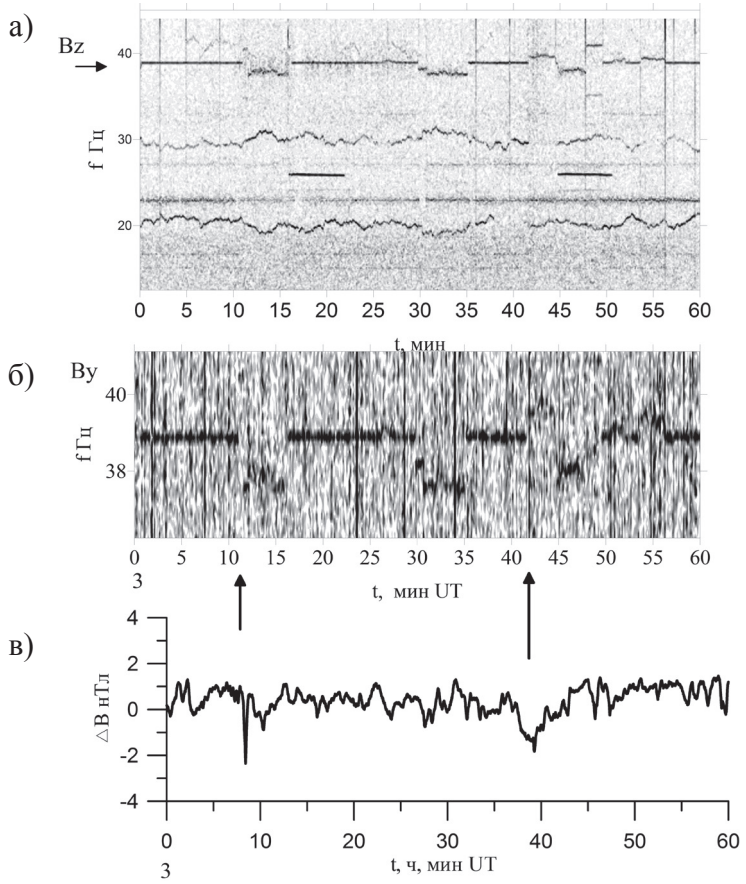


Рис. 8. (а) – пример регистрации низкочастотных электромагнитных шумов; (б) – частотное распределение шумов в компонентах B_Z, B_Y магнитного поля; (в) – временная зависимость флуктуаций квазипостоянного магнитного поля

На рис. 8,б в более крупном масштабе выделенная циклотронная линия в B_Y компоненте и флуктуации квазипостоянного магнитного поля.

Стрелками показаны времена резких сдвигов резонансных частот. Они коррелируют с резкими флуктуациями квазипостоянного геомагнитного поля, представленного на рис. 8,в (с запаздыванием в несколько минут). Это связано с тем, что на частотный диапазон, возбуждающих резонансы шумов, влияют флуктуации магнитного и электрического полей в ионосферной области возбуждения шумов. Распространяясь на большие расстояния от области рождения под большими углами к геомагнитному полю, шумы приходят на тропосферные высоты со сдвигом в широтном и долготном направлениях.

Из рисунка можно сделать вывод, что примерно через 20 мин после падения Челябинского метеороида (временной интервал 40–50 мин) на спектральной линии отразилось волновое возмущение с периодом в несколько минут в виде кратковременных подъемов и опусканий частоты.

Линии, аналогичные рассмотренной циклотронной, присутствуют в низкочастотных записях для электрического поля. Так как в наличии имеются только флуктуации электрического поля в диапазоне до 10 Гц, то они регистрируют только циклотронные частоты тяжелых ионов. При превышении некоторого уровня шума частотные пики в электрическом поле коррелируют с частотными пиками в акустических шумах.

В настоящее время в качестве источника шумов этого частотного диапазона, как правило, рассматривают грозовую активность в удаленных районах Земли, хотя результаты отдельных исследований указывают на зависимость мощности шумов от локального прохождения над областью измерений атмосферных фронтов (в отсутствии гроз) [Молодых и др., 2012]. Эту зависимость легко объяснить увеличением в этом случае локальной концентрации тропосферных ионов.

В спектре звуковых шумов во время падения Челябинского метеороида регистрировались аналогичные частотные пики.

Экспериментальные данные по Челябинскому метеороиду

На основе проделанного в предыдущих разделах предварительного рассмотрения обсудим имеющиеся экспериментальные данные по Челябинскому метеороиду. В работе [Berngardt et al., 2013] по результатам радарного наблюдения Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН было зафиксировано крупномасштабное ионизационное пятно к западу от области основного энерговыделения. Авторы предположили формирование обширной области повышенной плотности ионизации в области F, необычное увеличение скорости движения неоднородностей в E слое в течение времени порядка минуты. Это говорит о справедливости гипотезы об образовании обширного ионизационного пятна на ионосферных высотах. Вблизи места падения метеороида фиксировалось значительное увеличение светового потока, многие очевидцы отмечают ощущение тепла. Вблизи траектории некоторые очевидцы получили ожоги, похожие на солнечные, что говорит о присутствии УФ излучения достаточной мощности [Popova et al., 2013]. Фиксировался запах (как после грозы), что говорит об увеличении ионизации в приземном слое. Эти факторы указывают на справедливость предположений о формировании возмущенной области приземной плазмы с увеличенным уровнем ионизации.

Челябинский болид был электрофонным, о чем свидетельствуют показания очевидцев [Popova et al., 2013]. Среди 1674 человек, заполнивших интернет анкету, 198 сообщили, что слышали звук одновременно с болидом, до прихода ударной волны [Popova et al., 2013; Kartashova et al., 2014]. Большинство очевидцев характеризуют звук как свист, шипение, треск, похожий на бенгальские огни, шуршание. Три заслуживающих доверия очевидца (инженер, физик по образованию и водитель) описывают звук как шипение масла на сковороде (Челябинск), гудение трансформатора и рев двух истребителей (Еманжелинск). Ни один из этих очевидцев не носит очки, им казалось, что звук доносится со стороны болида. Часть свидетелей указывали на то, что слышали свист. Подробное территориальное распределение фиксаций шумов приведено в работе [Карташова и др., 2014] настоящего сборника. На основе этих данных можно сказать, что свидетели слышали низкочастотный шум в диапазоне ~30 Гц и выше. В этом же диапазоне частот регистрировались шумы при наблюдении метеоров потока Леониды [Zgrablic et al., 2002]. Для звуков, сопровождающих горение бенгальских огней характерны спектры в диапазоне частот от единиц до ~100 Гц.

Многочисленные видеорегистрации челябинского метеороида сопровождались записями звукового фона. В нашем распоряжении имеются записи автомобильных видеорегистраторов при падении Челябинского метеороида, собранные в базу данных. К сожалению, на большинстве записей присутствуют посторонние шумы (включенное радио, разговоры, вентилятор и т.д.). Поэтому реальный звуковой сигнал был зарегистрирован только регистрирующими устройствами немногих стоящих автомобилей. Те множественные трески, шуршания и свисты, которые слышали многие корреспонденты, были зафиксированы без значительных помех только в одном случае (Волков, Челябинск рис. 9,а). На рисунке приведены временные зависимости мощности регистрируемых звуковых шумов в частотных диапазонах 40–300 Гц (это основной диапазон электрофонных шумов), ниже 40 и выше 300 Гц (до 4000 Гц). Полутоновыми линиями отмечены время основной вспышки и время прихода ударной волны. Остальные записи в автомобилях производились при включенных печках и вентиляторах и поэтому низкочастотная часть шума «потонула» в помехах, образуемых шумом вентилятора, шум которого имеет максимум на частоте 30 Гц (см., например, рис. 9,а (Иванов – Первомайский), рис. 9,в (Манинин – Тургоякское шоссе, пригород Миасса)).

Расположение точек регистрации, используемых в дальнейшем анализе, приведено на рис. 6,в работы [Карташова и др., 2014]. Фактически мы имеем одну запись почти под траекторией, недалеко от основной вспышки, одну запись на расстоянии 40 км к северу – в Челябинске и одну – на расстоянии 80 км к западу.

На основе этих данных можно сказать, что электрофонный эффект представляет собой два явления. Одно из них – это сопровождающее падение метеороида низкочастотное шипение, треск, гул, иногда свист, которые, по мнению очевидцев, кончаются после распада метеороида. По данным записи рис. 9,а уровень шумов спадает до уровня меньшего уровня помех примерно за 10 с до вспышки (к значению времени 270 с), когда уровень шумов в диапазоне 40–300 Гц спадает примерно вдвое. Это соответствует высоте 75–84 км. Вторым явлением являются шумы в виде щелчка, одиночного импульса синхронного со вспышкой. На регистрацию данного вида сигнала (особенно вблизи траектории) оказывают влияние и собственные частоты автомобиля, и многократные отражения этого сигнала от зданий и сооружений. Рассмотрим подробнее первый вид шумов.

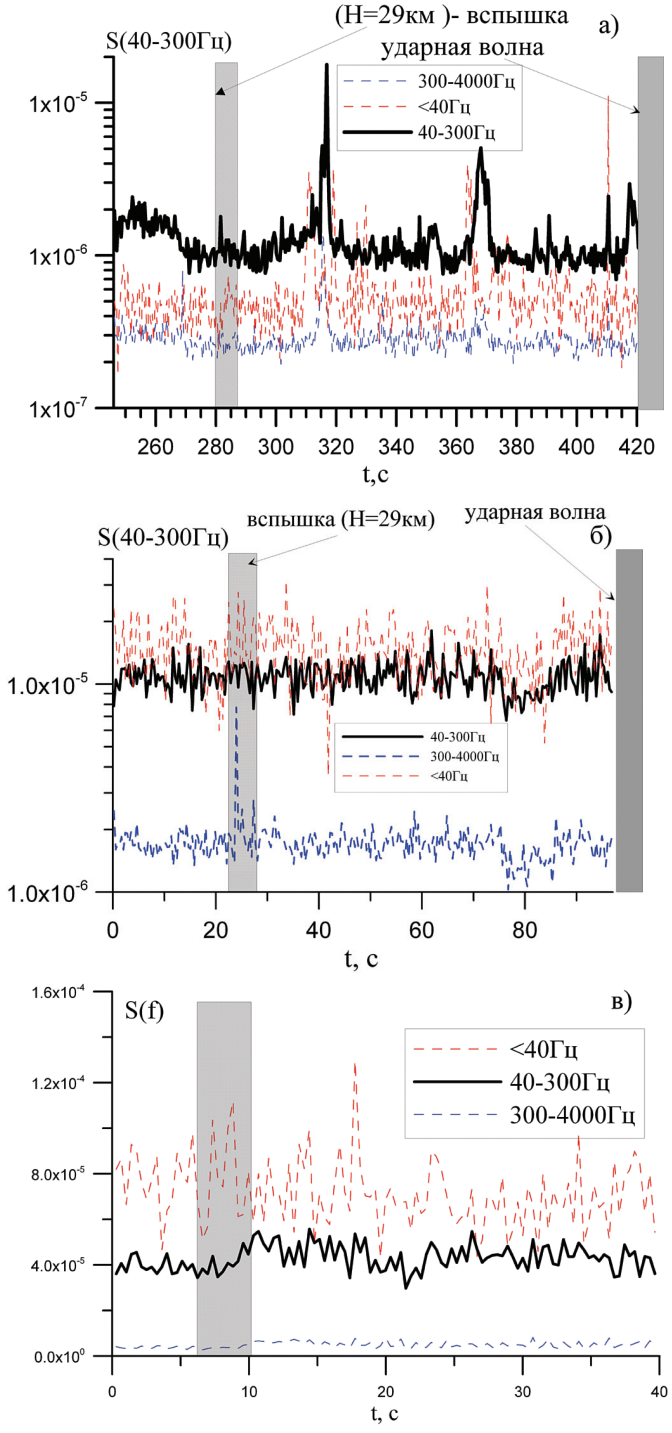


Рис. 9. (а) – соотношение мощностей шумов в различных частотных диапазонах, регистрировавшихся в Челябинске (запись Волкова); (б) – соотношение мощностей шумов, регистрировавшихся в Первомайском (запись Иванова); (в) – соотношение мощностей шумов, регистрировавшихся на Тургоякском шоссе (запись Манинина)

Общее распределение сигналов различных частот во времени (сван диаграмма) представлено на рис. 10: а – для Челябинска (Волков), б – для Тургоякского шоссе (Манинин). Сравнение этих рисунков хорошо иллюстрирует различия в характере распределения шумовых всплесков. В близкой к области основного энерговыделения точке это распределение напоминает хаотично распределенные по частоте короткие всплески. В дальней области запись имеет вид скорее прерывающихся линий на конкретных частотах.

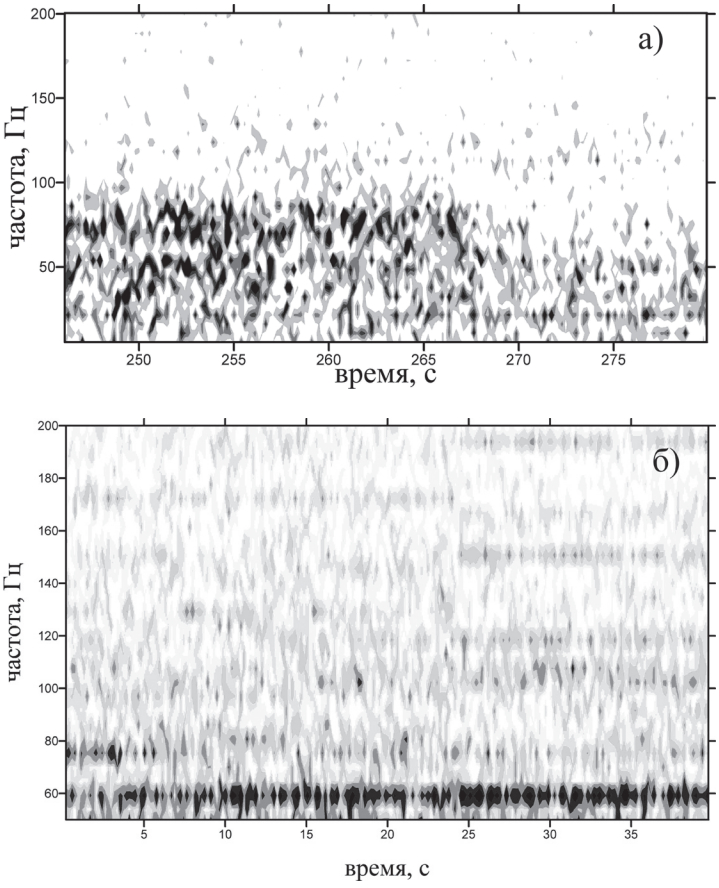


Рис. 10. (а) – зависимость спектрального распределения шумов от времени (Челябинск); (б) – зависимость спектрального распределения шумов от времени (Тургоякское шоссе)

Проведем более детальный анализ спектров данных шумов. Спектры для нескольких временных интервалов приведены на рис. 11,а,б,в. Для каждой записи приведены несколько спектров с интервалом времени ~20 с в те моменты времени, когда отсутствовали явные антропогенные помехи. Общей чертой всех этих спектров является наличие пиков на циклотронных частотах различных ионов. При этом различие в ионных линиях характерно для различий в концентрациях тропосферных примесных газов в черте города и за городом. Так, в Челябинске основными линиями являются линии оксидов азота NO, NO_2, а также кислород и углерод. За пределами города возникают ионизованные молекулы воды (возможно,

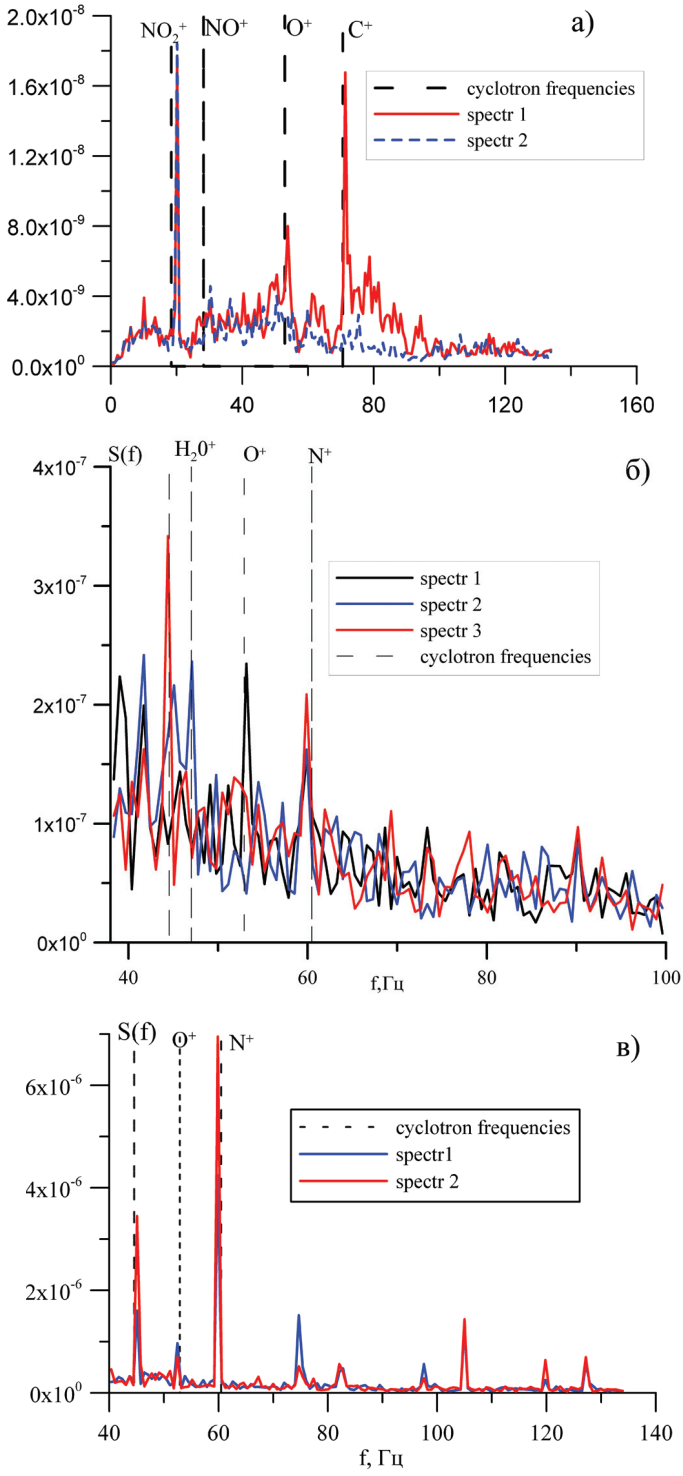


Рис. 11. (а) – спектр акустических шумов в Челябинске (Волков); (б) – спектр акустических шумов в Первомайском (Иванов); (в) – спектр акустических шумов на Тургоякском шоссе (Манинин)

это вторичные ионы, образовавшиеся в результате соединения продуктов диссоциативной ионизации NH_3, так как сечение ионизации воды имеет гораздо больший энергетический порог). По динамике пиков с течением времени видно, что в Челябинске постепенно исчезают легкие компоненты с более высокими циклотронными частотами. В Первомайском на третьем (последнем по времени) спектре самым выраженным становится пик, соответствующий циклотронной частоте ионов примерно той же массы (~44–45 Гц), (в ГФО «Михнево» ~39–40 Гц) что регистрировался в ГФО «Михнево» в спокойных условиях, с учетом разницы в геомагнитном поле в этих двух точках. В удаленном на 80 км к западу от Челябинска пункте (Тургоякское шоссе) второй спектр демонстрирует даже более выраженные большие частоты, чем первый. Это, возможно, является проявлением того, что пятно повышенной ионизации дрейфует на запад. В наиболее приближенной к траектории точке (Первомайский рис. 11,а, рис. 11,б) спектры наиболее размыты.

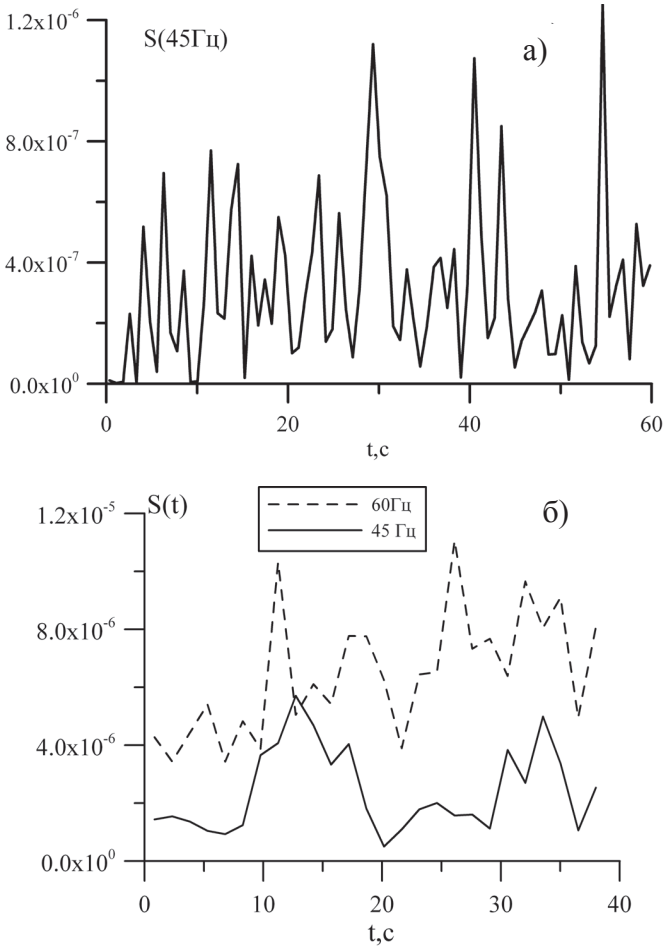


Рис. 12. (а) – временная зависимость интенсивности акустического шума в линии 45 Гц, регистрируемого под траекторией Челябинского метеороида (Первомайский); (б) – временная зависимость интенсивности шума в линиях 45 и 60 Гц, регистрируемого на Тургоякском шоссе (80 км от Челябинского метеороида)

Если рассмотреть временную зависимость мощности акустического шума на отдельной частотной линии (45 Гц) для этого пункта, то явно видны колебания мощности с частотой около 0,27 Гц (рис. 12,а).

Эти колебания могут быть проявлением магнитозвуковой волны, теоретически рассмотренной выше. Как и в спокойных условиях (когда возмущения магнитного поля коррелировали с изменением частоты на циклотронной линии) изменения магнитного и электрического полей с частотой 0,27 Гц сдвигают резонансную линию по частоте, постоянно «разбивая» её. Это дает набор отдельных всплесков на разных частотах. Можно предположить, что при падении метеороидов под большими углами к поверхности Земли этот эффект проявляется еще больше и отдельные циклотронные пики не выделяются вообще. Именно поэтому характер шумов как набор циклотронных частот не был до настоящего времени идентифицирован. В точке, удаленной на 80 км, данных колебаний (с частотой 0,27 Гц) уже не видно, но во временной зависимости проявляется другое волновое возмущение, которое приводит к периодическим изменениям мощности линий с периодом около 20 с. Это возмущение возникает (или приходит в данную точку) несколько позже световой вспышки и имеет периодический характер.

Заключение

В работе рассмотрен отклик ионосферы на падение Челябинского метеороида. Показана возможность возникновения целого ряда ионосферных явлений:

1. Формирование крупномасштабной ионизованной области;

2. Возбуждение магнитозвуковой волны;

3. Возбуждение ионно-циклотронных градиентно-дрейфовых волновых структур, испускающих при перестройке волновые пакеты электромагнитного излучения, приходящие к Земле.

Показано, что звуковые шумы, регистрировавшиеся при падении Челябинского метеороида, соответствуют по характеристикам тем же шумам, которые регистрируются в виде электромагнитного шума (а при повышении шума и как акустические шумы) в приземной атмосфере в спокойных условиях. Предложена модель формирования электрофонного шума как реакция атмосферы (тропосферы) на увеличение амплитуд ионосферных по происхождению электромагнитных шумов, сопровождающих процессы ионосферной релаксации. В основе механизма реакции тропосферы лежит возбуждение резонансов ионов приземной плазмы с дальнейшей передачей энергии нейтральным компонентам воздуха. Электрофонный шум является проявлением механизма естественного обмена энергией между ионосферой и тропосферой через электромагнитные шумы. Этот эффект становится заметен наблюдателю при значительном увеличении амплитуд волновых явлений.

Литература

Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М., Наука. 1981.

Карташова и др. настоящий сборник.

Ковалева И.Х. Диссипативные ионно-циклотронные солитоны с чирпом в плазме нижней ионосферы, содержащей несколько видов ионов // Физика плазмы 2013. Т. 39. № 3. С. 1–11. (Plasma Phys Reports 39, 3, pp. 226–235, 2013)

Кузнецов Е.А., Михайлов А.В. Релаксационные колебания солитонов // Письма в ЖЭТФ, 1994. Т. 60. С. 466–470.

Молодых С.И., Рахматуллин Р.А., Липко Ю.В., Пашинин А.Ю. Анализ периодов аномальных усилений вариаций электромагнитного поля в диапазоне частот 8–35 Гц // Седьмая Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. С.-Петербург, 24–27 сентября 2012. Сборник трудов. С. 170–171.

Панкратова Н.В., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Лавров О.В., Скороход А.И., Шумский Р.А. Озон и окислы азота в приземном воздухе северной Евразии по наблюдениям в экспериментах TROICA // Изв. РАН Физика атмосферы и океана 2011. Т. 47, № 3. С. 343–358.

Попова и др. Настоящий сборник.

Bailey S.M., Barth C.A. A model of nitric oxide in the lower thermosphere // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. N. A8. 1205. doi:10.1029/2001JA000258.

Barth C.A. Bailey S.M. Comparison of a thetmospheric model with Student Nitric Oxide Explorer (SNOE) observations of nitric oxide // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A03304. doi:10.1029/2003JA010227

Beech, M., and L.A. Foschini. A space charge model for electrophonic bursters // Astron. Astrophys, 1999. V. 345. L27–L31.

Beech, M., and L. Foschini, Leonid electrophonic bursters // Astron. Astrophys. 2001. V. 367. PP. 1056–1060.

Beech, M., P. Brown, and J. Jones, VLF detection of fireballs // Earth Moon Planets 1995. V. 68, PP. 181–188.

Berngardt O.I., V.I. Kurkin, G.A. Zherebtsov, O.A. Kusonski, S.A. Grigorieva Ionospheric effects during first 2 hours after the Chelyabinsk meteorite impact // arXiv:1308.3918v1 [physics.geo-ph] 19 Aug 2013.

Borovička, J., Popova, O.P., Golub', A.P., Kosarev, I.B., Nemtchinov, I.V.: 1998, Astron. Astrophys. 337, 591–602.

Bradshaw J., Davis D., Grodzinsky G., Smyth S., Sandholm S. and S. Liu. Observed distribution of nitrogen oxides in the remote free troposphere from the NASA global tropospheric experiment programs // Reviews of Geophysics 2000, 38, 1, pp. 61–116.

Brasseur G.P., Solomon S. Aeronomy of the middle atmosphere: Chemistry and Physics of the stratosphere and mesosphere. Springer 2005.

Bronshten V.A. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Sys. Res. 1983. V. 17, pp. 70–74.

Bronshten V.A. Electrical and electromagnetic phenomena associated with the meteor flight // Sol. Sys. Res.1991. V. 25, pp. 93–104.

Brown, P., and R. Arlt. Detailed visual observations and modeling of the 1998 Leonid shower // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2000. V. 319, pp. 419–428.

Campbell M.D., Brown P.G., LeBlanc A.G., et al. «Electro-Optical Results from the 1998 Leonid Shower: I. Atmospheric Trajectories and Physical Structure» // Meteor. Planet. Sci. 2000. V. 35. PP. 1259–1267.

Drobnock G.J. Meteors Producing VLF Signatures Independent of Producing Electrophonic Sounds // WGN, Journal of the International Meteor Organization. 2001. V. 29, N. 1/2, pp. 45–50.

Drummond, J.D., C.S. Gardner, and M.C. Kelley. Catching a falling star, Sky Telescope, June 2000. 99, pp. 46–49.

Durney C.H., Rushworth C.K., Anderson A.A. Resonant AC-DC magnetic fields: calculated response // Bioelectromagnetics 1988, V. 9, pp. 315–336.

Edmonds D.T. Larmor precession as a mechanism for elf effects tuned by static magnetic field // Proc. Of E.B.E.A. Conf 1992. PP. 7–11.

Eisele F.L. Natural and transmission line produced posisive ions // J. Geophys Res. 1989. V. 94. PP. 6309–6318.

Golub', A.P., Kosarev, I.B., Nemtchinov, I.V., Popova, O.P. Emission spectra of bright bolides // Solar System Res. 1997, V. 31, 85–98.

Hedin J., Rapp M., Khaplanov M., Stegman J., Witt G. Observation of NO in upper mesosphere and lower thermosphere during ECOMA 2010 // Ann. Geophys.2012. V. 30. PP. 1611–1621.

Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H.E., Ehn, M., Horrak U., Kerminen V.-M., Laakso L., McMurry P.H., Mirme A., Petaja T., Tammet H., Vakkari V., Vana M., Kulmala M. Atmospheric ions and nucleation: a revive of observations // Atmos. Chem. Phys., 2011. V. 11. PP. 767–798.

Jenniskens, P., Meteor stream activity. III: Measurement of the first in a new series of Leonid outburst // Meteorit. Planet. Sci.1996. V. 31. PP. 177–184.

Junninen H., M. Ehn, T. Pluosujarvi, et al. A High-resolution mass spectrometer to measure atmospheric ion composition. Atmos. Mens. Tech 3, pp. 1039–1053, 2010.

Kartashova et al. A field study of the Chelyabinsk airburst event. 2014, IMC Proceedings (in press).

Kaznev, V.Y., Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis // Sol. Sys. Res. 1994. V. 28. PP. 49–60.

Keay, C.S.L., Anomalous Sounds from the entry of meteor fireballs // Science, 1980a. V. 210. PP. 11–15.

Keay, C.S.L., Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs // J.R. Astron. Soc. Canada. 1980b, 74. PP. 253–260.

Keay, C.S.L., Meteor fireball sounds identified // Asteroids, Comets, Meteors, 1991, 1992a, pp. 297–300.

Keay, C.S.L., Electrophonic sounds from large meteor fireballs // Meteoritics. 1992b. V. 27. PP. 144–148.

Keay, C.S.L., Electrophonic Sounds Catalog // WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org. 1994.V. 6. PP. 151–172.

Keay, C.S.L., and Z. Ceplecha, Rate of observation of electrophonic meteor fireballs // J. Geophys. Res. 1994.V. 99. PP. 13,163–13,165.

Kovaleva I.Kh. Dissipative ion-cyclotron oscillitons in a form of soliton with chirp in Earth's low-altitude ionosphere // Phys plasmas. 2012. 19, 102905, doi: 10.1063/1.4763561.

Kuznetsov E.A., Mikhailov A.V., Shimokhin I.A. Nonlinear interaction of soliton and radiation // Physica D. 1995. V. 8. PP. 201–215.

Lednev V.V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems // Bioelectromagnetics. 1991. V. 12. PP. 71–75.

*Lee T., Yu X-Y, Kreidenweis S.M., Wi.C. Malm, J.L.*Collett. Semi-continuous measurement of $PM_{2.5}$ ionic composition at several rural locations in the United States // Atmospheric Environment. 2008. V. 42. PP. 6655–6669.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Price, C., and M. Blum, ELF/VLF Radiation Produced by the 1999 Leonid Meteors // Earth Moon Planets. 2000. 82/83. PP. 545–554.

Thompson C.J., Briggs K.M., Farrell P., Fleming A., Hocking B., Joyner K., Anderson V., Wood A.W., Nonlinear dynamic of charged particles interacting with combined ac-dc electromagnetic fields // Physica A. 1995. V. 220. PP. 471–484.

Vince G., Szasz A., Liboff A.R. New Theoretical treatment of ion resonance phenomena // Bioelectromagnetics. 2008, V. 29. PP. 380–386.

Zgrablic G., D. Vinkovic´, S. Gradec˘ak, D. Kovac˘ic´, N. Bilis˘kov, N. Grbac, Z. Andreic´, and S. Garaj. Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N. A7, 10.1029/2001JA000310.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, ВЫЗВАННОЙ ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

В.В. Шувалов, Н.А. Артемьева, О.П. Попова

Рассматривается генерация и распространение ударной волны в атмосфере Земли после падения Челябинского космического тела, определяется максимальное избыточное давление в разных точках земной поверхности, оценивается размер зоны повреждений. Исследованы разные способы задания энерговыделения вдоль траектории метеороида и зависимость зоны повреждений от характера энерговыделения. Определены времена прихода звукового сигнала (воздушной волны) в разные точки земной поверхности, анализируется форма импульса давления.

Введение

Модели движения, абляции и разрушения метеороидов в атмосфере Земли, позволяют получить неплохие оценки траектории, световой вспышки, распределения метеоритов на поверхности, если известны начальные (при входе в атмосферу) данные метеороида (скорость, угол наклона траектории, размер, тип тела) (см., например, статью Поповой в этом сборнике). Обратная задача – вычисление начальных данных метеороида по известным конечным – несколько сложнее, но тоже часто и успешно решается в метеоритике. В задачах такого типа ударные волны (УВ) в атмосфере вообще не рассматриваются, хотя, безусловно, они существуют всякий раз, когда тело движется со скоростью, превышающей скорость звука. Но для типичных размеров наблюдаемых метеороидов (первые метры и меньше) УВ заметно затухают в атмосфере, не вызывая разрушающих эффектов на поверхности. С другой стороны, при пролете очень крупных космических тел (>100 м), атмосферные УВ тоже обычно игнорируются, так как основные эффекты связаны с ударом космического тела по поверхности, образованием кратера и выбросов из него. До недавнего времени единственным примером удара космического тела промежуточного размера (10–100 м), для которого имелись данные об ударной волне, было Тунгусское явление (диаметр космического тела порядка 50–80 м), при моделировании которого приходилось рассматривать как разрушение тела в атмосфере, так и генерацию УВ и их взаимодействие с поверхностью. Челябинский метеороид (ЧМ) может рассматриваться как уникальный пример «второй» Тунгуски: при существенно меньшем начальном размере УВ оказались достаточно сильными вблизи поверхности и вызвали повреждения (главным образом в виде разбитых окон) на площади порядка 10 000 км^2. В статье, на примере Челябинского метеороида, рассматриваются способы моделирования УВ и ее взаимодействия с поверхностью для космических тел размером порядка нескольких десятков метров. Результаты сравниваются с наблюдавшимися разрушениями.

Модели, используемые для расчета ударной волны, вызванной падением Челябинского метеорита

Для расчета ударной волны, генерируемой при падении космического тела, используются различные подходы. Прямой способ состоит в расчете обтекания

космического тела сверхзвуковым потоком стандартными численными методами в дву- или трехмерной постановке. Однако, если тело сравнительно небольшое (много меньше характерной высоты атмосферы ~8 км), то размер расчетной области много меньше расстояния от метеороида до поверхности. Решение такой задачи возможно при использовании адаптивных вычислительных сеток (размер сетки «подстраивается» под рассчитываемое течение), как это сделано, например, при моделирования ЧМ в работе [Brown et al., 2013]. Более простой подход – экстраполяция расчета двумерного течения вокруг космического тела на трехмерную сетку для расчета ударных волн у поверхности – использовался при расчете Тунгусского события [Artemieva and Shuvalov, 2007]. Однако для расчета ударной волны на больших расстояниях от траектории нет необходимости детально рассматривать картину обтекания метеороида, достаточно задать правильное энерговыделение вдоль траектории. При этом поперечный размер зоны энерговыделения тоже не важен, если этот размер много меньше характеристической высоты атмосферы и расстояния до поверхности.

Получить правильное энерговыделение теоретическими методами невозможно, и не только из-за несовершенства существующих теоретических моделей, но и из-за случайного (вероятностного) характера разрушения метеороида. Поэтому используются данные наблюдений. Самый простой способ состоит в том, что рассматривается точечный взрыв на высоте максимальной вспышки с энергией, равной энергии метеороида. В этом случае возникает квазисферическая ударная волна (полной сферичности нет из-за изменения плотности воздуха с высотой). Однако на самом деле метеороид передает свою энергию воздуху вдоль всей траектории, при этом, если не учитывать торможение, деформацию и фрагментацию, то энерговыделение пропорционально плотности воздуха. Поэтому второй возможный способ расчета распространения воздушной волны состоит в рассмотрении цилиндрического взрыва, в котором энергия, равная энергии метеороида, распределена вдоль траектории пропорционально плотности воздуха. При этом генерируется квазицилиндрическая (точнее коническая с очень маленьким углом раствора) ударная волна. Третий способ состоит в комбинации первого и второго, то есть считается, что часть энергии равномерно распределена вдоль траектории (с учетом изменения плотности), а остальная выделяется в точках основных вспышек. В этом случае генерируется несколько ударных волн: квази-цилиндрическая и несколько (в зависимости от числа вспышек) квази-сферических. И, наконец, четвертый способ состоит в использовании световой кривой, т.е. энергия, равная энергии метеороида, выделяется вдоль траектории пропорционально интенсивности излучения (если она измерена) в каждой точке. Форма ударной волны и количество волн в этом случае может быть разным. Следует отметить, что в энерговыделение и в последующее формирование ударной волны вносят вклад как движение и торможение самого тела (или его фрагментов) так и движение и торможение продуктов абляции, но формально разделять эти два одновременных процесса и говорить о формировании двух волн- баллистической и абляционной (см. Бронштен, 1980) совершенно неправильно. Образуется одна ударная волна.

Для сравнения мы использовали все четыре описанных выше подхода. Расчеты проводились по программе SOVA [Shuvalov, 1999] на разностной сетке размером 500×150×250 ячеек в X, Y и Z направлениях соответственно. Ось X направлена вдоль траектории в направлении, противоположном движению метеороида, ось Y перпендикулярна траектории (обе на поверхности Земли), ось Z вертикальна. В центральной области (-25 км $< X <$ 30 км, $Y <$ 20 км, $Z <$ 40 км) размер ячейки ра-

вен 200×200×200 метров, вне этой области размеры ячеек увеличиваются по геометрической прогрессии.

Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html). Угол наклона траектории метеороида составлял 16.5 градусов к горизонту. Скорость метеороида на участке траектории выше 21 км считалась постоянной и равной 19 км/с [Popova et al., 2013]. Полная энергия считалась равной 300 и 500 кт с координатами вспышек: (20,0,31.7) – самая яркая вспышка, (0,0,25.8) – средняя, (–16,0,21) – малая [Borovička et al., 2013]. В работе [Popova et al., 2013] приведены несколько иные значения высот вспышек и угла наклона траектории. Однако отличия невелики, и не сильно влияют на описываемые ниже результаты. В расчетах не учитывался конечный участок траектории на высотах менее 21 км, где яркость свечения заметно уменьшилась, так как масса продолжающих полет фрагментов уже невелика по сравнению с начальной массой метеороида, скорость этих фрагментов заметно упала, основная масса метеороида уже, по-видимому, «сгорела», и энерговыделение незначительно по сравнению с более высокой частью траектории. Во всех расчетах атмосферного взрыва (кроме квазисферического) энергия выделялась в ячейках, через которые проходит траектория, в тот момент времени, когда через эту ячейку пролетал метеороид.

Рассматривались 4 варианта. В первом варианте вся энергия была выделена в точке (20,0,31.7), где произошла самая яркая вспышка. Во втором вся энергия была выделена вдоль отрезка траектории между точками (–16,0,21) и (100,0,55) пропорционально плотности воздуха. Такое энерговыделение было бы, если бы метеороид летел с постоянной скоростью и не разрушался (то есть имел постоянное поперечное сечение). В третьем варианте половина энергии (то есть 150 кт) была выделена вдоль траектории так же, как во втором варианте, 30% энергии (то есть 90 кт) в точке (20,0,31.7), 15% энергии (45 кт) в точке средней вспышки (0,0,25.8) и оставшиеся 5% (15 кт) – в конечной точке траектории (–16,0,21). В этом варианте учитывалось и непрерывное выделение энергии вдоль траектории и отдельные вспышки. И, наконец, в четвертом варианте энерговыделение задавалось пропорционально интенсивности свечения по кривой свечения, восстановленной по многочисленным видеозаписям [Popova et al., 2013].

Результаты расчетов

На рис. 1 показаны распределения относительной плотности $\rho/\rho_0(z)$ для третьего варианта (когда половина энергии выделяется вдоль траектории и половина в точках вспышек) и энергии метеороида 300 кт. $\rho_0(z)$ это равновесная плотность в атмосфере в зависимости от высоты. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию энерговыделения. В первые секунды ударные волны от вспышек имеют большую амплитуду и распространяются быстрее, чем квази-цилиндрическая волна. Однако в дальнейшем (на расстояниях в несколько километров от траектории) все волны заметно затухают и распространяются со скоростью, близкой к скорости звука. При этом во все моменты времени хорошо видны ударные волны от отдельных вспышек (квазисферические) и квазицилиндрическая ударная волна, производимая равномерным выделением энергии вдоль траектории. Квазицилиндрическая волна на самом деле имеет вид конуса с очень маленьким углом раствора потому, что скорость метеороида (19 км/с) много больше скорости звука, с которой распро-

страняется быстро затухающая ударная волна. Важно отметить, что момент прихода ударной волны в какую-либо точку на поверхности не зависит от того, в какой точке была основная вспышка. С хорошей точностью можно считать, что первый звук всегда приходит из ближайшей точки траектории. Поэтому нельзя определять расстояние до основной вспышки по времени между вспышкой и приходом звука.

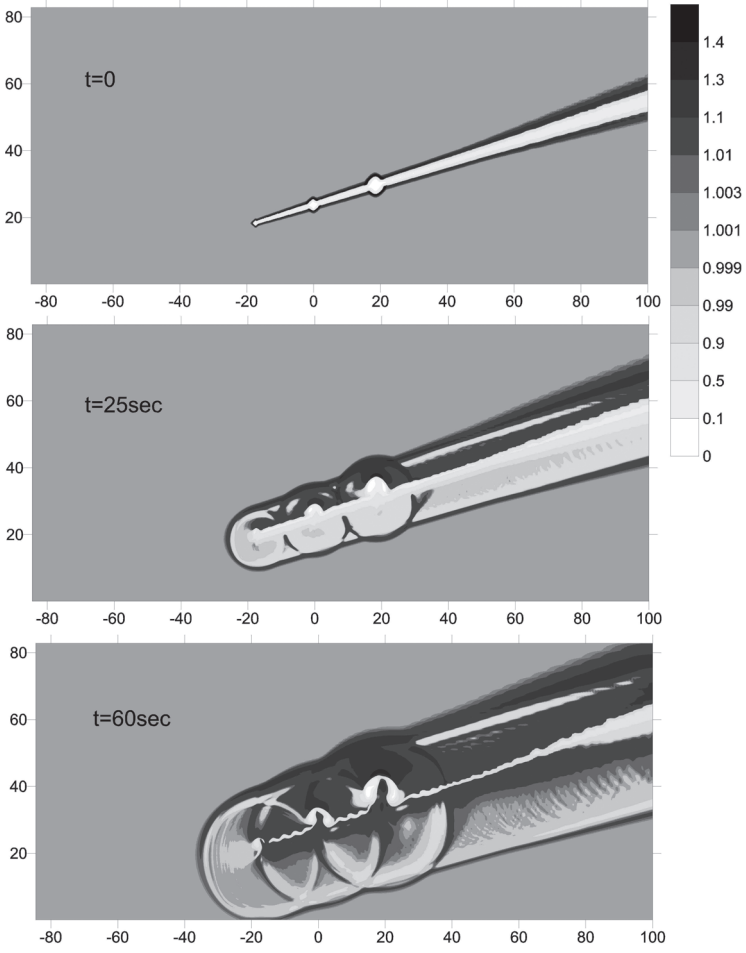


Рис. 1. Распределение относительной плотности ρ/ρ_0 в разные моменты времени t для варианта, когда половина начальной кинетической энергии выделяется во время трех вспышек и половина равномерно по траектории

В варианте 3 траектория резко обрывается в точке (–16,0,21), поэтому в области $X < -16$ км волна приходит на поверхность из этой точки. На самом деле траектория не обрывается резко, какие-то фрагменты продолжают лететь (некоторое время со сверхзвуковой скоростью) и генерировать ударную волну, однако, значительно более слабую, чем та, которая распространяется от области основного энерговыделения. Поэтому в области $X < -16$ км перед приходом «основной»

воздушной волны (приходящей из точки (–16,0,21)) возможна регистрация более слабых возмущений, генерируемых при торможении небольших фрагментов, «выживших» после основного разрушения. Однако в расчетах этот эффект не учитывался.

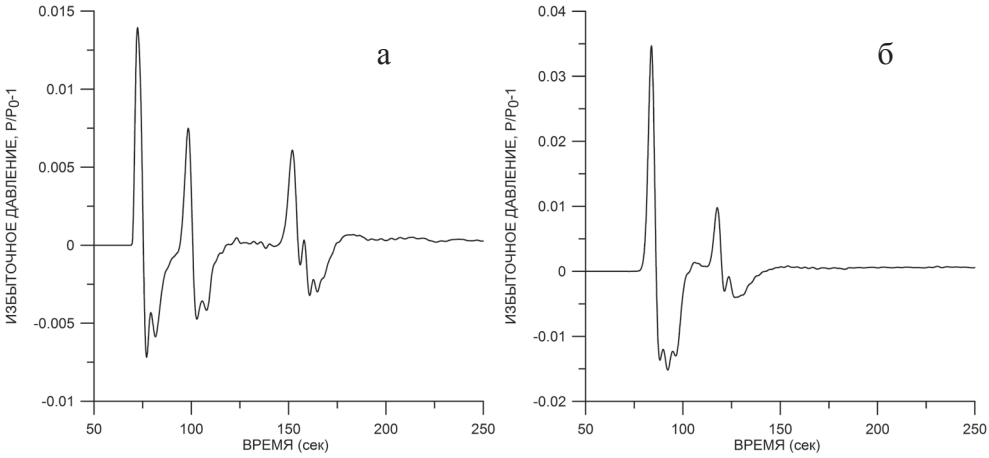


Рис. 2. Зависимости от времени относительного избыточного давления P/P_0-1 на поверхности Земли (на оси X) в точках $X = –16$ км (а) и $X = 0$ (б) для варианта 3, когда половина энергии выделяется непрерывно вдоль траектории и половина в трех вспышках

На рис. 2 для того же варианта показаны зависимости от времени избыточного давления. В точке $X = –16$ км отчетливо видны три пика, связанные с приходом волн от трех вспышек. Точка, где происходит последняя вспышка, совпадает с окончанием траектории. Поэтому четвертого пика нет. В точке $X = 0$ отчетливо выделяются только два пика давления. Это связано с тем, что квази-цилиндрическая волна и волны от двух последних вспышек приходят практически одновременно, формируя первый пик. Второй пик вызван приходом квази-сферической волны от самой мощной первой вспышки. Максимальное число пиков на единицу больше количества вспышек (если конечная точка траектории не совпадает со вспышкой). Эти результаты показывают, что попытки выделить моменты разрушения, ассоциированные со вспышками, и соответствующие разрушающие нагрузки по временам прихода последовательных звуковых сигналов (например, в [Borovicka et al., 2013]) могут приводить как к появлению «лишних» моментов разрушения, так и к преуменьшению их числа из-за сложного пространственного взаимодействия ударных волн.

В рассмотренном выше варианте 3 вспышки моделировались как точечные взрывы на фоне непрерывного выделения энергии. На самом деле точечных взрывов нет, просто непрерывная кривая энерговыделения и соответствующая ей непрерывная кривая свечения имеют отдельные максимумы. Один из вариантов кривой свечения и восстановленной по ней кривой энерговыделения [Popova et al., 2014] показан на рис. 3. Заранее не ясно, будут ли два ярко выраженных на рис. 3 пика энерговыделения приводить к генерации двух ударных волн, которые могут быть зарегистрированы на поверхности как два отдельных импульса давления. На рис. 4 показаны импульсы давления в двух точках на поверхности, полученные в расчете

варианта 4, когда энерговыделение задавалось в соответствии с кривой свечения, показанной на рис. 3. В точке $X = -20$ отчетливо видны два пика давления. Интервал времени между пиками давления, примерно 50 сек, соответствует расстоянию между пиками энерговыделения (5 км по высоте, то есть примерно 15 км по горизонтали). Поэтому разумно предположить, что пики соответствуют временам прихода возмущений от отдельных вспышек. В точке $X = 20$ км (под вспышками) так же, как и в предыдущем варианте два пика сливаются в один. Еще один, маленький, пик на высоте около 40 км, заметный на рис. 3, в расчетах никак не проявляется.

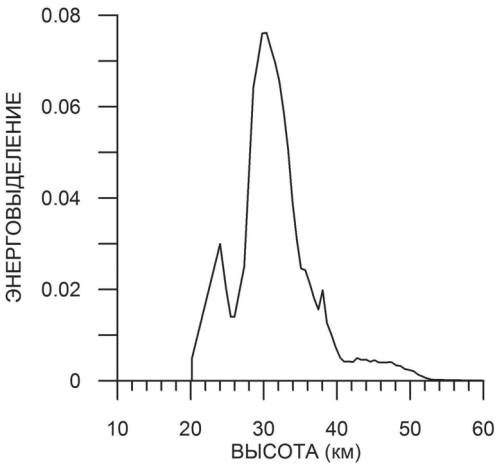


Рис. 3. Зависимость (безразмерная) энерговыделения от высоты

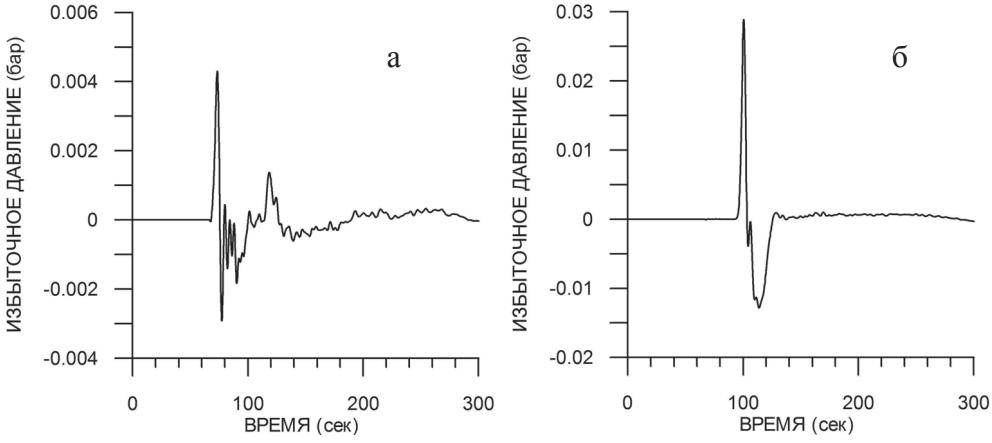


Рис. 4. Зависимости от времени относительного избыточного давления P/P_0-1 на поверхности Земли (на оси X) в точках $X = -20$ км (а) и $X = 20$ (б) для варианта 4, когда энерговыделение восстановлено по световой кривой, показанной на рис. 3

Сравнение с реальной картиной разрушений

Для сравнения расчетных результатов с реальной площадью разрушений необходимо знать величины избыточного давления, при которых разрушаются окна,

оконные переплеты и кирпичные стены. Согласно известной книге Гласстоуна и Долана (1977) для разрушения окон требуются избыточные давления 0,5–1 psi (1 psi = 6895 Па), то есть 3,4–6,9 кПа. По-видимому, эта величина завышена и соответствует 90–100% разрушению остекления. В книге Mannan and Lees (2005) собраны данные из разных источников, которые характеризуются заметным разбросом значений пороговых избыточных давлений. Поскольку даже звуковой удар от реактивного самолета иногда приводит к повреждению отдельных стекол, минимальное значение избыточного давления, разбивающее большие стекла, может быть очень низким, в диапазоне от 100 до 200 Па [Mannan and Lees, 2005]. По данным различных авторов избыточное давление, приводящее к разрушению 5% стекол, лежит в диапазоне 700–1700 Па, а 50–90% стекол – в диапазоне 1600–6900 Па. Кроме того, следует помнить, что величина критического для разрушения стекол давления зависит от большого числа различных факторов, в том числе от размера и толщины стекла. Стекла большей площади разбиваются при меньших нагрузках, поэтому во многих населенных пунктах пострадали здания с большими стеклами – школы, детские сады, клубы и т.д.

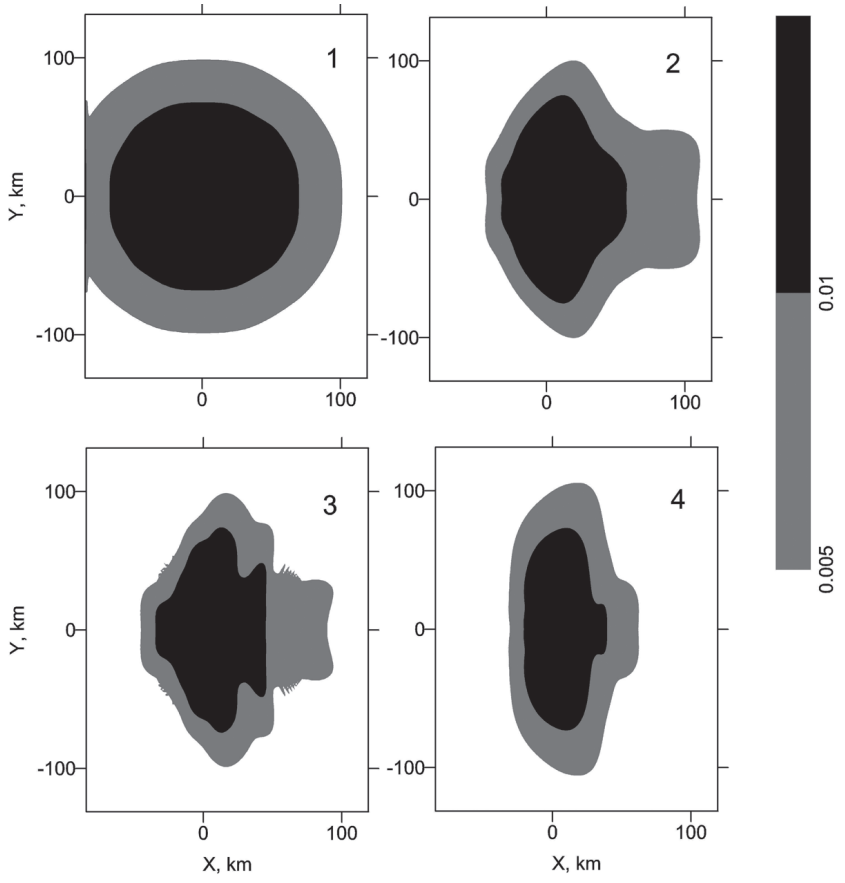


Рис. 5. Распределение избыточного давления на поверхности для вариантов 1, 2, 3 и 4 с энергией 300 кт. Черным цветом закрашены области, где максимальное избыточное давление превышает 1000 Па, серым – 500 Па

Широко используется разделение области разрушений на 4 зоны (A, B, C, D), в которых область легких разрушений (D) включает в себя повреждения остекления, стеновых панелей и крыш. В Челябинской области наблюдалось разрушение остекления, повреждения подвесных потолков, облицовочных панелей и т.д. Существенных структурных повреждений, кроме стены цинкового завода, уже находившейся в аварийном состоянии, и небольшого количества трещин в некоторых зданиях зафиксировано не было [Popova et al., 2013]. Считается, что зона D соответствует избыточному давлению, не превышающему 3500–5000 Па [Mannan and Lees, 2005]. Brown et al (2013) оценили скорость разлета осколков стекла по данным ряда видеозаписей в Челябинске в 7–8 м/с, что примерно соответствует избыточному давлению в 2000–3500 Па [Mannan and Lees, 2005].

Основываясь на данных, собранных в [Mannan and Lees, 2005], можно рассматривать избыточное давление 500 Па (0,5% от нормального давления) как границу области поврежденных окон, а 1000 Па – как границу более существенных массовых повреждений. Скорее всего, в большей части области разрушений избыточное давление не превышало 3500–5000 Па.

На рис. 5 показаны для всех четырех вариантов выделения энергии и полной энергии 300 кт площади поверхности, где избыточное давление превышало 500 и 1000 Па. Видно, что площади сравнимы во всех случаях, несмотря на сильное различие в распределении энерговыделения вдоль траектории. Это связано с тем, что во всех случаях основная часть энергии выделяется примерно на одной и той же, и при этом достаточно большой, высоте. То есть размер источника сравним (или даже меньше) с расстоянием до него. При точечном энерговыделении (первый вариант) зона повышенного давления, естественно, симметрична, имеет форму круга. Во всех вариантах с выделением энергии (всей или частично) вдоль траектории зона больших избыточных давлений вытянута в направлении, перпендикулярном траектории, что соответствует наблюдавшейся картине.

На рис. 6,а приводится карта зарегистрированных разрушений с наложенным на нее расчетным контуром избыточных давлений (вариант 4, для двух значений энергии – 300 и 520 кт). Видно, что область избыточного давления в 1000 Па хорошо совпадает с наблюдающейся картиной разрушений. На рис. 6,б приведены контуры избыточного давления для значений в 500–1000–2000–3000–4000–4300 Па. На территории Челябинска избыточное давление варьировалось в диапазоне от 1000 до 4000 Па, достигая наибольших значений в юго-западных районах города. Brown et al. (2013), анализируя долю разбитых стекол в разных районах Челябинска, оценили избыточное давление в среднем в 2600–4000 Па, что вполне согласуется с нашими оценками.

Большая часть разрушений пришлась на наиболее населенные – Челябинск и Копейск, а также на близко расположенные к траектории – пос. Коркино и Еманжелинск. Наибольшее число пострадавших также пришлось на Челябинск, а наибольшая доля обратившихся за медпомощью (0,16%) – на близко расположенное к траектории Коркино, где избыточное давление могло достигать 3000–4000 Па (рис. 6,б).

Следует отметить, что расчеты взаимодействия УВ с поверхностью предполагали абсолютно гладкую поверхность. В городских условиях, скорее всего, имели места многочисленные отражения и наложения УВ, которые могли приводить к локальным увеличениям избытка давления. Brown et al. (2013) предполагают, что именно такое увеличение давления возникло в районе цинкового завода и привело к обрушению стены.

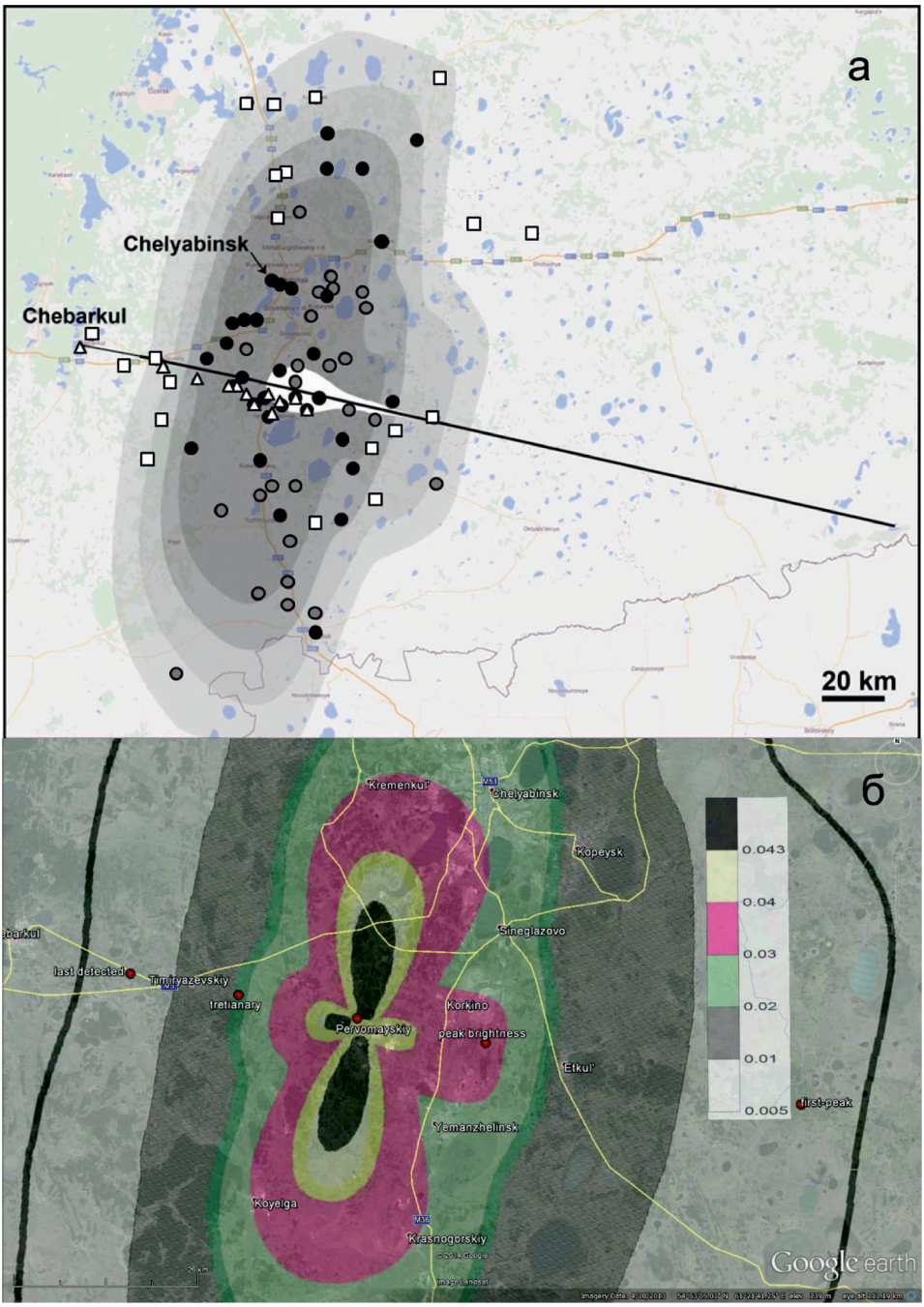


Рис. 6. (а) Область разрушений с наложенными результатами расчетов для начальных значений энергии в 300 и 520 кт ТНТ – области соответствуют значениям избыточного давления в 500 Па и 520 кт, 500 Па и 300 кт, 1000 Па и 520 кт, 100 Па и 300 кт (от светлого к темному). Серые символы соответствуют официальному списку наиболее пострадавших поселений, черные – пункты, разрушения в которых были подтверждены во время полевых исследований (белые квадраты – нет разрушений). Черная линия – траектория болида, белые треугольники – области находок метеоритов; (б) Контуры областей избыточного давления >500–1000–2000–3000–4000–4300 Па для энергии 520 кт

Обсуждение и выводы

При анализе движения в атмосфере и разрушения космического тела важно понимать, как распространяется ударная волна, генерируемая этим явлением. Один из популярных, но ошибочных способов оценки происходящего состоит в том, что метеорное явление отождествляется со взрывом на высоте, соответствующей максимуму свечения (основной вспышки), и расстояние до точки взрыва оценивается как время между вспышкой и приходом ударной волны, умноженное на скорость звука. Приведенные выше результаты показывают, что время прихода волны зависит только от траектории метеороида и ее конечной точки (после которой энерговыделение становится пренебрежимо малым) и не зависит от того, в каких точках этой траектории и на какой высоте происходят вспышки (пики энерговыделения).

Время прихода конической УВ от пролета метеороида можно оценить как $\Delta t = \Delta t(V, \beta, z_0)$, где z_0 – высота окончания энерговыделения, V – скорость входа тела, а β – угол наклона траектории:

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0}[(x + z_0 \tan^{-1} \alpha)^2(\sin \alpha)^2 + y^2]^{1/2} \text{ при } x > z_0 \tan \alpha$$

$$t_0(x, y) = \frac{1}{c_0}(x^2 + y^2 + z_0^2)^{1/2} \text{ при } x \le z_0 \tan \alpha$$

Время отсчитывается от момента достижения метеороидом конечной точки траектории, c_0 – скорость звука, угол наклона ударной волны равен $\alpha = \beta - \arcsin(c_0/V)$. Метеороид движется справа налево в плоскости $Z0X$, и координаты конечной точки траектории – $(0, 0, z_0)$.

Сравнение оценок времени прихода с наблюдаемыми временами показывает совпадение с точностью до 3–5 с (рис. 7). Наблюдаемые данные представлены набором видеозаписей стационарных видеокамер компании «Интерсвязь» (предоставлены генеральным директором Э.О. Калининым) и рядом случайных любительских видеозаписей. Эти видеозаписи синхронизированы по времени и расположены, кроме Челябинска, в Миассе, Златоусте, Чебаркуле и Кургане. На видеозаписях 18-ти камер можно определить время прихода ударной волны и ее задержку по отношению к моменту максимальной светимости. Предположение о том, что основное энерговыделение закончилось на высотах порядка 29–34 км, не согласуется со временами прихода волны в пункты, расположенные близко к траектории. Уменьшение высоты окончания энерговыделения до 23–21 км позволяет получить удовлетворительное согласие с наблюдаемыми данными. Это сравнение подтверждает, что за формирование УВ отвечает выделение энергии на протяженном участке траектории, ниже 21–23 км выделилась незначительная доля начальной энергии.

Вспышки излучения, связанные с максимумами энерговыделения, могут генерировать свои локальные ударные волны, которые, однако, распространяются внутри области, ограниченной внешней конической (почти цилиндрической, так как угол раствора очень маленький) волны (см. рис. 1). Эти отдельные ударные волны могут проявляться как отдельные пики давления после прихода первого основного возмущения. Количество таких пиков и интервалы времени между ними зависят от параметров вспышек и от расположения точки наблюдения и поэтому не могут быть использованы для определения высот фрагментации метеороида.

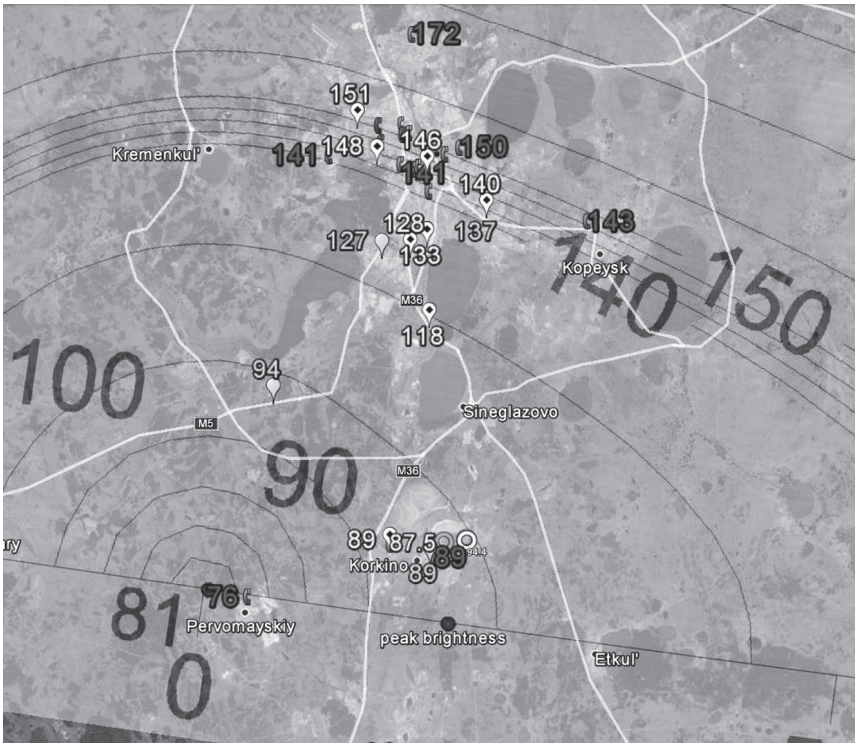


Рис. 7. Черные линии показывают времена прихода ударной волны, полученные по приближенным формулам в предположении, что энерговыделение заканчивается на высоте 23 км, красные цифры соответствуют наблюдаемым временам. Ось *OX* направлена вдоль траектории и начинается в точке, соответствующей высоте 23 км

Расчеты избыточного давления на поверхности показывают, что при энерговыделении 300–500 кТ область, где избыточное давление превышает 500–1000 Па, с хорошей точностью совпадает с зоной, где расположены наиболее пострадавшие населенные пункты. Наиболее близкая к наблюдаемой форма пораженной области получается в расчете 4 с использованием световой кривой для построения зависимости энерговыделения от высоты. Но даже простейший расчет с точечным энерговыделением неплохо описывает область разрушений, то есть этот упрощенный (и быстрый) метод можно использовать для предварительных оценок.

С учетом неопределенности значений избыточного давления, при котором разбиваются стекла в окнах разного типа и по-разному ориентированных, неопределенности в геометрии энерговыделения и погрешностей численной модели можно сказать, что выделенная энергия находится в диапазоне от 300 до 700 кт ТНТ. С большей точностью определить энергию космического тела по наблюдаемым разрушениям, по-видимому, нельзя.

Авторы благодарны В.В. Светцову за плодотворные обсуждения Челябинского события.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.

Artemieva N., Shuvalov V. 3D Effects of Tunguska Event on the Ground and in Atmosphere 38th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXVIII), held March 12–16, 2007 in League City, Texas. LPI Contribution No. 1338, p. 1537.

Borovička, Jiří; Spurný, Pavel; Brown, Peter; Wiegert, Paul; Kalenda, Pavel; Clark, David; Shrbený, Lukáš. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature 2013. V. 503, No 7475, P. 235–237.

Glasstone S., Dolan P.J. The Effects of Nuclear Weapon. 1977. 3-rd edition, United States Department of Defence.

S. Mannan S., Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification // Assessment and Control, vol. 1, 3rd edition (Elsevier Butterworth-jHeinemann, 2005).

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. 1999. v. 9, No.6, p. 381–390.

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

***О.П. Попова*[1], *П. Дженнискенс*[2], *Д.О. Глазачев*[1]**

[1] – Институт динамики геосфер РАН, [2] – SETI Institute

Рассматривается взаимодействие Челябинского метеороида (ЧМ) с атмосферой, оценивается его кривая блеска и соответствующее энерговыделение. Предлагается модель фрагментации метеороида в атмосфере, дающая возможность воспроизвести наблюдательные данные (световую кривую, кривую торможения). Описывается поле рассеяния метеорита, оценивается выпавшая масса, сравниваются модельное и реальное расположение фрагментов.

Световая кривая болида

Видеозаписи пролета болида были сделаны в большом числе населенных пунктов, которые разбросаны на 540 км с севера на юг (от Нижнего Тагила до города Карталы) и на 900–1000 км с запада на восток (от Самары и Оренбурга до Тюмени) [Емельяненко и др., 2013]. Анализ видеозаписей позволил целому ряду авторов определить как траекторию пролета болида, так и его световую кривую [Borovička et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Brown et al., 2013; Popova et al., 2013].

Световая кривая (кривая блеска) является наиболее точной оценкой профиля энерговыделения в атмосфере, хотя при входах больших разрушающихся тел следует помнить, что регистрируемый световой поток суммирует излучение достаточно протяженной области. От профиля энерговыделения зависят и особенности

формирующейся ударной волны, и детали ее воздействия на поверхность [Шувалов и др., 2014].

Камеры видеорегистраторов и камеры наблюдений, которые записали пролет метеороида, имеют целый ряд ограничений [Емельяненко и др., 2013]: малый динамический диапазон, автоматическое уменьшение диафрагмы при увеличении

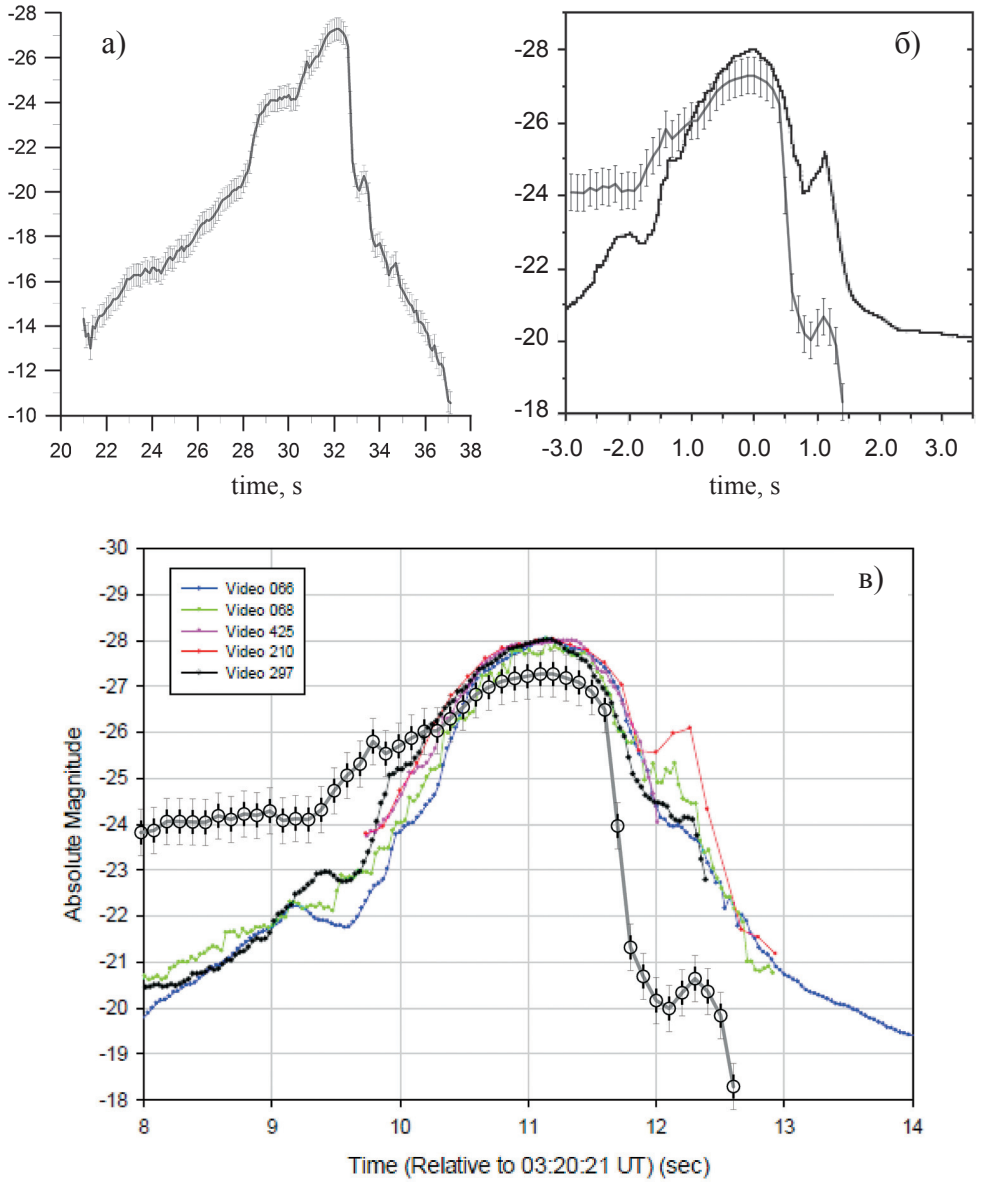


Рис. 1. (а) – Световая кривая Челябинского болида; (б, в) – сравнение световых кривых, полученных в работах [Popova et al., 2013] (кривая с указанной погрешностью) и [Brown et al., 2013]; на рис. (б) приведена средняя световая кривая из работы [Brown et al., 2013]; (в) световые кривые из работы [Brown et al., 2013], полученные по четырем разным видеозаписям

яркости болида, неизвестную спектральную чувствительность, отсутствие калибровки. Тем не менее, анализ видеозаписей позволил определить световую кривую болида целому ряду авторов, которые использовали различные методы коррекции (рис. 1, 2).

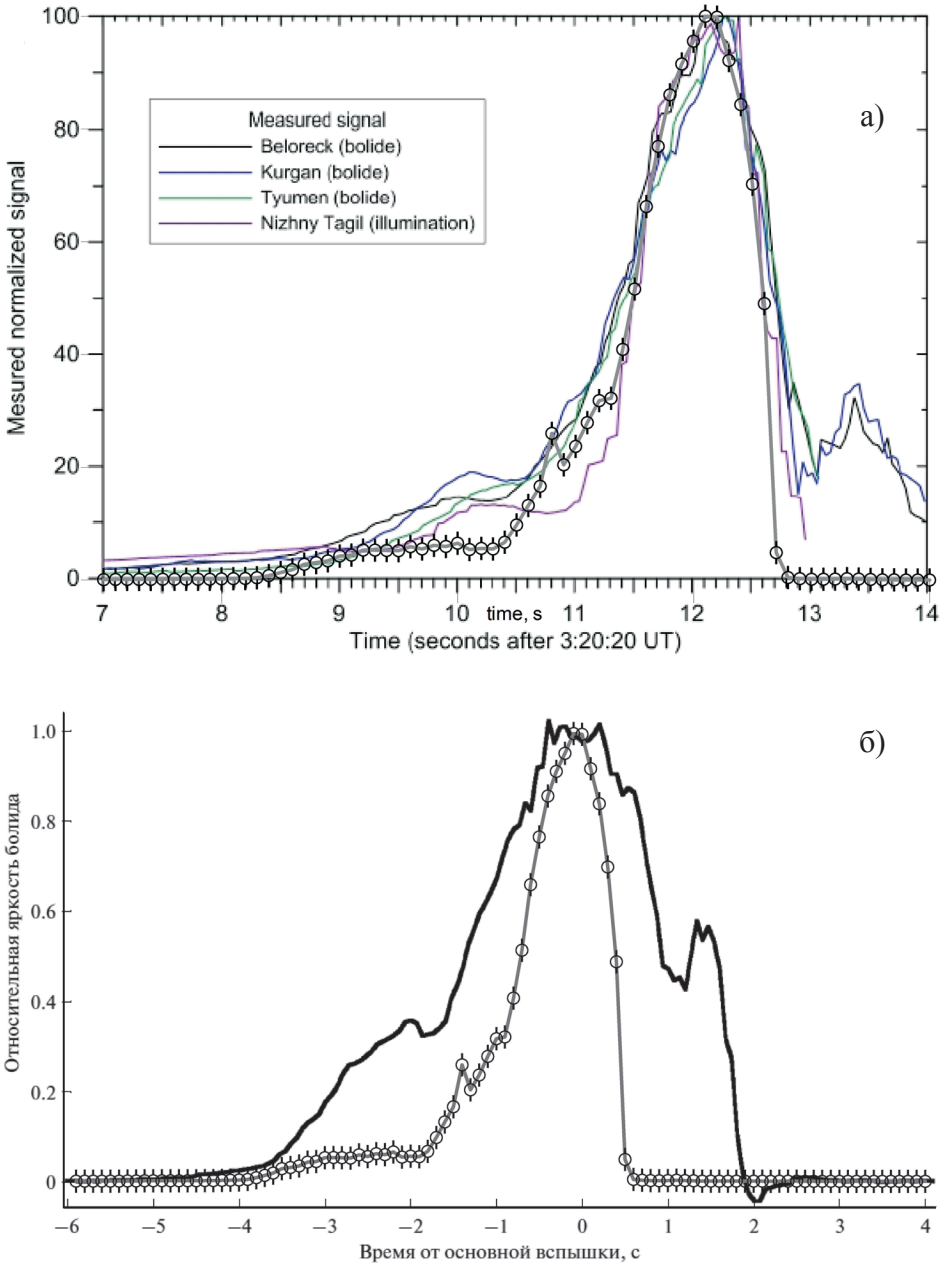


Рис. 2. (а) Световые кривые, полученные в работе Borovicka et al. (2013) по четырем разным видеозаписям; (б) световая кривая, полученная в работе в Емельяненко и др.(2013). Для сравнения на рисунках приведена световая кривая, полученная в [Popova et al., 2013] (кривая с точками)

Световая кривая на рис. 1,б [Brown et al., 2013] нормирована на максимальную яркость, определенную по данным спутниковой системы наблюдений; световая кривая на рис. 1,а [Popova et al., 2013] калибровалась по изображению Луны на видеорегистраторе в схожих световых условиях. Максимальные яркости в обеих оценках оказались близкими друг к другу и достигали -27,5 – -28 звездных величин (значение соответствует стандартному расстоянию в 100 км (рис. 1,б)). Вблизи траектории и в Челябинске болид был ярче Солнца. Видно, что яркость световых кривых, полученных по разным видеозаписям, может отличаться на 1–2 звездные величины, особенно для второй вспышки (рис. 1,в–2,а). В работах [Borovicka et al., 2013] и [Емельяненко и др., 2013] (рис. 2) получены световые кривые в относительных единицах. Основное различие состоит в оценке яркости после максимума светимости, то есть в те моменты времени, когда наиболее существенным было влияние автоматического изменения чувствительности камеры. Тем не менее, несмотря на все различия (рис. 1, 2), можно сказать, что для световой кривой Челябинского болида характерно наличие нескольких явно выраженных вспышек излучения, обычно связываемых с разрушением метеороида. Явно можно выделить рост интенсивности примерно за 4 сек до максимума, сам максимум, вспышку на одну секунду позже. Это соответствует высотам примерно 45–50, 30 и 24–25 км. Следует отметить, что максимум вспышки обычно сдвинут на более низкие высоты, чем вызывающее эту вспышку разрушение, поскольку образующиеся фрагменты должны затормозиться для того, чтобы передать свою энергию воздуху.

Разрушение Челябинского метеороида

Модели взаимодействия метеороида с атмосферой

Диаметр Челябинского метеороида оценивается в 18–20 м [Brown et al., 2013; Popova et al., 2013], поэтому его взаимодействие с атмосферой происходило в режиме сплошной среды с самого начала регистрации на высоте порядка 97 км (длина свободного пробега на этой высоте составляет 20–50 см). Взаимодействие таких тел с атмосферой можно описывать в рамках газодинамических моделей (см. обзор [Popova, 2005]), основным механизмом абляции является излучение ударной волны и паров вещества [Svetsov et al., 1995; Голубь и др., 1996; 1997]. Существенное влияние на взаимодействие метеороида с атмосферой оказывает фрагментация.

Газодинамические модели, которые учитывают все эффекты (абляцию, излучение и фрагментацию), достаточно редки и применялись, в основном, к крупным телам с массами большими 10^8 кг (то есть размерами большими нескольких десятков метров, например, [Boslough et al., 1994; Shuvalov and Artemieva, 2002; Shuvalov and Trubetskaya, 2007] и др.) В этих моделях обычно предполагается, что разрушившийся метеороид ведет себя как жидкость. Эти модели не могут описать процесс фрагментации, если в нем образуются одновременно отдельные фрагменты и заметное количество пыли.

Взаимодействие более мелких метеорных тел с атмосферой, как правило, описывается стандартной системой простых дифференциальных уравнений, основанных на законах сохранения массы, импульса и кинетической энергии [Baldwin and Sheaffer, 1971; Ceplecha et al., 1993; Borovicka et al., 1998; Bland and Artemieva, 2006] и др. Целью таких расчетов обычно является определение начальных параметров метеороидов через воспроизведение световой кривой и кривой торможения [Ceplecha et al., 1993; Borovicka et al., 1998; Ceplecha and ReVelle, 2005], описание

общей картины взаимодействия метеороида с атмосферой [Baldwin and Sheaffer, 1971; Borovicka et al., 1998; Bland and Artemieva, 2006], определение таких параметров как коэффициенты абляции и формы-плотности [Ceplecha et al., 1993; Ceplecha and ReVelle, 2005]. Эта стандартная система уравнений часто дополняется разными моделями фрагментации, поскольку фрагментация – обычное явлении во время пролета через атмосферу, большинство метеороидов разрушается под действием аэродинамических сил [Ceplecha et al., 1993; Попова и Немчинов, 2005].

Разрушение может происходить различным образом, например, это может быть образование нескольких достаточно крупных фрагментов, которые до некоторого момента взаимодействуют друг с другом, генерируя одну общую ударную волну, а затем продолжают свое движение независимо друг от друга и могут разрушаться дальше (прогрессивная фрагментация). Такие модели рассматривались во многих работах, начиная с Левина (1956). До работы [Passey and Melosh, 1980] эти модели не учитывали взаимодействие фрагментов друг с другом даже на начальном этапе. Предполагалось, что поперечный размер кратерных полей и метеоритных полей рассеяния обусловлен чисто случайными причинами [Frost 1969; Цветков, 1987]. Passey and Melosh (1980) рассмотрели взаимодействие ударных волн между фрагментами, которое вызывает появление боковой скорости, приводящей к удалению фрагментов друг от друга. Величина коэффициента в выражении для скорости оценивалась как по расположению кратеров в известных кратерных полях [Passey, Melosh, 1980], так и в газодинамических расчетах [Artem'eva, Shuvalov, 1996; Artemieva, Shuvalov, 2001].

Другой механизм разрушения – это разрушение метеороида на облако мелких фрагментов и паров, объединенных общей ударной волной [Svetsov et al., 1995]. Если падающее тело разрушается на очень большое число небольших фрагментов, то после разрушения это облако паров и фрагментов может деформироваться как жидкость. Наименьшие фрагменты могут легко испариться и заполнить промежутки между крупными кусками. Движение полностью разрушившегося метеороида внутри общей для всех фрагментов ударной волны часто применяют к крупным телам (таким, как вызвавшее Тунгусскую катастрофу [Shuvalov and Artemieva, 2002]).

Григорян (1979) ввел понятие бокового растекания метеороида, подвергшегося фрагментации, указывая при этом, что при увеличении площади поперечного сечения края облака фрагментов загибаются назад и отрываются от общей массы. Сходные идеи использованы и в других работах [Hills, Goda, 1993; Chyba et al., 1993]. В этих работах выводятся дифференциальные уравнения, описывающие растекание фрагментированного объекта. Простые соотношения для изменения размера разрушающегося тела позволяют включить их в общую систему уравнений движения метеороида в атмосфере (модель pancake). Но крупные куски могут уйти из этого облака и вести себя как независимые тела. Полная картина движения раздробившегося тела оказывается достаточно сложной. Оба сценария разрушения могут возникать в реальных событиях, гораздо меньших Тунгуски, иногда на разных стадиях разрушения одного и того же метеороида [Borovička et al., 1998; Popova, 2011].

Обычно предполагается, что разрушение метеороида начинается, когда аэродинамическая нагрузка на поверхность тела превышает некоторую характерную прочность тела. Характерную прочность при этом выбирают разными способами, часто предполагают, что прочность уменьшается с увеличением размера [Svetsov et al., 1995]. Средняя прочность на сжатие образцов метеоритов небольшого раз-

мера (весом порядка нескольких граммов) составляет порядка 217±134 МПа, а на растяжение 30±17 МПа [Svetsov et al., 1995; Цветков и Скрипник, 1991]. В то же время, анализ наблюдательных данных для 13 метеоритных падений (массами от 20 кг до 70 тонн), дополненных данными для целого ряда болидов, позволил оценить прочность при первом разрушении в атмосфере в 0,1–1 МПа, а максимальную прочность при входе в атмосферу как 1–10 МПа [Popova et al., 2011], но не дал возможности выделить зависимость прочности от размера.

Моделирование Челябинского события

Предполагалось, что начальная масса метеороида составляет $7 \cdot 10^6$ кг, скорость входа – 19 км/с и начальная прочность – 0,2 МПа. Коэффициент теплопередачи для основного тела и всех фрагментов предполагался равным 0,1, что соответствует параметру абляции 0,016 $с^2/км^2$, близкому по значению к ~0,014 $с^2/км^2$, определенному для болидов похожего состава [Ceplecha et al., 1998]. Использовались эффективности высвета в различных диапазонах, определенные по результатам газодинамического моделирования [Голубь и др., 1996; 1997]. Коэффициент конверсии в звездные величины предполагался равным $1{,}1 \cdot 10^3$ Дж/с для 0-звездной величины [Ceplecha et al., 1998]. Выбранная начальная масса меньше, чем наиболее вероятное значение в $1{,}3 \cdot 10^7$ кг, но следует учитывать неопределенность в оценке параметров. Увеличение массы в два раза приводит к увеличению яркости примерно на +0,5 – +1,5 звездных величин до и в максимуме светимости. Кроме того, как эффективность высвета, так и коэффициент конверсии в звездные величины известны недостаточно хорошо и погрешность, вносимая каждой из этих величин, может достигать 1 звездной величины.

Целью моделирования было воспроизвести световую кривую и торможение в атмосфере. Первые попытки были сделаны в рамках модели прогрессивной фрагментации при различных предположениях о числе образующихся фрагментов (разрушение на два куска, разрушение на целый ряд фрагментов, удовлетворяющих степенному закону распределения и т.д.). Такой подход приводит к слишком большой величине массы метеоритов (~300–600 тонн), большому количеству фрагментов (>10^6), слишком яркому излучению ниже 25 км высоты и слишком малому значению полной высвеченной энергии.

Рис. 3. Изображение облака примерно через 6 секунд после пролета болида (фото Марата Ахметвалеева)

Формирование и торможение облака мелких фрагментов и паров прямо наблюдалось в Челябинском событии – это облако затормозилось примерно на высоте 25–27 км [Popova et al., 2013], тепловое излучение продолжалось и после полного торможения облака (рис. 3). Формирование огромного числа фрагментов на высотах 50–20 км в течение короткого времени свидетельствует о том, что эти фрагменты нельзя рассматривать как независимые.

Наиболее подходящим описанием Челябинского события может быть гибридная модель, объединяющая pancake и прогрессивную фрагментацию, и предполагающая, что одна часть начальной массы образует облако фрагментов и паров, а другая – независимо летящие и разрушающиеся фрагменты. Аналогичная модель описывает разрушение астероида $TC_3$2008, чей вход в атмосферу привел к падению метеорита Алмахата Ситта [Popova, 2011]. К сожалению, нельзя предсказать, какая доля начальной массы разрушается с образованием облака фрагментов и пыли, но оценить эту долю можно, сопоставляя результаты моделирования с измеренной световой кривой.

Гибридная модель позволила воспроизвести световую кривую болида (рис. 4). Предполагалось, что после первого разрушения на высотах порядка 50–60 км большая часть обломков образует облака фрагментов и паров, а часть (примерно 20 тонн) разрушается на независимо летящие фрагменты. Предполагается, что прочность независимо летящих фрагментов увеличивается с уменьшением их массы по степенному закону (рассматривались разные показатели степени в диапазоне 0,25–0,5 [Цветков и Скрипник, 1991; Svetsov et al., 1995]). Кроме того, допускаются дополнительные случайные отклонения значений прочности [Bland and Artemieva, 2006]. Масса наибольшего фрагмента при каждом разрушении выбирается случайным образом, масса и число остальных фрагментов удовлетворяют степенному закону [Jenniskens et al., 1991; Borovicka et al., 1998]. Финальное распределение фрагментов метеорита по массе меняется от расчета к расчету, но при этом масса наибольшего фрагмента достигает 100–600 кг, а масса большинства фрагментов не превышает 10 кг. Следует отметить, что все эти фрагменты формируют головную часть поля рассеяния.

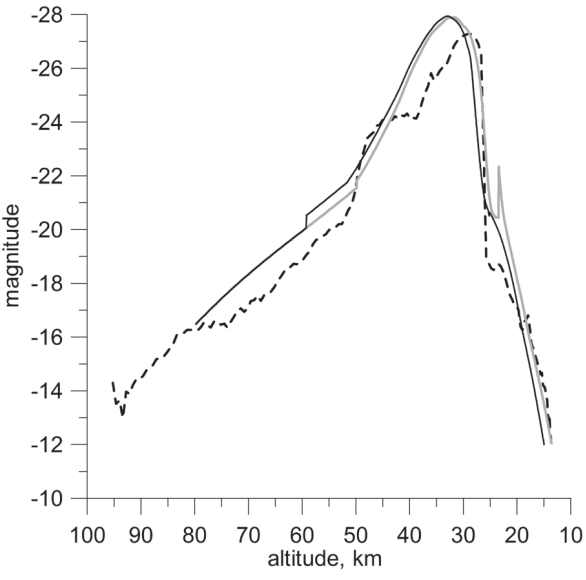


Рис. 4. Две модельные световые кривые (серая и черная) в сравнении с наблюдаемой (пунктирная кривая). Модельные кривые соответствуют двум разным реализациям

Описанный подход позволяет описать основные особенности световой кривой (рис. 4), хотя используется упрощенное описание разрушения Челябинского метеороида. Полученное решение – не единственное, разное количество первичных фрагментов (то есть образовавшихся в первой фрагментации) может разрушаться с образованием облака фрагментов.

На рис. 4 приведены две модельные кривые, неплохо описывающие наблюдаемую. Например, узкий пик на серой кривой соответствует разрушению достаточно крупного фрагмента, пережившего предшествующие разрушения, похожая вспышка присутствует и на наблюдаемой кривой. Различие в интенсивности вызвано тем, что несколько различаются массы фрагментов, участвовавшие во фрагментации. Так же объясняется и различие в интенсивностях на высотах 50–40 км – большее количество материала было разрушено на мелкие фрагменты и затормозилось на этих высотах. Наблюдаемая световая кривая известна с точностью порядка 0,5–1 звездной величины (раздел 1), коэффициенты высвета и конверсии также известны с точностью не лучше 2, поэтому вводить большее число заданных параметров, чтобы получить лучшее соответствие, не имеет смысла.

Дополнительной проверкой модели на соответствие наблюдательным данным является сравнение модельного и наблюдаемого торможения (рис. 5). До высот порядка 27–25 км метеороид фактически не тормозится, после чего наблюдается быстрое торможение (рис. 5). Модельное торможение для нескольких фрагментов показано на рис. 5. Кроме того, показано торможение облаков мелких фрагментов и пыли (clouds), образовавшихся на высотах 30–40 км и затормозившихся выше 25–35 км. Масса наибольшего фрагмента в данной реализации составляет порядка 300 кг.

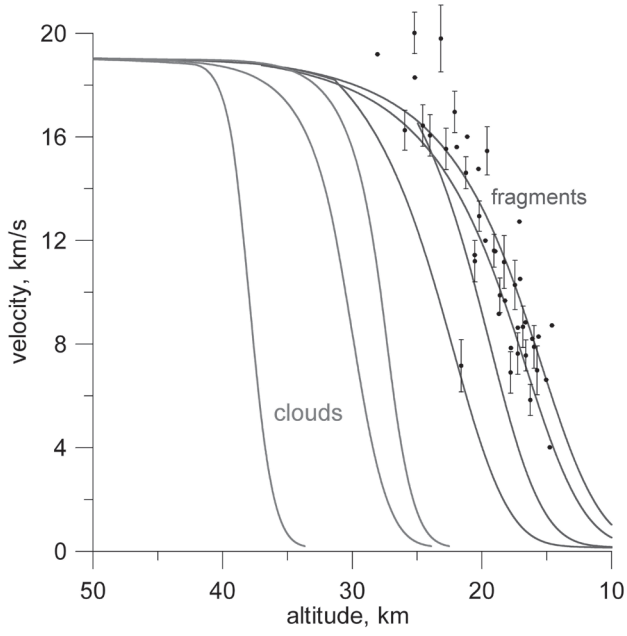


Рис. 5. Наблюдаемое торможение (точки) в сравнении с модельными кривыми для ряда фрагментов. Кривые, обозначенные как clouds, показывают торможение облаков мелких фрагментов и пыли, образовавшихся на высотах 30-40 км и затормозившихся выше 25–35 км

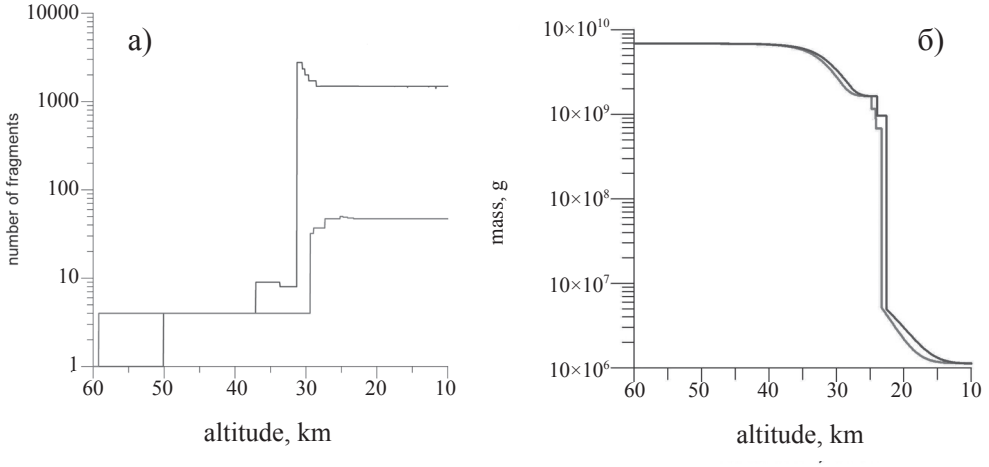


Рис. 6. (а) – Число фрагментов в зависимости от высоты. (б) – Суммарная масса фрагментов в зависимости от высоты для двух модельных реализаций

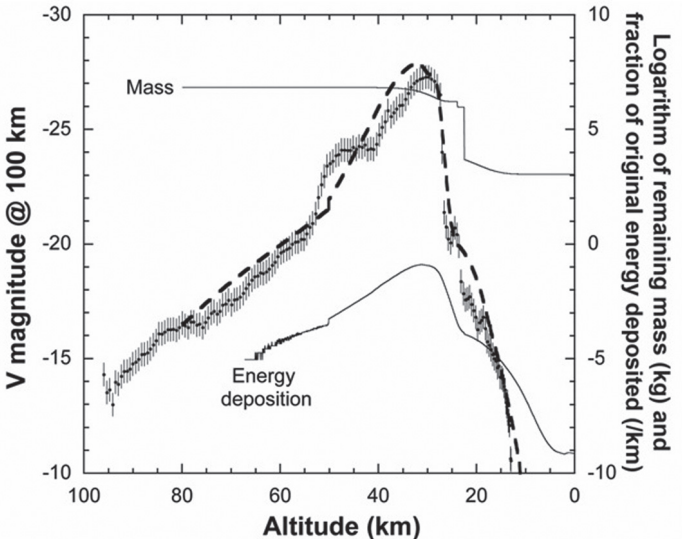


Рис. 7. Световая кривая болида, суммарная масса всех фрагментов на данной высоте и зависимость энерговыделения от высоты (нормированная на начальную энергию, km^{-1})

Изменение числа образующихся фрагментов и их суммарной массы в модели показано на рис. 6. Интенсивное разрушение на высотах 32–29 км приводит к быстрому увеличению числа фрагментов. Большая часть массы и энергии выделилась на высотах 40–25 км (рис. 7).

Число и размер фрагментов, их местоположение в поле рассеяния меняются в модели от реализации к реализации, но есть целый ряд аспектов, которые хорошо определены: только незначительная доля начальной массы и энергии выделилась ниже 20 км. Оцененное значение интегральной эффективности высвета составляет 18–20%, около 76% начальной массы испарилось, масса, сохранившаяся в виде

мелких фрагментов и пыли, которая потом образовала долгоживущий пылевой след [Gor'kavy et al., 2013], достигает примерно 24%.

Облако фрагментов, образовавшееся на высотах 32–29 км, затормозилось на высотах 27–23 км (наблюдавшееся торможение – на 26,2 км). Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе пос. Александровка, Березняки и других, рядом расположенных пунктов, при фрагментации образовывали это облако фрагментов, и их распределение нельзя описать в рамках используемой модели (облако рассматривается как целое). Основываясь на плотности распределения этого вещества можно оценить массу этих метеоритов в 3000–5000 кг [Popova et al., 2013, раздел 3.2].

Фрагменты, светившие ниже высоты 26 км, (их массу можно оценить примерно в 20 тонн), приводят к выпадению еще около 1000 кг (в виде 20–2000 фрагментов в зависимости от реализации модели). Эти фрагменты образуют головную часть поля рассеяния. Длина поля рассеяния меняется с размером наибольшего фрагмента, но наибольший фрагмент (если его масса превышает 150–300 кг) способен достичь озера Чебаркуль. Скорости падения фрагментов лежат в диапазоне 50–250 м/с для фрагментов с массами 0,1–1000 кг. Точное значение зависит от предполагаемой формы фрагмента и принятого коэффициента сопротивления. Все фрагменты, включая наибольший, долетевший до озера Чебаркуль, падают с дозвуковой скоростью. Время полета наибольшего фрагмента хорошо согласуется с видеозаписью Мельникова, на которой зарегистрировано образование полыньи на озере [Popova et al., 2013].

Разрушение Челябинского метеороида рассматривается в целом ряде недавно появившихся работ. Дудоров и Майер (2014) использовали модель прогрессивной фрагментации (разрушение на два фрагмента). Для лучшего воспроизведения световой кривой авторы использовали различные масштабные факторы в законе изменения прочности для разных диапазонов размеров фрагментов и зависимость коэффициента конверсии в звездные величины от температуры. Использовались постоянная эффективность высвета в 2% и оценка температуры по закону Стефана–Больцмана по интенсивности свечения, что является слишком упрощенным подходом, поскольку за формирование излучения болида отвечает протяженная область с некоторым профилем температуры [Голубь и др., 1997]. Эффективная яркостная температура не сильно меняется на высотах 50–30 км, а рост интенсивности излучения на этих высотах вызван скорее увеличением светящейся области благодаря разрушению метеороида, чем ростом температуры излучающей области. Прогрессивная фрагментация приводит к образованию более $1{,}3 \cdot 10^5$ фрагментов суммарной массой 67 тонн. Распределение фрагментов по массе ассиметрично, имеет резкий максимум в области масс порядка 1 кг, большая часть фрагментов имеет массы 0,1–1 кг, что не соответствует наблюдавшейся картине. Прогрессивная фрагментация с разрушением на два фрагмента обычно приводит к дефициту мелких фрагментов [Artemieva and Shuvalov, 2001; Popova, 2011].

Avramenko et al. (2014) предложили модель разрушения с увеличением суммарной площади фрагментов по некоторому закону, который на самом деле близок к известной модели pancake. При этом авторы предлагают оценивать число фрагментов и массу среднего фрагмента из известных полной массы и площади фрагментов. Авторы предполагают, что одна часть метеороида была малопрочной, что и привело к разрушению и интенсивному энерговыделению на высоте 50–30 км, а другая часть обладала более высокой прочностью, и ее разрушение произошло на более низких высотах, что объясняет второй меньший максимум на кривой энерговыделения. Средний размер фрагмента авторы оценивают в 2,5 кг.

Borovicka et al. (2013) также описывают сложный характер фрагментации, предполагая, что около 1% массы ответственно за увеличение яркости болида на высотах 45–50 км, а 95% массы было разрушено на высотах около 30 км до мелких (меньших 1 кг) фрагментов. На высоте около 26 км масса составляла около 20 тонн по данным о торможении (что согласуется и с нашим моделированием, описанным выше) и около 10 тонн – на высоте 22 км.

Все описанные модели приводят к общему выводу, что разрушение метеороида началось на высотах порядка 45–50 км при нагрузках порядка 0,2–0,7 МПа, наиболее интенсивно протекало на высотах около 30 км и продолжалось вплоть до высоты около 20 км. Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе Александровка–Березняки–Депутатское, были образованы на высотах 30–50 км. Крупнейший фрагмент, размером в несколько сот килограммов, мог достичь озера Чебаркуль. Должны существовать и другие фрагменты, с массами порядка нескольких килограмм или десятков килограммов в головной (западной) части эллипса рассеяния. Сложный характер фрагментации приводит к сложному распределению фрагментов по массе.

Низкая доля массы метеоритов по отношению к начальной массе метеороида объясняется, скорее всего, именно его интенсивным разрушением на большое число фрагментов, которые не успевают разделиться и продолжают лететь в общей горячей светящейся области, где их абляция происходит более эффективно, благодаря объемному испарению.

Вещество Челябинского метеороида на поверхности Земли

Данные о собранных метеоритах и их распределение

Сбор метеоритного материала начался сразу после падения, первые находки мелких фрагментов на озере Чебаркуль подтвердили метеоритную природу события. Несколько экспедиций занималось сбором метеоритов. Согласно работе Бадюкова и др. (2014) выборка зарегистрированных метеоритов включает информацию о 1923 образцах, общей массой 730,9 кг, включая наибольший фрагмент в ~550 кг, извлеченный из озера. Минимальная масса фрагмента метеорита в этой выборке составляет 0,04 г.

Точная информация о местах падения известна для 1783 метеоритов выборки [Бадюков и др., 2014]. Поле рассеяния простирается от 60,32°E, 54,959°N (полынья и место нахождения крупнейшего фрагмента) до примерно 54,7°N, 61,3°E вблизи пос. Александровка, то есть имеет длину более 80 км (рис. 8,а). Максимальная ширина эллипса рассеяния составляет 6–7 км. Крупнейшие фрагменты найдены в головной (западной) части эллипса рассеяния. В работе Бадюкова и др. (2014) выборка условно разделена на 3 популяции метеоритов в зависимости от места падения: группу А – метеориты, найденные восточнее с. Еманжелинка, с характерными массами менее 10 г; группу В – метеориты, найденные в районе пос. Депутатский, типичные массы от десятков грамм до 500 г; группу С – метеориты, собранные западнее пос. Депутатского, с массами от сотен грамм до 23,4 кг (рис. 8).

Доступна информация о 1695 фрагментах (из упоминавшихся 1923), собранных различными экспедициями, без указания их места падения. В работе Popova et al. (2013) приведены координаты для 178 метеоритов, включая несколько фрагментов с массами большими 1 кг. Именно эти данные будут использоваться в настоящей работе.

а)

б)

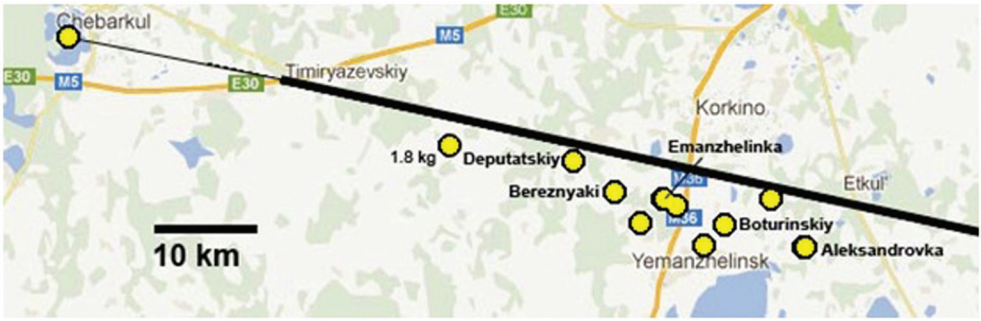


Рис. 8. (а) – Фрагменты метеорита с указанными местами падения; (б) – Отмечены места находок. Черная линия – траектория метеороида, цифры обозначают высоту траектории над горизонтом

Распределение фрагментов по массам приведено на рис. 9. Опубликованные данные дополнены двумя фрагментами с массами в 3,4 и 23,4 кг. Хотя здесь использованы данные для 1697 фрагментов, оно мало отличается от распределений для 1923 и 1696 фрагментов, приведенных в [Бадюков и др., 2014]. Полная масса составляет 93,6 кг, медианное значение массы равно 1,74 г, среднее значение – 55,2 г. Распределение асимметрично. Распределение метеоритов, приведенных в Таблице S13 [Popova et al., 2013], содержит данные о фрагментах с полной массой около 80 кг, средней массой 450 г и медианным значением в 134,5 г и представляет собой распределение более крупных фрагментов (рис. 9).

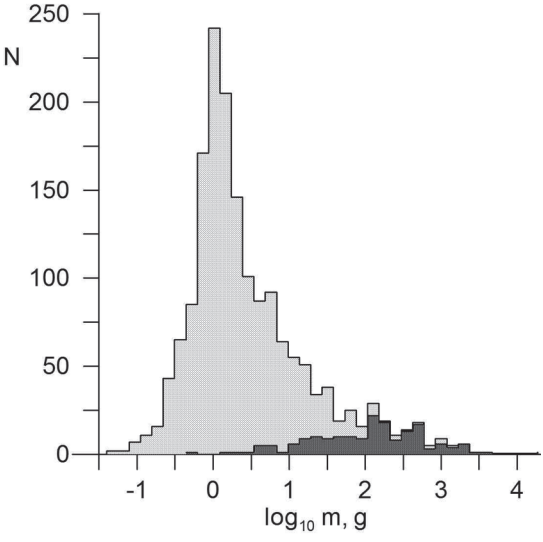


Рис. 9. Гистограмма распределения по массам фрагментов метеорита Челябинск. Черным показана гистограмма распределения фрагментов с опубликованными координатами

Фрагменты на озере Чебаркуль

Вскоре после падения была обнаружена полынья на озере Чебаркуль (примерно 7×8 м, почти круглая), на расстоянии примерно 71 км от места максимальной вспышки. На расстояниях 50–100 м от полыньи были собраны мелкие фрагменты (мм-размера), позднее идентифицированные как метеориты, LL-хондриты. В марте 2013 специалистами Уральского федерального университета была проведена магнитометрическая съемка, показавшая наличие магнитной аномалии на дне озера. Весной 2013 г. местными жителями из полыньи при помощи магнита вытаскивались мелкие фрагменты метеорита, коллекция только одного из жителей включает фрагменты полной массой около 1,7 кг (массы отдельных экземпляров – от 0,002 до 0,1 кг). В октябре 2013 г. со дна озера были подняты фрагменты метеорита (массами от 0,9 до 8 кг), включая главную массу с наибольшими размерами по осям 88×66×62 см и примерной массой 540 кг [Кочеров и Тюменцев, 2014], фрагмент с массой 65 кг откололся от основного фрагмента при подъеме. Возможно, какие-то фрагменты (массами в кг или десяток кг) еще находятся на дне озера, но нет оснований полагать, что там имеется фрагмент, сравнимый с главной массой. Полная масса вытащенных на данный момент фрагментов превышает 625 кг.

Оценки выпавшей массы

Бадюков и др. (2014) предполагают, что асимметричный характер распределения обусловлен сложным процессом фрагментации, и предлагают представить распределение фрагментов суммой трех независимых лог-нормальных распределений со средними значениями масс в 0,8, 1,6 и 54 г, соответственно. Авторы предполагают, что существование как минимум трех независимых групп метеоритов может соответствовать трем последовательным стадиям разрушения метеороида. Используя аппроксимированное распределение, авторы оценивают полную массу выпавших фрагментов примерно в 140 тонн. Хотя авторы рассматривают эту оценку как нижнюю, скорее всего, это завышенное значение. Наблюдаемое распределение фрагментов можно аппроксимировать различными законами распределения [Gritsevich et al., 2013], каждый из которых приведет к своему значению полной массы. Кроме того, нет уверенности в том, что распределение, описывающее набор фрагментов с суммарной массой 69 кг, можно экстраполировать на гораздо большее число фрагментов с полной массой, большей на три порядка. Предположение о трех последовательных стадиях разрушения метеороида также сильно упрощает наблюдавшуюся картину разрушения.

Полная масса, которую определили Бадюков и др. (2014), была получена в предположении, что масса наибольшего фрагмента составляет 3,4 кг. Авторы также попытались оценить массу наибольшего фрагмента, основываясь на кумулятивном распределении для тысячи фрагментов и его представлении в виде степенной функции $N \sim m^{-1.296}$ в интервале масс 30–300 г, (это другое распределение, чем ранее рассматривавшееся лог-нормальное, чье кумулятивное распределение выражается через функцию ошибок). Авторы оценивают массу наибольшего фрагмента в 400–2000 кг для 100 и 1000 тонн полной массы.

Кумулятивное распределение для 1697 фрагментов приведено на рис. 10, аппроксимация в виде степенной функции соответствует $dN \sim m^{-0.5}\, d\,(\log m)$ в диапазоне масс 10–300 г, что близко к значению показателя степени (–0,6), характерному для катастрофического разрушения и найденному в [Jenniskens et al., 1994] для

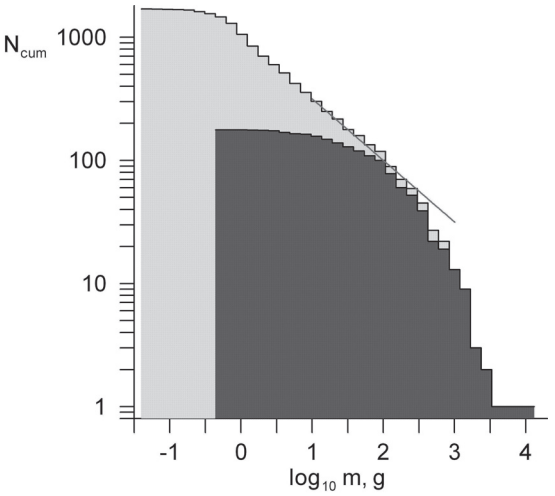


Рис. 10. Кумулятивное распределение собранных фрагментов метеорита (1697 – серое, 178 – черное)

распределения фрагментов метеорита Мбале. В диапазоне масс меньших 10 г велика вероятность неполного сбора фрагментов из-за их малого размера, а в диапазоне масс больших 300 г – из-за редкой встречаемости и большой площади поля рассеяния [Бадюков и др., 2014].

Данные, представленные в Таблицах S13 и S14 статьи [Popova et al., 2013] позволили описать эти фрагменты лог-нормальным законом распределения и оценить полную массу как >790 кг. Эти данные содержат информацию о примерно 92 кг метеоритов, что соответствует линейной плотности 6 кг/м. Это оценка снизу. Другая оценка линейной плотности была получена при анализе коллекции В. Кубрина, который оценил, что его находки составляют только 10% от всего материала, собранного на площади примерно в 0,23 км^2 [Popova et al., 2013]. Тогда массовая плотность составляет 57 кг/км^2 в этом районе. При предположении, что поле рассеяния имеет ширину порядка 2 км (основываясь на сравнении с полем рассеяния Алмахаты Ситты [Jenniskens et al., 2009]), линейная плотность составит 114 кг/м. По аналогии с предыдущими падениями метеоритов можно предположить, что линейная плотность метеоритов постоянна по траектории, тогда полную выпавшую массу между Александровкой и Депутатским можно оценить примерно в 3000 кг. Если та же плотность сохраняется и дальше (до места находки 1,8 кг фрагмента), то полную массу можно оценить в 5100 кг. Конечно, точность этих оценок невысока, зависит от целого ряда предположений (эффективной ширины поля рассеяния, постоянства линейной плотности, точности оценки доли метеоритов, попавших в коллекцию В. Кубрина и т.д.).

Как уже упоминалось, фрагменты в районе Александровка-Депутатский образовались в основном на высотах 30–40 км. Фрагменты, продолжившие свой полет дальше по траектории до 25 км высоты и ниже, образовали западную часть поля рассеяния. Эти фрагменты, как указано выше, могут добавить около 1000 кг в виде 20–2000 метеоритов разной массы и могут оказаться разбросаны в области до 70 км от точки максимальной яркости. Таким образов, консервативная оценка составляет 4000–6000 кг, то есть 0,03–0,05% от начальной массы.

Существуют разные оценки количества выпавшего вещества в долях от начальной массы. Модель прогрессивной фрагментации (с разрушением на два фрагмента [Bland and Artemieva, 2006] для каменных метеороидов оценивает эту долю в 5–15%,

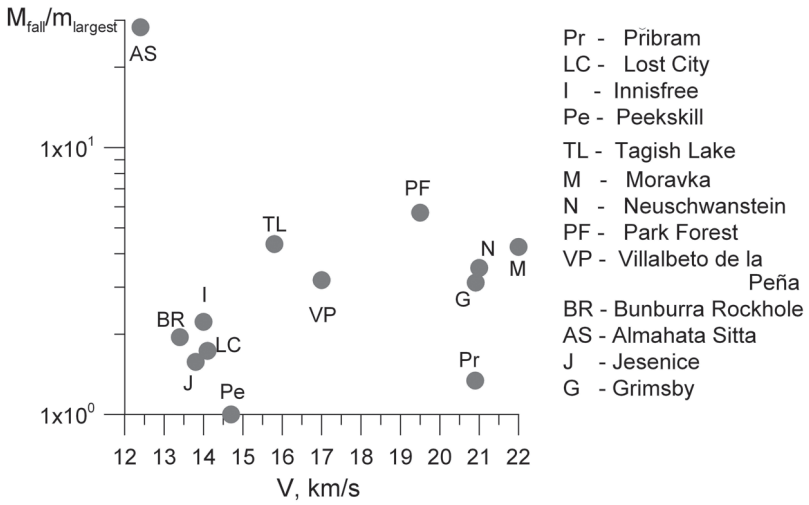


Рис. 11. Соотношение полной собранной массы и массы наибольшего фрагмента для 13 метеоритов

ее применение к Челябинскому событию соответствует примерно 6%. Данные для 13 метеоритов, чей вход был зарегистрирован и начальные массы были оценены разными методами, приведены в [Popova et al., 2011]. Типичные значения для падений обыкновенных хондритов составляют 0,1–3%, наибольшее значение примерно 10% достигается для двух наиболее медленных и небольших метеоритов (Иннисфри и Лост-Сити, $M \sim 40$–160 кг, $V \sim 14$ км/с). Наименьшие значения наблюдались у более неоднородных и пористых метеоритов, таких как углистый хондрит Тагиш Лэйк и полимиктовый урелит Алмахата Ситта – 0,01–0,02%, при падении которых также, как и в случае Челябинского метеороида, наблюдалось образование пылевых облаков, то есть их разрушение шло катастрофическим образом и сопровождалось образованием большого количества мелких фрагментов и пыли [Popova, 2011]. По аналогии с известными событиями, можно оценить массу Челябинских метеоритов в 1300 тонн при доле 10%, 130 тонн при доле в 1%, в 1,3 тонны при доле 0,01%.

Halliday et al. (1989) оценивают отношение полной выпавшей массы к массе наибольшего фрагмента как 1,25–4. Данные по 13 падениям (рис. 11) показывают, что полная найденная масса больше, чем наибольший найденный фрагмент, в среднем в 4,8 раза (от 1 до 28 раз). Если считать, что масса наибольшего фрагмента ЧМ, поднятого из озера Чебаркуль, составляет около 600 кг, то полная масса метеоритов составит 3000 кг. Для 11 из 13 падений, рассмотренных в работе [Popova et al., 2011], имеются оценки полной выпавшей массы, полученные тем или иным образом. Конечно, эти оценки весьма приблизительны и не очень достоверны. В среднем, собранная масса составляет около 30% от ожидаемой (хотя разброс значений очень велик – от 2 до 92%). В таком случае, можно ожидать, что полная выпавшая масса составит 9000 кг.

Поле рассеяния

Как уже отмечалось, полное поле рассеяния достигает в длину 80 км и нескольких км в ширину. На рис. 12 отмечено положение 178 фрагментов и 21 группа

фрагментов, чьи координаты опубликованы в [Popova et al., 2013]. В основном это фрагменты, относящиеся к группам А и В по терминологии Бадюкова и др. (2014), образовавшиеся как во время наибольшего энерговыделения, так и на более низких высотах. Сравнение этой части поля рассеяния с результатами моделирования приведено на рис. 12.

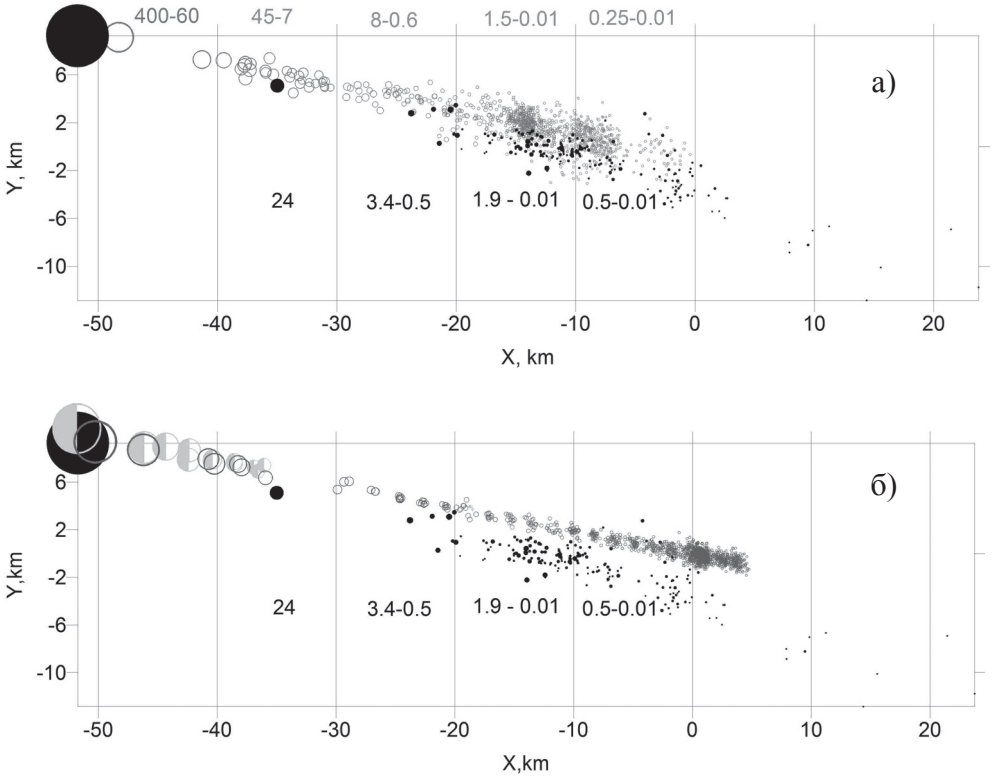


Рис. 12. Часть поля рассеяния, черные кружки – собранные фрагменты метеоритов, на двух панелях показаны три модельных реализации (серые символы)

При моделировании ставилась цель воспроизвести кривые блеска и торможения, а не поле рассеяния, тем не менее, модельное поле рассеяния не противоречит наблюдаемому. На рис. 12,а отмечен диапазон масс фрагментов в пределах нескольких зон поля рассеяния (черные цифры – собранные фрагменты; серые – одна из модельных реализаций), которые согласуются друг с другом. Наибольший фрагмент в этой реализации составлял 190 кг и его место падения оказывается чуть восточнее, чем полынья на озере (большой черный кружок). Позиция фрагментов в 3,4 кг и в 24 кг согласуется с модельным полем рассеяния. Ветер, который приближенно учитывался в этой реализации, приводит к заметному сносу наиболее легких фрагментов. Полное число фрагментов в этом случае составляет около 1200.

Число и размер фрагментов, их местоположение в поле рассеяния меняется в модели от реализации к реализации. Две другие модельные реализации показаны на рис. 12,б (без учета ветра). Наибольшие фрагменты здесь составляют 300 и 400 кг, и располагаются ближе к полынье. Одна из этих реализаций соответствует увели-

ченной прочности фрагментов (наибольший из них не разрушился даже при нагрузке порядка 16,5 МПа) и небольшому числу фрагментов в каждом разрушении, поэтому в этой реализации почти не образуется мелких фрагментов.

Соответствующие распределения фрагментов по массе показаны на рис. 13. К сожалению, информация о поле рассеяния не полна, число найденных крупных фрагментов (>1 кг) пока невелико. Возможно, какие-то фрагменты еще будут найдены, возможно, модель предсказывает слишком много крупных фрагментов.

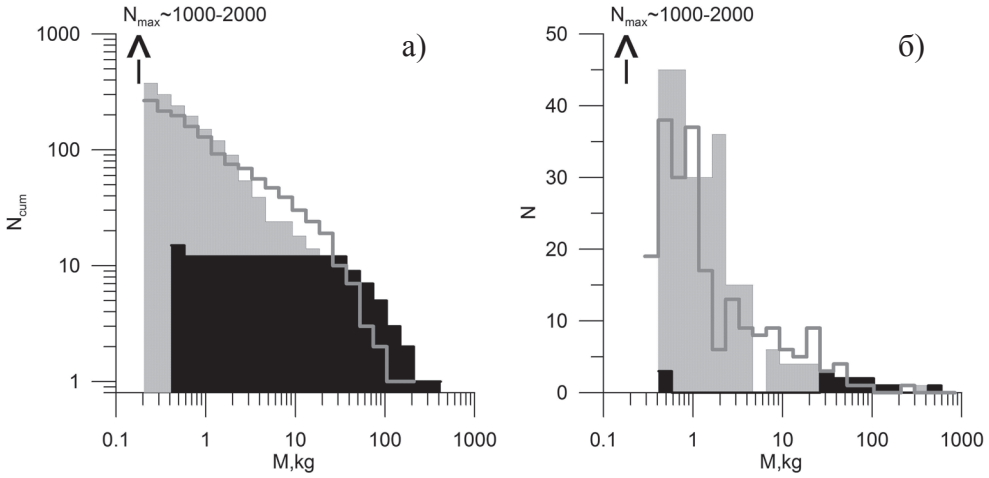


Рис. 13. Распределение фрагментов (а – кумулятивное, б – дифференциальное) в трех модельных реализациях (наименьшее число фрагментов соответствует реализации, показанной на рис. 12,б)

Распределение фрагментов метеорита на поверхности зависит как от распределения образующихся фрагментов, так и от последующего процесса абляции. Особенно существенным оказывается влияние процесса абляции на фрагменты, летящие вместе, когда условия в горячей области приводят к более интенсивному испарению и сгоранию фрагментов, чем при полете отдельных фрагментов. Чем больше тело, тем, возможно, большая часть массы в виде фрагментов, продолжает лететь вместе, что и приводит к большей величине испарившейся массы, и, соответственно, меньшей доли массы, выпавшей в виде метеоритов.

Какая-то часть метеороида имела большую прочность, чем предполагалось в модели, и именно это позволило крупному фрагменту (массой >500 кг) долететь до озера, не разрушившись. Этот фрагмент должен был иметь прочность большую 15 МПа, что больше, чем наблюдалось при входе болидов, где верхняя граница прочности составляла 10 МПа [Popova et al., 2011]. Только для метеороида, вызвавшего образование кратера Каранкас, прочность оценивалась в 18 МПа [Borovicka and Spurny, 2008].

Заключение

Представлена световая кривая (кривая блеска) болида, проведено сравнение результатов различных авторов. Кривая блеска является наиболее точной оценкой

профиля энерговыделения в атмосфере. Для световой кривой Челябинского болида характерно наличие нескольких явно выраженных вспышек излучения, связанных с разрушением метеороида. Явно можно выделить рост интенсивности за, примерно, 4 сек до максимума, сам максимум, вспышку через секунду позже. Это соответствует высотам примерно в 45, 30 и 24–25 км.

Предложена модель взаимодействия ЧМ с атмосферой, позволяющая описать наблюдательные данные. Наиболее подходящим описанием Челябинского события может быть гибридная модель, в которой предполагается, что одна часть начальной массы образует облако фрагментов и паров, а другая – независимо летящие фрагменты, продолжающие разрушаться дальше.

Разрушение метеороида началось на высотах порядка 45–50 км при нагрузках порядка 0,2–0,7 МПа, наиболее интенсивно протекало на высотах около 30 км и продолжалось вплоть до высоты около 20 км. Прочность различных фрагментов метеороида варьировалась сильнее, чем предсказывает простой закон увеличения прочности с уменьшением размера. Множественные мелкие фрагменты, собранные в районе Депутатского, были образованы на высотах 30–50 км. Крупнейший фрагмент, размером в несколько сот килограммов, мог достичь озера Чебаркуль. Должны существовать и другие фрагменты с массами порядка нескольких кг или десятков килограммов в передней (западной) части эллипса рассеяния. Сложный характер фрагментации приводит к сложному распределению фрагментов по массе. Результаты моделирования не противоречат наблюдениям.

Приведены различные оценки полной выпавшей массы, наиболее вероятной представляется оценка в 4000–10 000 кг, что составляет 0,03–0,06%. Низкая доля массы метеоритов по отношению к начальной массе метеороида объясняется, скорее всего, именно его интенсивным разрушением на большое число фрагментов, которые не успевают разделиться и продолжают лететь в общей горячей светящейся области, где их абляция происходит более эффективно.

Литература

Бадюков Д.Д., Дудоров А.Е., Хаибрахманов С.А. Распределение фрагментов Челябинского метеорита по массам // Вестник Челябинского университета, 2014. 330 (1), с. 40–46.

Григорян С.С. (1979) Движение и разрушение метеоритов в планетных атмосферах // Космические исследования. 17. С. 875–893.

Голубь А.П., Косарев И.Б., Немчинов И.В., Шувалов В.В. Излучение и абляция крупного метеороида при его движении сквозь атмосферу Земли // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. № 3. С. 213–228.

Голубь А.П., Косарев И.Б., Немчинов И.В., Попова О.П. Спектры излучения ярких болидов // Астрономический вестник. 1997. Т. 31. № 2. С. 99–112.

Дудоров А.Е., Майер А.Е. Разрушение Челябинского метеороида в атмосфере / В: Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / Ред. Н.А. Антипин и др. Челябинск, 2014. С. 136–150.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013, 47, с. 1–16.

Кочеров А.В., Тюменцев В.А. Фрагменты метеорита Челябинск из озера Чебаркуль // В: Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции / ред. Н.А. Антипин и др. Челябинск, 2014, с. 348–354.

Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М.: Изд. АН СССР, 1956. 294 с.

Попова О.П., Немчинов И.В. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли // Катастрофические воздействия космических тел / Ред. Адушкин В.В., Немчинов И.В. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. С. 92–117.

Цветков В.И. Сихотэ-Алинский метеоритный дождь: дробление, рассеяние, траектория и орбита // Метеоритика. 1987. Вып. 46. С. 3–10.

Цветков, В.И., Скрипник А.Я. Атмосферное дробление метеоритов с точки зрения механической прочности // Астроном. вестн. 1991, 25, № 3, с. 364–371.

Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Гигантские болиды в атмосфере Земли // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 3. С. 241–251.

Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением челябинского космического тела 15 февраля 2013 г. Настоящий сборник.

Artem'eva N.A., Shuvalov V.V. Interaction of shock waves during passage of disrupted meteoroid through atmosphere // Shock Waves. 1996. V. 5. № 6. P. 359–367.

Artemieva N. and Shuvalov V. 2001. Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // JGR 106: 3297–3310.

Avramenko M., Glazyrin, I., Ionov G., Karpeev A.* Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide // J. Geophys. Res. 2014; DOI: 10.1002/2013JD021028.

Baldwin A., Y. Sheaffer Ablation and breakup of large meteoroids during atmospheric entry // J. Geophys. Res. 76, pp. 4653–4668 (1971).

Bland P., N. A. Artemieva The rate of small impacts on Earth. Meteorit // Planet. Sci. 41, pp. 607–631 (2006).

Borovička, J., Spurny, P., 2008. The Caranacas meteorite impact – encouter with a monolithic meteoroid // Astron. Astrophys. 485, L1–L4.

Borovička J., O.P. Popova, I.V. Nemtchinov, P. Spurný Z. Ceplecha. Bolides produced by impacts of large meteoroids into the Earth's atmosphere: Comparison of theory with observations. I. Benesov bolide dynamics and fragmentation // Astron. Astrophys. 334, pp. 713–728 (1998).

Borovička J. and 6 co-authors. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013, v. 503, p. 235–237.

Boslough M., D. Crawford, A. Robinson,. Trucano T. Mass and penetration depth of Shoemaker-Levy 9 fragments from time-resolved photometry // Geophys. Res. Lett. 21, pp. 1555–1558 (1994).

Brown P.G., Spalding R.E., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Worden, S.P. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth // Nature 420: 294–296.

Brown P.G. and 32 co-authors (2013) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature 503: 238–241.

Ceplecha Z., D.O. Revelle Fragmentation model of meteoroid motion mass loss and radiation in the atmosphere // Meteorit. Planet. Sci. 40, pp. 35–54. (2005).

Ceplecha Z., P. Spurny, J. Borovička, Keclikova J. Atmospheric fragmentation of meteoroids // Astron. Astrophys. 279, pp. 615–626. (1993).

Ceplecha Z., J. Borovička, W.G. Elford, D.O. ReVelle, R.L. Hawkes, V.Í. Porubčan, Šimek M. Meteor phenomena and bodies // Space Sci. Rev. 84, pp. 327–471. (1998).

Chyba C.F., Thomas P.J. and Zahnle K.J. 1993. The 1908 Tunguska explosion – Atmospheric disruption of a stony asteroid // Nature 6407:40–44.

Frost M.J. Size and spacial distribution in meteoritic showers // Meteoritics. 1969. V. 4. № 3. P. 217–232.

Golub'A.P., I.B. Kosarev, I.V. Nemtchinov, Popova O.P. Emission spectra of bright bolides // Sol. Syst. Res. 31, pp. 85–98. (1997).

Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., Silva A.M.; Dudorov A.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophysical Research Letters. 2013, v.40, p. 4728–4733.

Gritcevich, M., Vinnikov, V., Kohout, T., Toth, J., Peltoniemi, J., Turchak, L. & Virtanen, J. A comprehensive study of distribution laws for the fragments of Kosice meteorite // Meteoritics and Planetary Science. 2014. 49, 3, p. 328–345.

Hills J.G., Goda M.P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere // Astron. J. 1993. V. 105. № 3. P. 1114–1144.

Halliday, I., A.T. Blackwell, A.A. Griffin. The flux of meteorites on the earth's surface // Meteoritics. 1989. V. 24. P. 173–178.

Jenniskens P., Betlem H., Betlem J. et al. 1994. The Mbale meteorite shower // Meteoritics 29, p. 246–254.

Jenniskens P., and 34 colleagues, 2009. The impact and recovery of asteroid 2008 TC_3 // Nature. 458, p. 485–488.

Passey Q.R. and Melosh H.J. 1980. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus 42: 211–233.

Popova O. Meteoroids ablation models // Earth, Moon, and Planets (2005) 95: 303–319.

Popova O. Passage of Bolides Through the Atmosphere. Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies Proc // Meteoroids Conference Breckenridge Colorado USA May 24–28 2010. W.J. Cooke, D.E. Moser, B.F. Hardin, D. Janches, Eds.NASA/CP-2011-216469 p. 232 (2011).

Popova O., J. Borovička, W.K. Hartmann, P. Spurný, E. Gnos, I. Nemtchinov, Trigo-Rodríguez J.M. Very low strength of interplanetary meteoroids and small asteroids // Meteorit. Planet. Sci. 46, p. 1525–1550 (2011).

Popova O.P. and 59 co-authors. Chelyabinsk airburst, damage assessment, veteorite Rrecovery, and characterization // Science. 2013, v. 342, Issue 6162, p. 1069–1073.

Shuvalov V.V., N.A. Artemieva. Numerical modeling of Tunguska-like impacts // Planet. Space Sci. 50, p. 181–192 (2002).

Svetsov V.V., I.V. Nemtchinov, Teterev A.V. Disintegration of large meteoroids in Earth's atmosphere: Theoretical models // Icarus. 116. P. 131–153 (1995).

ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО СПЕКТРУ МОЩНОСТИ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.С. Рыбнов, О.П. Попова, В.А. Харламов

В статье рассмотрены вопросы оценки энергии Челябинского болида по длиннопериодным инфразвуковым колебаниям атмосферного давления. Предложена методика, в которой используется интегральная зависимость энергии от спектра мощности. Полученные результаты достаточно удовлетворительно совпадают с данными, полученными в других работах.

Введение

Оценки энергии Челябинского болида посвещено большое количество работ. Так в [Popova et al., 2013; Brown et al., 2013; Емельяненко и др., 2013; Рыбнов и др., 2013] на базе собранных и проанализированных инфразвуковых данных и данных

по разрушению остекления зданий энергия болида была оценена от 380 [Емельяненко и др., 2013] до 900 кт [Brown et al., 2013].

Инфразвуковые сигналы болидов, в том числе зарегистрированные станциями Международной системы мониторинга, исследовались в целом ряде работ, например в [Revelle, 1997; Edwards et al., 2006; Edwards, 2010; Silber et al., 2009; Ens et al., 2012; Stevens et al., 2006].

В этих работах показано, что характер волнового излучения зависит от количества выделенной в атмосферу энергии, ее распределения в атмосфере и параметров самой атмосферы. ReVelle (1997), Цикулин (1969) рассматривали возможность применения взрывной аналогии к оценке энергии болида, было показано, что на расстояниях порядка нескольких сотен километров инфразвуковые волны от космических тел по энергетическим характеристикам находятся в хорошем согласии с волнами от химических взрывов.

Анализ спектрограмм показал, что для источников взрывного типа в спектре сигналов наблюдается характерная частота $f_{хар}$, превалирующая над другими. Были разработаны функциональные зависимости [Stevens et al., 2006; Ens et al., 2012; Рыбнов и др., 2013] позволяющие оценивать энергию источника по характерной частоте. Погрешность оценок не превышает 2-х раз.

Для оценки энергии источника использовалась функциональная зависимость вида

$$\lg q \approx a - b \cdot \lg f - c \cdot \lg R + d, \qquad (1)$$

где f – частота в Гц, R – расстояние в км. Значения коэффициентов a, b и c в уравнении получены путем построения регрессивных зависимостей методом наименьших квадратов и равны: $a \approx 0{,}65$, $b \approx 2{,}3$, $c \approx 0{,}49$. Влияние сезонных вариаций стратосферного ветра и азимута из источника на пункт регистрации учтены в виде добавки d к основной функциональной зависимости.

Функциональная зависимость (1) была получена на основании анализа волновых форм инфразвуковых возмущений в диапазоне частот 0,02÷0,3 Гц. Объем выборки составил около 100 сигналов от взрывов, проведенных на высотах от $35q^{1/3}$ до 5000 м, где q – тротиловый эквивалент в кт [Stevens et al., 2006]. Сигналы регистрировались на эпицентральных расстояниях от 500 до 5000 км. Распределение числа взрывов от их энергии приведено на рис. 1. Как видно из рис. 1, основной вклад (до 68%) в оценку энергии источника по приведенной выше зависимости вносят взрывы мощностью 20÷150 кт. Частотный диапазон инфразвуковых сиг-

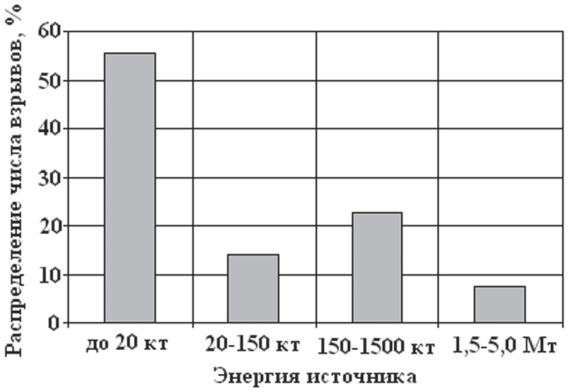


Рис. 1. Распределение взрывов, использовавшихся для получения функциональной зависимости (1), от их энергии

налов от взрывов такой мощности лежит в интервале от 0,3 (q < 20 кт) до 0,02 Гц (q < 300 кт). Поэтому оценки мощности, полученные по зависимости (1), применимы для источников, сигналы которых находятся в частотном диапазоне 0,02÷0,3 Гц.

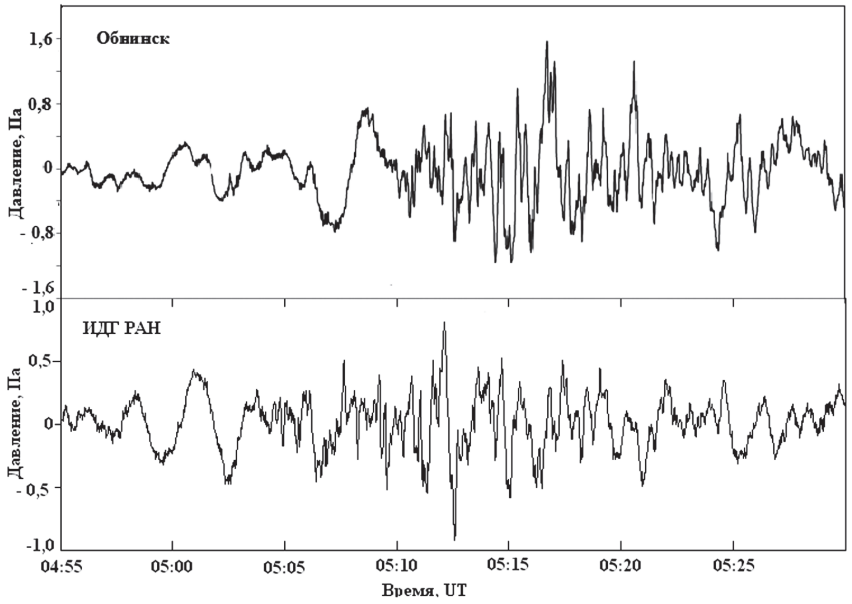


Рис. 2. Волновые формы сигналов, зарегистрированные в западном направлении

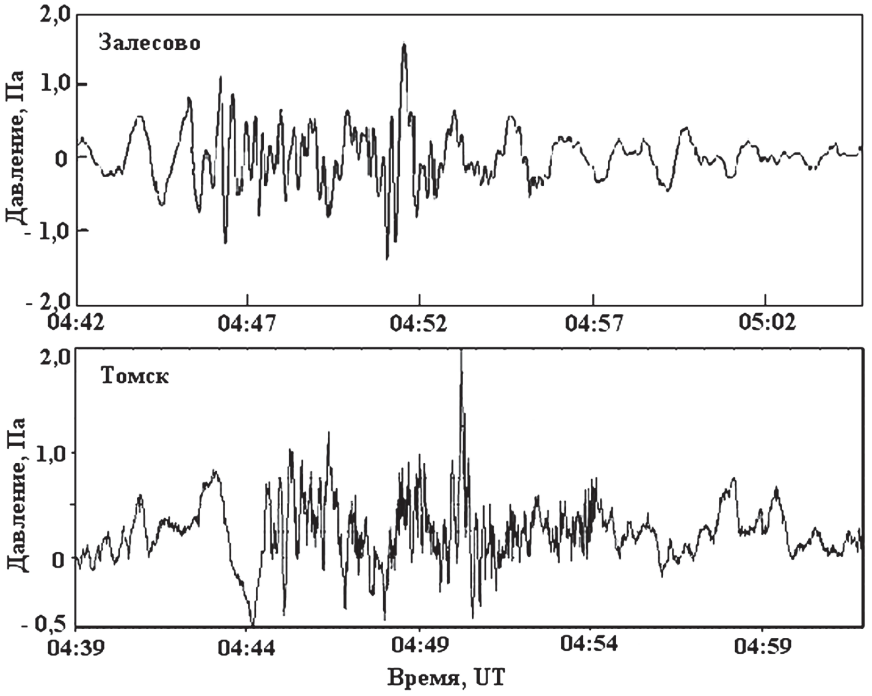


Рис. 3. Волновые формы сигналов, зарегистрированные в восточном направлении

Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления

По волновым формам сигналов, приведенных на рис. 2–3, и их спектрам (см. рисунки 4, 5) видно характерное низкочастотное вступление ($f \approx 0{,}005$ Гц) как для сигналов, распространяющихся в восточном, так и западном направлениях. Колебания с такими частотами являются первой нормальной частотой атмосферы и возбуждаются при достаточно мощных взрывах [Бреховских, 1957]. В реальной атмосфере волна от мощного взрыва «распадается» на группы волн, распространяющихся самостоятельно со своей скоростью [Бреховских, Лысанов, 1982; Блохинцев, 1981]. Это так называемые нормальные волны для волновода с переменной скоростью звука по высоте, частота которых может быть оценена как [Бреховских, Лысанов, 1982]

$$f_i = \frac{c \cdot (i + \frac{1}{2})}{2 \cdot z}$$

где z – высота стратосферы, i – номер волны.

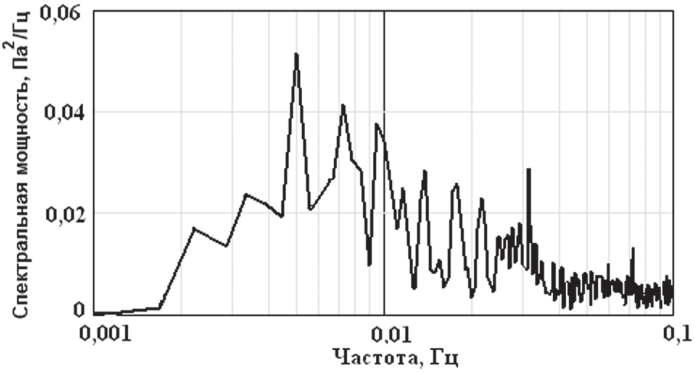


Рис. 4. Спектр сигнала зарегистрированного в ИДГ РАН.
Основные частоты: 0,005 Гц (200 с → 3,3 мин); 0,0072 Гц (139 с → 2,3 мин); 0,0094 Гц (106 с → 1,77 мин); 0,0139 Гц (72 с → 1,2 мин); 0,0178 Гц (56 с → 0,94 мин); 0,0217 Гц (46 с → 0,77 мин)

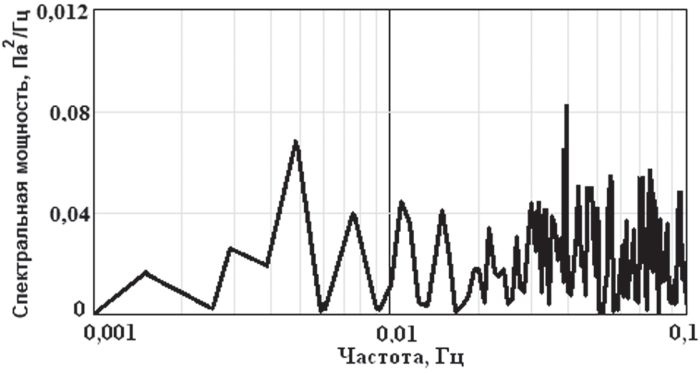


Рис. 5. Спектр сигнала зарегистрированного в Томске.
Основные частоты: 0,0049 Гц (204 с → 3,4 мин); 0,0075 Гц (133 с → 2,2 мин); 0,011 Гц (91 с → 1,5 мин); 0,015 Гц (67 с → 1,1 мин); 0,021 Гц (48 с → 0,8 мин)

В табл. 1 приведены значения частот первых пяти нормальных волн. Для сравнения в таблице приведены основные частоты, зарегистрированные в ИДГ РАН. Видно хорошее совпадение. Максимальная погрешность не превышает 18%, при среднем значении равном 8%.

Таблица 1

Номер волны	Расчет, частота/период	Измерения, частота/период
1	0,005 Гц/202 сек	0,005 Гц/202 сек
2	0,008 Гц/120 сек	0,0072 Гц/139 сек
3	0,012 Гц/87 сек	0,0094 Гц/106 сек
4	0,015 Гц/67 сек	0,0139 Гц/72 сек
5	0,018 Гц/55 сек	0,0178 Гц/56 сек

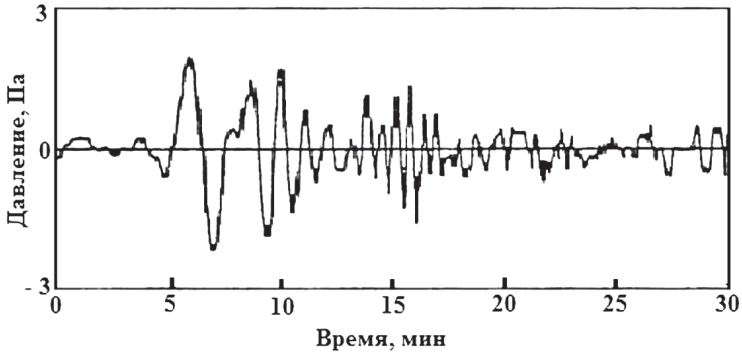


Рис. 6. Инфразвуковой сигнал от мощного взрыва ($q \approx 2{,}4$ Мт) в атмосфере на расстоянии ≈2400 км

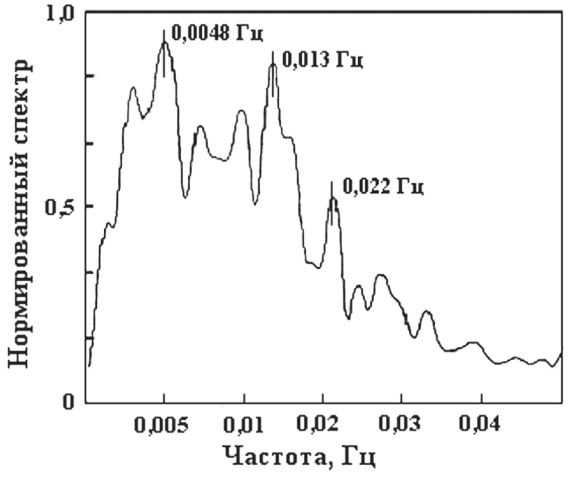


Рис. 7. Спектр инфразвукового сигнала от мощного взрыва

Пример такого сигнала, зарегистрированного на расстоянии 2400 км в восточном направлении от воздушного взрыва мощностью 2400 кт, приведен на рис. 6, а его спектр на рис. 7. Мощность такого взрыва, оцененная по (1), равна ≈1200 кт. Это может быть связано с тем, что его характерная частота лежит в более низкой области, чем та, для которой была получена зависимость (1). Оценка мощности источника по зависимостям типа (1), полученная в [Ens et al., 2012; Рыбнов, 2013] для длиннопериодных колебаний, может привести к большой погрешности. Поэтому предлагается другой подход к оценке мощности источника. Спектральный состав, регистрируемой при мощном энерговыделении акустической волны, является важнейшей ее характеристикой, поскольку при распространении на большие расстояния играют роль процессы, которые зависят от частоты (дисперсия, рассеяние, поглощение, отражение и др.) [Губкин, 1978].

Так, если на определенном расстоянии R спектр акустического сигнала от взрывного источника равен $S(\omega)$, то в рамках приближенной модели стратосферы, с учетом расстояния до источника, его высоты, давления в волне можно представить в виде следующего разложения в интеграл Фурье [Пеликовский и др., 1979; Голубев и др., 1986].

$$P(t) = R\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)\cdot f(r,\omega,z,z_h)\cdot e^{-i\omega t}d\omega,$$

$$\varphi(r,\omega,z,z_h) = \frac{ik}{2}\int_{-\pi/2+i\infty}^{\pi/2-i\infty} \frac{[\exp(-bz_{\min}) + V_g\exp(bz_{\min})]\cdot\{\exp(bz_{\max}) + V_t\exp[-b(z_{\max}-2\cdot\Delta z)]\}}{1 - V_gV_t\exp(2bz_m)} \times$$

$$\times H_0^{(1)}(kr\sin\theta)\sin\theta\cdot d\theta, \qquad (2)$$

где: $P(t)$ – давление, $S(\omega)$ – спектр сигнала, φ – функция источника, z – высота стратосферы; z_h – высота источника; $z_m \approx 50$ км – характерная высота верхней границы стратосферы; $k = \omega/c$ – волновое число; $b = ik\cos\theta$; θ – угол падения, V_g – коэффициент отражения от поверхности Земли, V_t – коэффициент отражения от верхней границы стратосферы; $z_{\min} = z - z_h$; $z_{\max} = z + z_h$; Δz – высота однородного слоя, $H_0^{(1)}(kr\sin\theta)\sin\theta\cdot d\theta$ – функция Ханкеля первого рода.

Таким образом, спектр зарегистрированного сигнала включает в себя информацию не только о параметрах источника (мощность, высота), но и о характеристике трассы распространения (расстояние, коэффициенты отражения).

Поэтому для оценки энергии источника предложено использовать интегральную зависимость энергии от спектра сигнала:

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi\rho c}\int_{\omega} S^2(\omega)\cdot d\omega, \qquad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, c – скорость звука, $S(\omega)$ – спектр сигнала.

Суть методики заключается в следующем. Были выбраны сигналы от источников с q от 330 до 2400 кТ на расстояниях 1700–3500 км (всего 24 сигнала). Вычисленные спектры нормировались на величину $\sqrt[3]{E_0}$, где E_0 – энергия источника в кт. На рис. 8 показан усредненный приведенный спектр для источников с тротиловым эквивалентом в диапазоне от 330 до 2400 кт. По оси абсцисс отложена величина $\omega\cdot\sqrt[3]{E_0}$, а по оси ординат – отношение спектральной энергии на каждой частоте к полной энергии по всему спектру, так что площадь под кривой равна единице. Максимум распределения приходится в среднем на $\omega\cdot\sqrt[3]{E_0} \approx 0{,}4$. Тогда энергию источника можно будет оценить как

$$E_0 = (0{,}4/\omega)^3 = (0{,}4/2\pi\cdot f_{\max})^3 \approx (0{,}064/f_{\max})^3 \qquad (6)$$

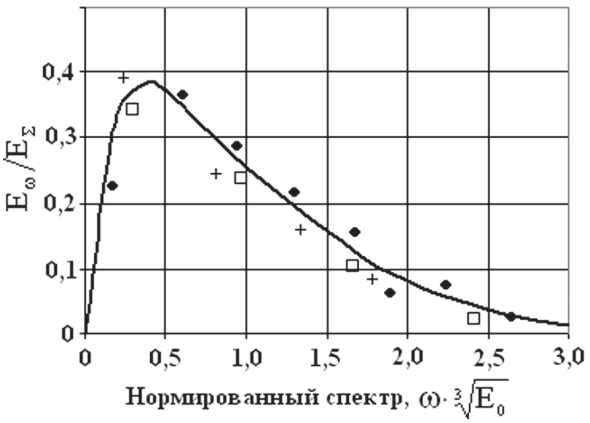


Рис. 8. Нормированный спектр инфразвуковых сигналов (● – q = 330 кт; + – q = 1400 кт; □ – q = 2400 кт)

Оценим по данной методике энергию взрыва, спектр которого приведен на рис. 7. Энергия составит 2330 кт, что хорошо совпадает с ее реальным значением. Оценка энергии Челябинского болида по данной методике равна ≈2000 кт, учитывая различие между ядерными и химическими взрывами в 2 раза по эквиваленту [Reed, 1972; Губкин, 1969] это соответствует примерно энергии ≈1000 кт. Такая оценка отличается в большую сторону по сравнению с оценками, приведенными в работах [Popova et al., 2013; Рыбнов и др., 2013], где верхняя оценка энергии равна ≈720 кт, но близка к верхней границе оценки, приведенной в [Brown, 2013] ~900 кт.

В Рыбнов и др. (2013) и Popova et al. (2013) также были сделаны оценки по экспериментальным зависимостям, связывающим характерную частоту спектра $f_{хар}$ с энергией источника. Но те зависимости были получены для другого диапазона частот, который не включал собственные частоты атмосферы, и поэтому не могут быть использованы для оценки по длиннопериодным колебаниям. Длиннопериодные колебания (≈100÷200 с) характерны для источников большой мощности (>300 кт), которые возбуждают собственные колебания атмосферного волновода.

Заключение

В работе предложен новый подход к оценке энергии источника взрывного типа по инфразвуковым измерениям. Из волновых форм зарегистрированных сигналов видны характерные низкочастотные колебания как для сигналов, распространяющихся в восточном, так и западном направлениях. Колебания с такими частотами возбуждаются на первых собственных частотах атмосферы при наличии мощного источника энергии.

Спектр инфразвуковых сигналов включает в себя информацию не только о параметрах источника (мощность, высота), но и о характеристике трассы распространения (расстояние, коэффициенты отражения). Поэтому для оценки энергии источника предложено использовать интегральную зависимость энергии от спектра мощности сигнала.

Была разработана методика, которая тестировалась по базе данных. Для проверки использовались данные по волновым формам и спектрам от взрывов мощно-

стью от 330 до 2400 кт на расстояниях 1700–3500 км. Получено хорошее совпадение оценок с реальной мощностью взрыва. По разработанной методике была оценена энергия Челябинского болида равная ≈1000 кт. Полученная оценка несколько завышена по сравнению с данными, приведенными в [Popova et al., 2013] и в других работах [например Brown, 2013; Емельяненко и др., 2013]. Такое расхождение требует дальнейших исследований.

Литература

Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды / М.: Наука, 1981. 207 с.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд. АН СССР, 1957. 502 с.

Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.

Голубев В.Н., Орлов Е.Ф., Петухов Ю.В. Спектральные характеристики импульсных сигналов многократно отраженных от слоистого дна и поверхности океана / Акуст. журнал, № 4, т. 32, 1986. С. 462–467.

Губкин К.Е. О подобии взрыва // ФАО АН СССР, № 10, 1978. С. 49-60.

Емельяненко В.В, Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. / Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.

Пелиновский Е.Н., Петухов Ю.В., Фридман В.Е. Приближенные уравнения распространения мощных акустических сигналов в океане / Изв. АН СССР. ФАО, № 4, т. 15, 1979. С. 436–444.

Петухов Ю.В., Фридман В.Е. Распространение взрывных волн в стратифицированном океане / Изв. АН СССР. ФАО, № 12, т. 15, 1979. С. 1307–1315.

Рыбнов Ю.С., Попова О.П., Харламов В.А. и др. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2013. С. 21–32.

Цикулин М.А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел // Изд. «Наука», Москва, 1969. 86 с.

Brown PG and 32 co-authors (2013) A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature 503: 238–241.

Edwards W.N. Meteor generated infrasound: theory and observation. In: Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. Le Pichon, A., Blanc, E., Hauchecorne, A. (Eds.),Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 361–414 (2010).

Ens T.A., Brown P.G., Edwards W N., Silber E.A. Infrasound production by bolides: A global statistical study // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 80, 208–229 (2012).

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Reed J.W. Atmospheric attenuation of explosion waves / J. Acoust. Soc. Amer, 1977, v. 61, № 1. P. 39–47.

ReVelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides usingacoustic-gravity waves. In: Annals of the New York academy of sciences, near-earth objects – the United Nations international conference, Remo J.L. (ed.), New York Academy of Sciences, 822, 284–302 (1997).

Silber E., ReVelle D.O., Brown P., Edwards W. (2009) An estimate of the terrestrial influx of large meteoroids from infrasonic measurements. JGR, V. 114, E 08006.

Stevens J.L., Adams D.A., Baker G.E., Xu H., Murphy J.R., Divnov I., Bourchik V.N. (2006) Infrasound Modeling Using Soviet Explosion Data and Instrument Design Criteria from Experiments and Simulations // Technical Report ADA446517S.

ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ЧЕЛЯБИНСКОГО СОБЫТИЯ

М.Ю. Кузьмичева, Т.В. Лосева, А.Н. Ляхов

В статье обсуждаются результаты регистрации возмущений в ионосфере Земли, наблюдавшихся после падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 года. Представлены результаты трехмерных газодинамических расчетов, позволяющие объяснить механизм формирования этих возмущений.

Введение

Процесс пролета через атмосферу Земли Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. вызвал целый ряд инструментально зафиксированных геофизических эффектов (сейсмических, акустических, оптических, ионосферных). В данной работе рассматривается влияние этого события на ионосферу. Спокойная геомагнитная обстановка 15.02.2013 (Кр = 4) позволяет, с большой степенью вероятности, исключить ионосферные бури аврорального генезиса. Возмущения в ионосфере Земли на высотах 100–700 км были зарегистрированы GPS станциями томографирования ионосферы, сетью ионозондов вертикального зондирования, с помощью радаров когерентного рассеяния системы SuperDARN. По опубликованным данным [Емельяненко и др., 2013] источник сейсмического сигнала соответствовал времени 03:20:33 UT в точке с координатами 54.8° с.ш., 61.1° в.д. Энергия взрыва по разным оценкам составила 300–500 кТ в тротиловом эквиваленте [Емельяненко и др., 2013]. По данным томографирования среднеширотной ионосферы [Гивишвили и др., 2013; Тертышников и др., 2013] возмущения электронной концентрации наблюдались в 06:39 UT на высотах 200–700 км в широтном диапазоне 51–57° с.ш. вдоль меридиана ~40° в.д. Интенсивные возмущения полного электронного содержания в 06:00–10:00 UT наблюдались на GPS-станциях в Нижнем Новгороде, Екатеринбурге, Новосибирске, Норильске, Иркутске, Алма-Ате [Бернгардт и др., 2013]. Суточные изменения критической плазменной частоты F2 слоя (foF2) для станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных в Екатеринбурге, Москве, Ростове-на-Дону, Санкт-Петербурге, анализировались в работе [Гивишвили и др., 2013]. По этим данным возмущения в ионосфере возникли 15 февраля и затронули практически всю область ионосферы от 100 до 250 км (слой F2). Все эти возмущения были синхронны и приходили в точку наблюдения в разное время. В работах [Кузьмичева, Лосева, 2013; Kuzmicheva, Losseva, 2013] приведены аналогичные картины возмущений foF2 в Москве, Норильске, Якутске, Иркутске, а также их статистический анализ для Москвы. В работе [Гивишвили и др., 2013] отмечается отсутствие связи возмущений foF2 в Норильске и Якутске с Челябинским событием. В связи с неоднозначностью трактовки этих и других ионосферных данных и для выяснения зависимости их от Челябинского события были проведены обработка и анализ «сырых» данных станций вертикального зондирования ионосферы, так как автоматическая обработка (выделение характерных ионосферных параметров из высотно-частотных характеристик сигналов) в ряд моментов времени для некоторых станций дает неверный результат.

Результаты вертикального зондирования ионосферы

Для компактного представления результатов одноточечного зондирования ионосферы за длительный период времени был применен метод построения двумерной сводной картины состояния ионосферы в координатах высота-время [Акчурин и др., 2013], позволяющий визуализировать вариации характерных параметров ионосферы и выявлять их временные характеристики. Непосредственный вид такой сводной картины (карты), являющейся разверткой по времени высотного профиля какого-либо параметра, зависит от того, какой параметр (частота, амплитуда) на ней представлен. Так, A_{Σ}-карта представляет собой сводные гистограммы сумм амплитуд всех отражений вдоль частотной оси на данной высоте. Она позволяет выделять (подчеркивать) сравнительно короткопериодные высотные и амплитудные вариации. В свою очередь, F_m-карта, на которой в координатах h' – время (где h' – кажущаяся высота) построены изолинии максимальных для данной высоты частот отражений в заданный момент времени, позволяет оценить динамику электронной концентрации в точке наблюдения.

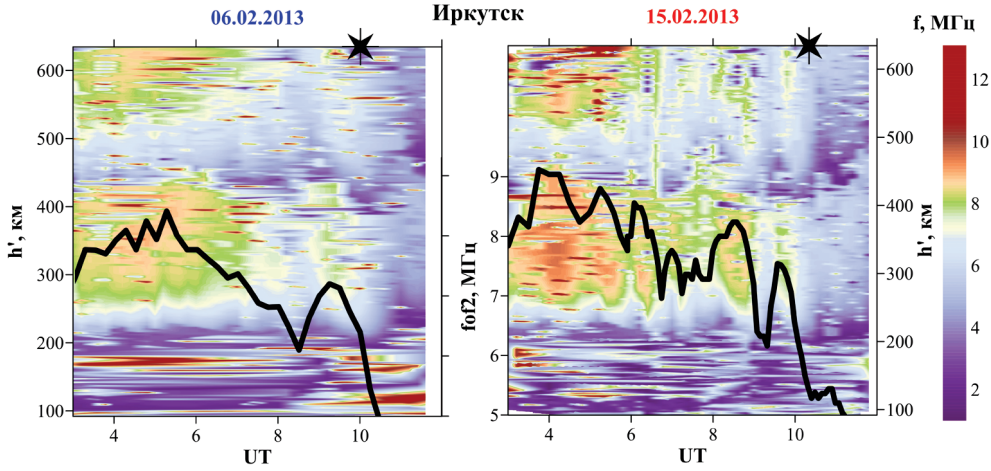


Рис. 1. F_m-карты в координатах кажущаяся высота (h') – время (UT) для 6 и 15 февраля 2013 года для Иркутска.
Здесь и далее черными звездочками обозначены ночные терминаторы, белыми – дневные. Черные кривые – зависимости от времени foF2

На рис. 1 представлены 9-ти часовые, начиная с трех часов UT, F_m-карты для двух дней 2013 года – 15 и 6 февраля (контрольный день с такой же, как и 15 февраля, магнитной активностью), представляющие собой результат обработки данных ионозонда вертикального зондирования, расположенного в Иркутске (52°17’ с.ш., 104°18’ в.д.). Здесь h' – кажущаяся высота, f – максимальная для данной высоты частота отражения, черными звездочками обозначены ночные терминаторы, черные кривые – зависимости от времени критической плазменной частоты F2-слоя ионосферы (foF2), обработанные вручную. Рисунки отчетливо демонстрируют появление 15 февраля возмущений электронной концентрации на h' от 250 до 400 км, не наблюдавшихся в контрольный день. Первое возмущение пришло через ~40 ми-

нут от момента основной вспышки излучения. Расстояние от места вспышки до Иркутска более 2000 км.

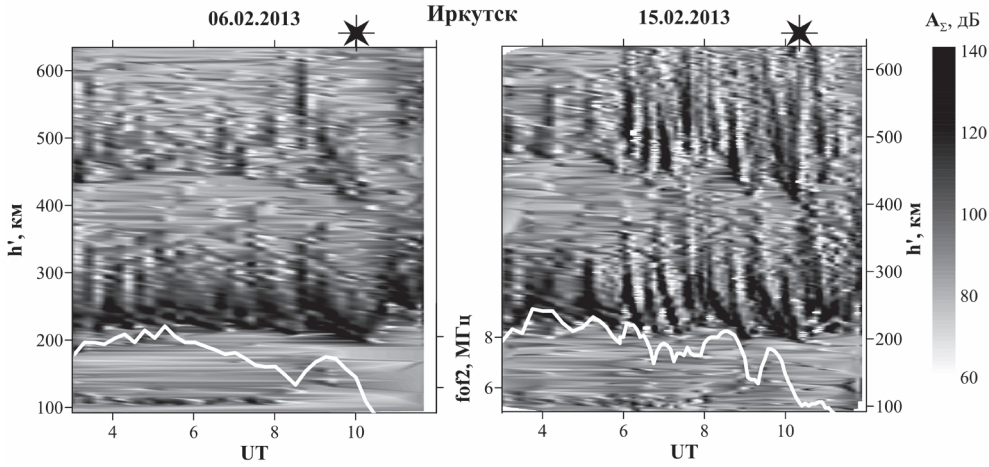


Рис. 2. A_Σ-карты в координатах кажущаяся высота (h') – время (UT) для 6 и 15 февраля 2013 года для Иркутска.
Белые кривые – зависимости от времени foF2

Рис. 2 аналогичен рис. 1, но в отличие от рис. 1, он представляет собой A_Σ-карты, для наглядности обработанные фильтром Прюита, используемым для выделения градиента яркости границ объектов. Такой метод визуализации позволяет выделять короткопериодные высотные и амплитудные вариации, так как на каждой высоте выполняется суммирование амплитуд зарегистрированных сигналов и не делается никаких попыток по удалению сигналов близких к критическим частотам [Акчурин и др., 2013]. Оба эти условия позволяют ясно наблюдать короткопериодные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) по вытянутым вверх высотным вариациям (см. рис. 2), где действующая высота сильно отклоняется от истинной.

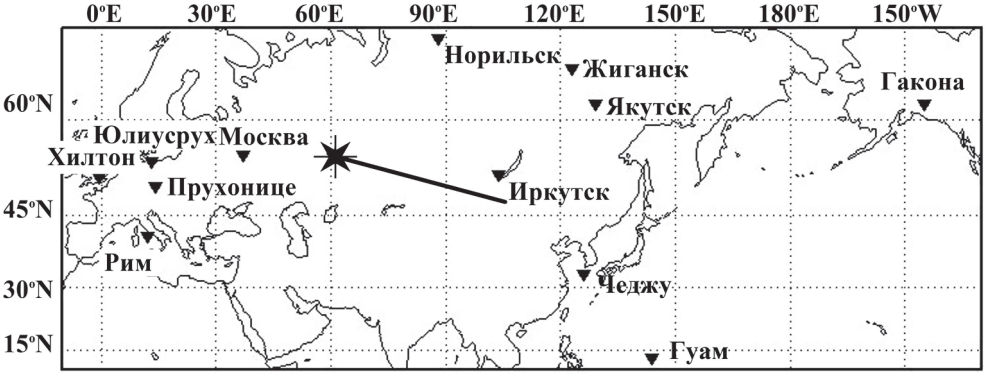


Рис. 3. Карта с расположением станций.
Черная линия – траектория пролета метеорита

Аналогичные A_Σ-карты были построены для 12 станций вертикального зондирования, расположенных в Норильске, Жиганске, Якутске, Иркутске, Гаконе (Аляска), Гуаме (США), Чеджу (Южная Корея), Москве, Юлиусрухе (Германия), Прухонице (Чехия), Риме (Италия), Хилтоне (Великобритания) для двух дней 2013 года – 15 и 6 февраля. Расположения этих станций показаны треугольниками на географической карте на рис. 3. Звездочкой отмечено место основного энерговыделения, сопровождавшегося вспышкой излучения, черной линией – предполагаемая траектория пролета метеорита [Borovicˇka et al., 2013]. Анализ этих карт показал наличие 15 февраля гораздо более структурированных, чем 6 февраля, как короткопериодных, так и долгопериодных возмущений. Частота съема ионограмм на различных станциях была разной, что затрудняет возможность четко выделить их периоды по A_Σ-картам. Так, в Гаконе, Чеджу и в Иркутске (начиная с 5 часов) эта частота составляла величину порядка 5 минут, в то время как на других станциях она равнялась 15 минутам. Характер возмущений и время их прихода в различные точки отличаются. ПИВ разного вида идентифицируются на всех станциях. Причем, есть возмущения, которые не зависят от положения терминатора, а есть – зависящие, с большим периодом и длиной волны. Спектральный анализ A_Σ-карт показал качественное и количественное различия для 6 и 15 февраля, причем 15 февраля на всех станциях (кроме станции Гуам) появились одни и те же доми-

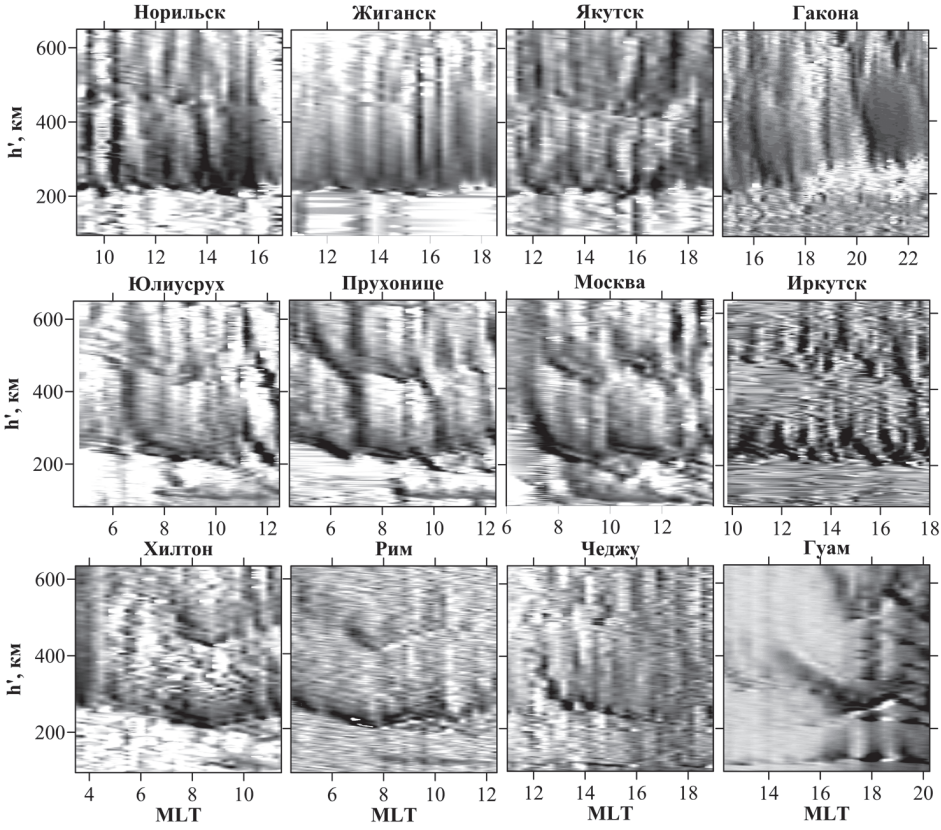


Рис. 4. A_Σ-карты в координатах кажущаяся высота (h') – время в MLT, начиная с 03:00 в UT для 15 февраля (б) 2013 года для всех рассмотренных станций

нирующие спектральные компоненты. Что касается Гуама, то 15 февраля над ним, судя по A_Σ-карте, наблюдались спорадические метеорные следы в Es-слое после 8 UT [Акчурин и др., 2013].

Дополнительно все приведенные A_Σ-карты были перестроены в координатах *h*'-MLT (магнитное локальное время), которое имеет свое значение в каждый момент UT в каждой точке с определенными географическими координатами, то есть зависимость от UT, строго говоря, не является линейной. Возмущения ионосферы, имеющие электродинамическую природу, имеют определенную локализацию по MLT [Tomital et al., 2011], в то время как возмущения, вызванные динамикой нейтральной ионосферы, связаны с солнечным локальным временем, или, что то же самое с UT.

На рис. 4 для всех станций приведены A_Σ-карты, на которых зависимость от UT переведена в зависимость от MLT, отсчитанное от момента 3:00 UT (каждая станция имеет собственный ход MLT). Из рис. 4 видно, что все станции среагировали практически одновременно. Наблюдаемые ПИВ можно условно разделить на три характерных группы (по их структурным особенностям): в Норильске, Жиганске, Якутске, Гаконе (верхняя часть рисунка), Юлисрухе, Прухонице, Москве, Иркутске (средняя часть) и Хилтоне, Риме, Чеджу, Гуаме (нижняя часть).

На рис. 5 приведены зависимости критической плазменной частоты F2-слоя (foF2) от времени в UT (слева) и в приведенном ΔMLT (справа), отсчитанном от момента основного энерговыделения (обозначено пунктиром), для Якутска, Жиганска, Норильска, Иркутска и Москвы. Черные кривые относятся к 15 февраля, серые – к контрольному дню 6 февраля. Черные и белые звездочки соответствуют ночному и дневному терминатору для каждой из географических точек, соот-

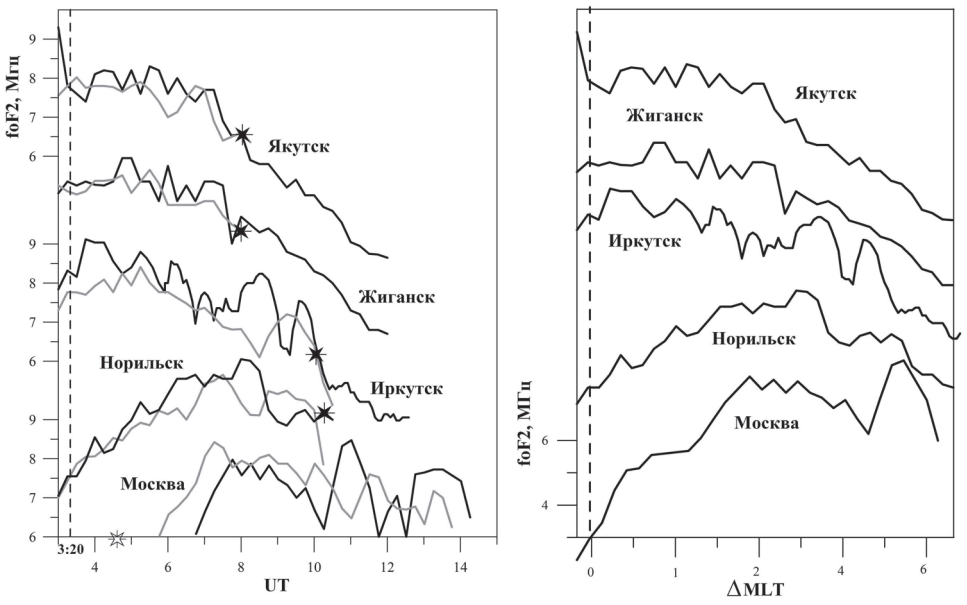


Рис. 5. Зависимости критической плазменной частоты F2-слоя (foF2) от времени в UT (слева) и в приведенном ΔMLT (справа), отсчитанном от момента основного энерговыделения (обозначено пунктиром), для Якутска, Жиганска, Норильска, Иркутска и Москвы.
Черные кривые относятся к 15 февраля, серые – к контрольному дню 6 февраля

ветственно. Как видно из рисунка, короткопериодные возмущения foF2 начались практически одновременно в этих точках, что свидетельствует об их возможном электродинамическом механизме распространения; долгопериодные возмущения приходили в разные места с различными временами задержки.

Результаты численного моделирования газодинамических эффектов Челябинского болида

При моделировании газодинамических эффектов в атмосфере Земли, вызванных пролетом Челябинского болида, был проведен 3D численный расчет газодинамического течения с выделением энергии вдоль траектории в соответствии с кривой светимости [Емельяненко и др., 2013] и основной вспышкой на высоте 25 км. В расчетах полное энерговыделение вдоль траектории составляло величину примерно 440 кТ в тротиловом эквиваленте, наклон траектории – 16 градусов к горизонтальной поверхности, скорость входа в атмосферу на высоте 90 км – 17,8 км/с. Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html). Использовалась программа, написанная на основе разработанной В.В. Шуваловым программы SOVA [Shuvalov, 1999].

На рис. 6 представлены распределения давления относительно фонового (p/p_0) в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в различные моменты времени t = 20 (а), 80 (б), 130 (в), 200 с (г) после начала расчета.

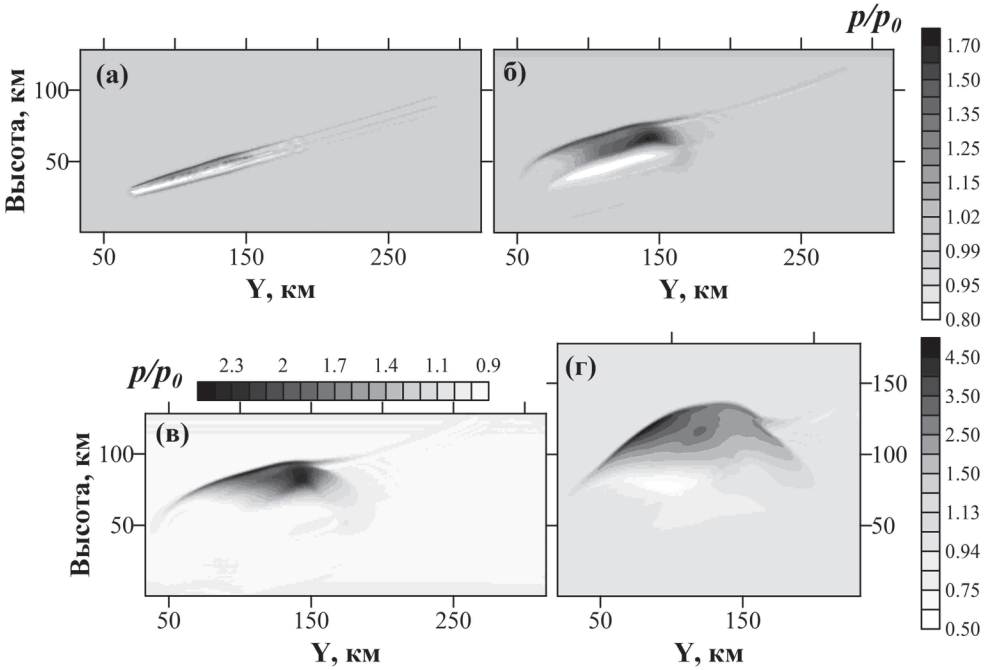


Рис. 6. Распределения давления относительно фонового p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в различные моменты времени t = 20 (а), 80 (б), 130 (в), 200 с (г) после начала расчета

Расчет демонстрирует процесс образования цилиндрической ударной волны по траектории пролета, ускорение ее вверх при выходе в среду с понижающейся плотностью, достижение фронтом волны Е-слоя ионосферы (высота 120 км) в момент времени ~2,5–3 минуты после основного энерговыделения. Этот результат численного моделирования подтверждается данными SuperDARN радара [Бернгардт и др., 2013], расположенного вблизи Челябинска, которые показали наличие волнового возмущения на высоте 120 км в 3:23 UT (через 3 минуты после вспышки излучения). На рис. 7 показаны распределение расчетной плотности газа и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 120 км в момент времени 200 с (177 с после вспышки).

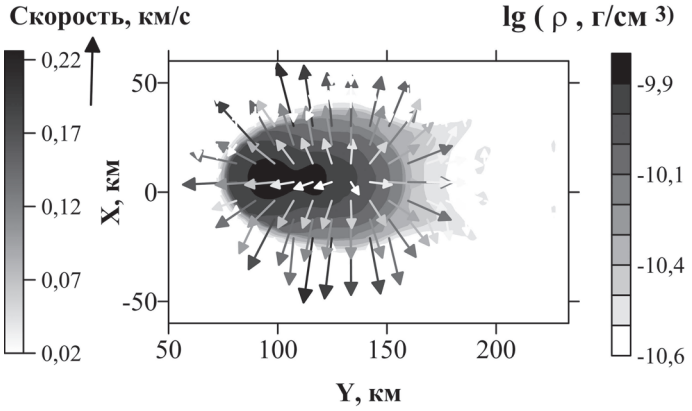


Рис. 7. Распределение плотности газа ρ и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 120 км в момент времени 200 с после начала расчета.
Стрелкой указан масштаб скорости, соответствующий левой цветовой шкале

На рис. 8 приведены распределения p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в последующие моменты времени t = 300 (а), 400 (б), 500 (в), 850 с (г) после начала расчета. Ускоряющаяся при подъеме в разреженные слои атмосферы ударная волна через 5 минут после основной вспышки достигает высот F2-слоя (220–250 км). За ударной волной частицы газа устремляются вверх и затем падают снова вниз в поле силы тяжести. При обратном падении кинетическая энергия воздуха, тормозящегося в плотных слоях, переходит в тепловую, образуется отраженная ударная волна, нагретый газ поднимается в вышележащие слои атмосферы, и процесс повторяется. Этот процесс можно рассматривать как нелинейную стадию образования акустико-гравитационных волн, которые затем могут распространяться на значительные расстояния, и, приводя к возмущению плотности на высоте F2-слоя, порождать осцилляции электронной концентрации и критической плазменной частоты, наблюдаемые в ионограммах в виде ПИВ [Ахмедов, 2004]. На рис. 9 приведены распределение расчетной плотности газа и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 250 км в момент времени 850 с (примерно 14 минут после основной вспышки). Скорость переднего фронта возмущения ~1 км/с, а размер – порядка 500–600 км. Как следует из результатов расчетов, через 14 минут после основной вспышки излучения на высоте F2-слоя ионосферы (см. рис. 8,г) образуется неоднородная волновая структура, которая и может рассматриваться как источник наблюдаемых осцилляций высоты F2-слоя. Оценка времени прихода этих

возмущений (от момента 14 минут после основного энерговыделения и с учетом полученной конфигурации возмущения на высоте 250 км, приведенной на рис. 9) по скорости ионного звука на этой высоте 1,14 км/с дает значения от 30 мин до 1 часа, что неплохо согласуется с данными наблюдений (см. рис. 4).

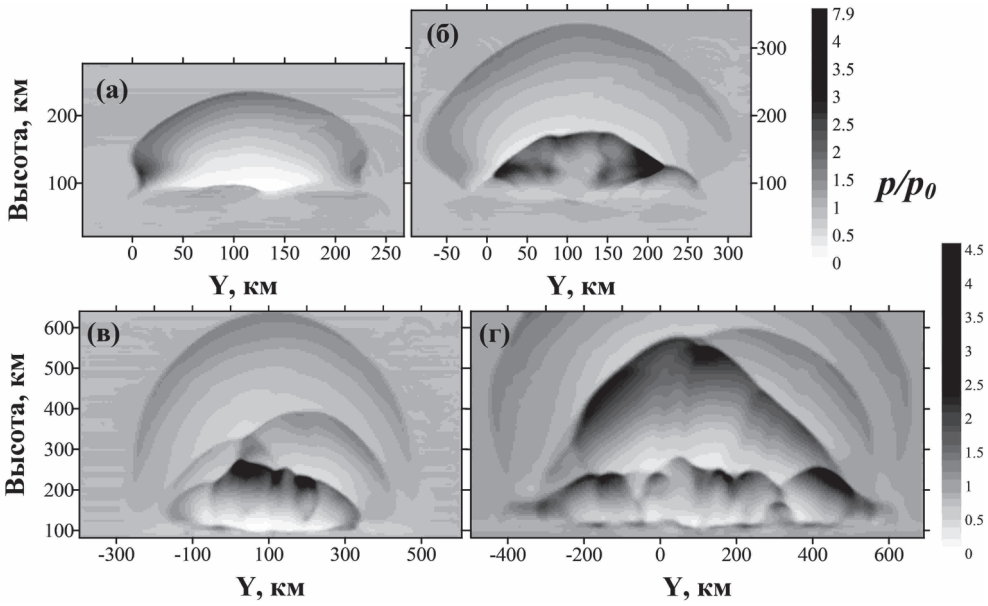


Рис. 8. Распределения p/p_0 в вертикальной плоскости вдоль траектории пролета в моменты времени t = 300 (а), 400 (б), 500 (в), 850 с (г) после начала расчета

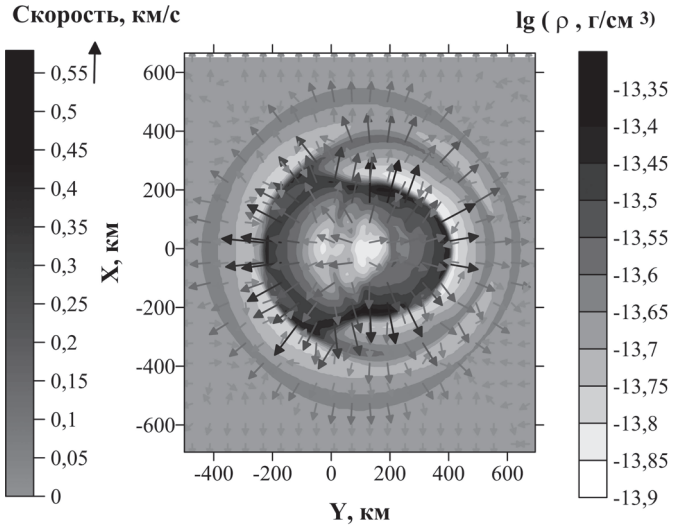


Рис. 9. Распределение плотности газа ρ и векторы его скорости в горизонтальной плоскости на высоте 250 км в момент времени 850 с после начала расчета.
Стрелкой указан масштаб скорости, соответствующий левой цветовой шкале

Выводы и направления дальнейших исследований

Обработка данных станций вертикального ионосферного зондирования позволяет выдвинуть гипотезу, что Челябинское событие вызвало возмущения ионосферы Земли на расстояниях до нескольких тысяч километров.

Часть наблюдаемых возмущений может быть объяснена газодинамическими процессами в нейтральной атмосфере Земли (включая нелинейную стадию возникновения акустико-гравитационных волн), возникшими при пролете метеорита и основном энерговыделении на высоте ~25 км. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественные оценки воздействия на ионосферу потоков излучения, вызывающих появление пятна фотоионизации на высоте 100–120 км, наблюдавшегося радаром SuperDARN в 200 км западнее точки энерговыделения на высотах E-слоя, и возможных электродинамических механизмов распространения возмущений в ионосфере.

Авторы выражают благодарность Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) и GIRO Principal Investigator B. W. Reinisch and Ivan Galkin of the University of Massachusetts Lowell за предоставление возможности использовать данные сети ионозондов и Олегу Бернгардту (ИСЗФ СО РАН) за ценные обсуждения.

Литература

Акчурин А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстротекущих и мелкомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда Циклон // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 101–110.

Ахмедов Р.Р. Численное моделирование генерации акустико-гравитационных волн и ионосферных возмущений от наземных и атмосферных источников // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. ф.-м.н. 2004.

Бернгардт О.И., Добрынина А.А., Г.А. Жеребцов, Михалев А.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Рахматулин Р.А., Саньков В.А., Сорокин А.Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеорита // ДАН. 2013. Т. 452, № 2. С. 205–207.

Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В., Григорьева С.А., Журавлев С.В., Кузнецов В.Д., Кусонский О.А., Лапшин В.Б., Рыбаков М.В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // Астрономический Вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 304–311. DOI: 10.7868/S0320930X13040154

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический Вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 262–277. DOI: 10.7868/S0320930X13040130.

Лосева Т.В., Кузьмичева М.Ю. Оценка геомагнитного эффекта при Тунгусском событии 1908 года // Физика межгеосферных взаимодействий / Под редакцией академика В.В. Адушкина – М.: ГЕОС, 2010.

Тертышников А.В., Алпатов В.В., Глухов Я.В., Давиденко Д.В. Региональные возмущения ионосферы и ошибки позиционирования наземного навигационного приемника при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 5. С. 65–73.

Borovic˘ka Jir˘ı´, Spurny´ Pavel, Brown Peter Wiegert, Paul, Kalenda Pavel, Clark David & Shrbeny´ Luka´s˘ The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013. V. 503. PP. 235–237.

Kuzmicheva M.Yu., Losseva T.V. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, held March 19–23, 2012 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1659, id.2319. (http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/eposter/2765.pdf).

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. 9. PP. 381–390.

Tomita1 S., Nos´e1 M., Iyemori1 T., Toh1 H., Takeda1 M., Matzka J., Bjornsson G., Saemundsson T., Janzhura A., Troshichev O., and Schwarz G. Magnetic local time dependence of geomagnetic disturbances contributing to the AU and AL indices // Ann. Geophys. 2011. V. 29, p. 673–678. DOI:10.5194/angeo-29-673-2011.

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА, ВЫЗВАННОГО ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

В.В. Светцов, В.В. Шувалов

Сделаны теоретические оценки магнитуды сейсмического события, обусловленного падением Челябинского болида. Путем численого моделирования образования и распространения ударных волн, вызванных торможением космического тела и выделением энергии вдоль его траектории в атмосфере, рассчитаны давления на поверхности Земли. Определение магнитуды сейсмического источника проводится с помощью формул, основанных на решении задачи Лэмба для полупространства, на границе которого действует давление. Константы в формулах были ранее выбраны в соответствии с опубликованными данными по экспериментальным взрывам в воздухе. В предположении, что кинетическая энергия Челябинского космического тела при входе в атмосферу в тротиловом эквиваленте была равна 300 кт, вычисленная магнитуда сейсмического события равна 3,85. Для энергии тела 500 кт магнитуда оказалась равной 4,0. Эти величины согласуются с опубликованными результатами измерений магнитуды в пределах погрешностей измерений. Были также проведены вычисления магнитуд сферически-симметричных взрывов в воздухе с энергиями от 30 кт до 30 Мт на высотах от 5 до 45 км. Магнитуда Челябинского события соответствует сферически-симметричным взрывам с энергиями, равными кинетической энергии тела, на высоте около 35 км.

Введение

Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. сопровождалось вспышками света и ударной волной, которая вызвала разрушения, хотя и относительно слабые, на большой площади. Это событие было хорошо задокументировано, и большое число фрагментов метеорита было найдено, что позволяет изучить это событие весьма подробно [Емельяненко и др., 2013; Popova et al., 2013; Brown et al., 2013]. Скорость челябинского астероида (хондрита типа LL) при входе в атмосферу была равна 19 км/с, а угол наклона траектории к горизонтали составлял 19° [Borovicka et al., 2013]. Кинетическая энергия тела при входе в атмосферу оценивалась по разру-

шениям, вызванным ударной волной, данным регистрации светового излучения и ифразвуковых волн, а также с помощью гидродинамических вычислений. Оказалось, что результаты оценок энергии разными методами хорошо согласуются, если кинетическая энергия тела составляла в тротиловом эквиваленте от 300 до 500 кт [Емельяненко и др., 2013]. Оценки, сделанные в работе [Brown et al., 2013], дают несколько другой интервал возможных энергий – от 400 до 600 кт.

Падающие на Землю космические тела размером до 100 м обычно разрушаются и тормозятся в атмосфере, их кинетическая энергия переходит в тепловую, а ударная волна распространяется в атмосфере, доходит до Земли и вызывает землетрясение аналогично воздушному взрыву. Сейсмические колебания, вызванные воздействием воздушной ударной волны на поверхность Земли, были зарегистрированы после Челябинского события большим числом сейсмических станций на расстояниях в сотни и тысячи километров.

Оценки магнитуды сейсмического источника по регистрации волн Релея на расстояниях до 4000 км от эпицентра [Tauzin et al., 2013] дали величину магнитуды $M_S = 3{,}7 \pm 0{,}3$. В работе [Brown et al., 2013, Supplementary information] на основании 33 регистраций на расстояниях до 3300 км от источника волны с использованием методики, развитой при подземных ядерных взрывах, была дана другая оценка магнитуды $M_S = 4{,}0 \pm 0{,}3$. По этой магнитуде была сделана и оценка энергии соответствующего взрыва, опирающаяся на теорию генерации поверхностных сейсмических волн высотными ядерными взрывами [Harkrider et al., 1974]. Эта оценка дала энергию взрыва 420±200 кт.

Энергия метеороида по магнитуде сейсмического события оценивалась в работах [Пасечник, 1976; Овчинников, Пасечник, 1988]. Сейсмические волны после Тунгусского события 1908 г. были зарегистрированы на станциях в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Йене [Пасечник, 1976], причем было определено, что все станции зарегистрировали поверхностные волны Релея, вызванные действием воздушной ударной волны. Пасечник (1976) установил магнитуду взрыва в Тунгусском событии в пределах от 4,8 до 5,2 (в пересчете на вертикальную составляющую поверхностной волны). Чулымский болид 26 февраля 1984 г. вызвал сейсмическое событие магнитудой 3,4±0,3, а энергия болида оценивалась величиной порядка 10 кт [Овчинников, Пасечник, 1988].

В работе [Светцов, 2007] было проведено численное моделирование взрывов в атмосфере, и эффект Тунгусского события сопоставлялся с последствиями взрывов на разных высотах. Оказалось, что энергия сосредоточенного взрыва, который может вызвать вывал леса, аналогичный Тунгусскому событию, заключена в пределах от 7 до 18 Мт, а высота взрыва – от 6,5 до 10,5 км, причем каждой энергии соответствует свой интервал высот шириной порядка 1–2 км. В этой же работе была предложена методика, позволяющая при моделировании взрывов вычислять и магнитуду сейсмического источника, генерируемого воздушной ударной волной. Методика была согласована с экспериментальными данными по взрывам в атмосфере на Новой Земле в 1961–1962 годах. Вычисленная магнитуда взрывов с энергиями от 7 до 18 Мт, соответствующими Тунгусскому событию, находилась в пределах от 4,8 до 5,0.

Челябинский болид выделил большую часть своей энергии на протяженном участке траектории – на высотах от 35 до 25 км [Popova et al., 2013]. Эти высоты значительно выше высот взрывов в атмосфере, проведенных на Новой Земле с сопоставимыми энергиями, и высот выделения энергии в Тунгусском и Чулымском событиях. Кроме того, в отличии от взрывов, изолинии давления на поверхности

при наклонной траектории болида не являются окружностями. Поэтому интересно распространить методику расчета магнитуды сейсмического события на уже достаточно хорошо исследованный случай падения Челябинского болида и сопоставить результаты вычислений с данными регистраций.

Метод вычисления магнитуды сейсмического источника, обусловленного воздушной ударной волной

В работе [Светцов, 2007] путем численного моделирования сосредоточенных (сферически-симметричных) взрывов в воздухе определялось давление, вызываемое ударными волнами на поверхности Земли, и вычислялась магнитуда источника сейсмической волны. Метод вычисления магнитуды основан на решения задачи Лэмба для полупространства, на границе которого действует давление [Lamb, 1904; Ewing et al., 1957]. В осесимметричной задаче (высотный сферически-симметричный взрыв, вертикальное падение метеороида), когда давление на поверхности $P(r, t)$ зависит от радиуса r и времени t, можно вычислить спектр давления, который равен

$$p(\omega, k) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{0}^{\infty}(P(r, t) - P_0)rJ_0(rk)e^{-i\omega t}dr\,dt, \qquad (1)$$

где J_0 – функция Бесселя, P_0 – атмосферное давление у поверхности, $k = \omega/c_R$ – волновое число, c_R – фазовая скорость волны Релея.

Для определения магнитуды источника вычислялась величина A_R, которая должна быть пропорциональна энергии возбуждаемых поверхностных волн [Коган, 1965; 1975],

$$A_R = \frac{1}{P_0(\omega_2 - \omega_1)}\int_{\omega_1}^{\omega_2}\left|p\left(\omega, \frac{1}{2\pi}\right)\right|\omega\, d\omega, \qquad (2)$$

здесь пределы интегрирования ω_1 и ω_2 зависят от диапазона регистрируемых частот поверхностной волны. Для определения магнитуды сейсмического источника была предложена следующая формула:

$$M_S = \lg(A_R) + 4.92 \qquad (3)$$

где A_R измеряется в км^2. Она была основана на опубликованном экспериментальном материале по мощным высотным взрывам, проведенным в 1961–1962 годах на Новой Земле и сопоставлении результатов вычислений с данными измерений.

Наилучшее согласие с экспериментальными данными достигалось, когда $\omega_1 = 0{,}25$, а $\omega_2 = 0{,}42$ с$^{-1}$, что соответствует периодам $T = 2\pi/\omega$ от 15 до 25 с. Данный интервал периодов лежит в пределах основной моды волны Релея (волны M_1) [Пасечник, 1970] и включает в себя период максимальной чувствительности сейсмографов, использовавшихся при регистрации ядерных испытаний [Toksöz, Ben-Menahem, 1964; Crampin, 1966]. В то же время четыре сейсмографа, зафиксировавшие Тунгусское событие, согласно [Пасечник, 1970] зарегистрировали периоды колебаний от 15 до 25 с.

При вычислении спектра давления на поверхности фазовая скорость поверхностной волны c_R бралась из [Аки, Ричардс, 1983] по стандартной модели Гутенберга, но при вариации этой скорости оказалось, что ее значение слабо влияет на результат, который остается практически неизменным, если взять постоянное значение $c_R = 3{,}5$ км/с.

Естественным обобщением формулы (1) на случай отсутствия осевой симметрии задачи, когда давление на поверхности зависит от координат x, y, служит формула

$$p(\omega, k_x, k_y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (P(x, y, t) - P_0)\, e^{-i(k_x x + k_y y + \omega t)} dx\, dy\, dt \qquad (4)$$

Если давление на поверхности зависит только от радиальной координаты, то (4) преобразуется в (1), если взять волновые числа $k_x = k_y = 2^{-1/2}k$. Так как формула (3) откалибрована на сферически-симметричных взрывах, то в формулу (2) следует подставлять $p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2}))$.

Если провести численное моделирование падения космического тела под некоторым углом к горизонтали и определить давление на поверхности Земли как функцию координат и времени, то по формулам (4), (2), (3) можно вычислить магнитуду сейсмического источника.

Моделирование сейсмического эффекта при Челябинском событии

Численное моделирование процессов, сопровождающих падение Челябинского астероида в атмосфере, позволило определить давление на поверхности Земли как

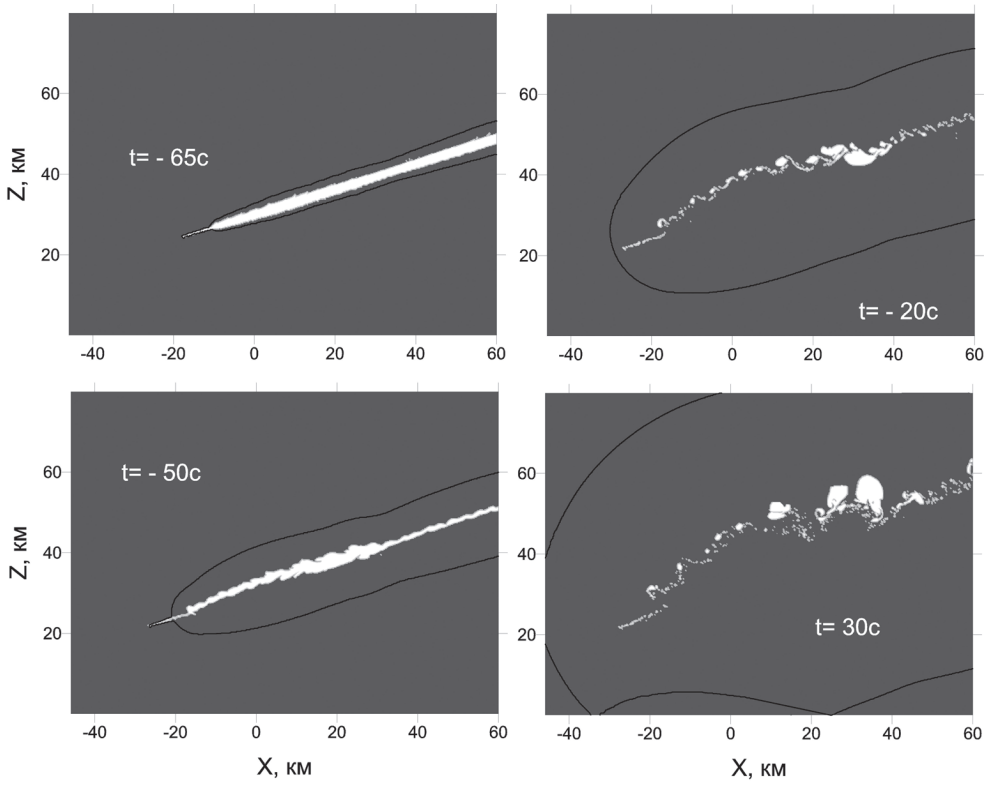


Рис. 1. Распространение ударной волны при падении Челябинского космического тела. Ударная волна показана черной линией. Вещество метеорного следа показано белым цветом. Момент времени $t = 0$ соответствует приходу ударной волны на поверхность

функцию координат x, y и времени. Расчеты генерации и распространения ударной волны проводились по программе SOVA [Shuvalov, 1999] аналогично тому, как это сделано в работах [Попова и др., 2013; Шувалов и др., 2014]. Начальные данные задавались в виде стандартной атмосферы CIRA (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html). Энергия выделялась в ячейках, через которые проходит траектория метеороида, в тот момент времени, когда он пролетал через эту ячейку. Энерговыделение задавалось пропорционально интенсивности излучения, определяемой по кривой свечения, восстановленной по многочисленным видеозаписям [Popova et al., 2013]. Не учитывался конечный участок траектории на высотах менее 21 км, где свечение было слабым, когда основная масса метеороида уже, по-видимому, испарилась и рассеялась на мелкие фрагменты, а скорость оставшихся более крупных фрагментов заметно упала. Скорость метеороида на участке траектории выше 21 км считалась постоянной и равной 19 км/с [Popova et al., 2013].

Расчеты проводились на разностной сетке размером 500×150×250 ячеек в x, y и z направлениях, соответственно. В центральной области (-25 км $< x <$ 30 км, $y <$ 20 км, $z <$ 40 км) размер ячейки равен 200×200×200 метров, вне этой области размеры каждой следующей ячейки увеличиваются на 1% по сравнению с предыду-

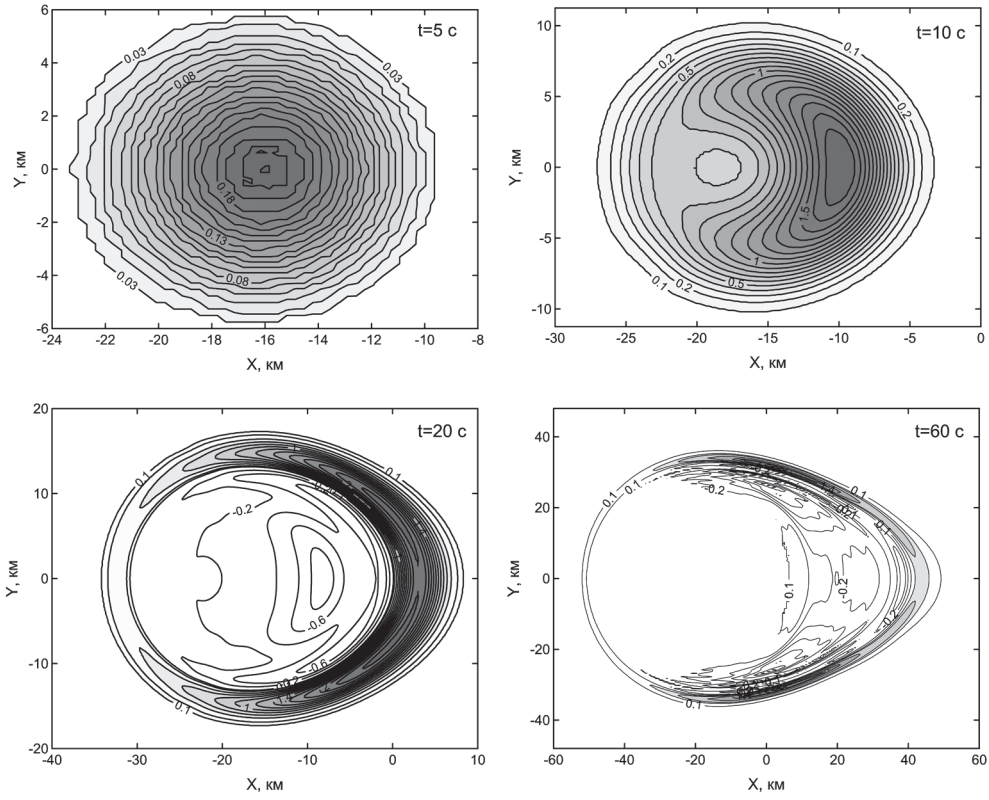


Рис. 2. Изолинии избыточного давления P-P_0 на поверхности Земли, полученного при моделировании Челябинского падения в предположении, что начальная энергия тела составляла 300 кт. Время, указанное на рисунках, отсчитывается от момента контакта ударной волны с поверхностью. Значения избыточного давления на изолиниях указаны в килопаскалях

щей. Каждые три секунды сохранялись массивы распределения избыточного давления на поверхности земли, которые и были использованы для оценки сейсмических возмущений.

Были рассчитаны два варианта с начальной кинетической энергией тела 300 и 500 кт. Характер распространения ударной волны в атмосфере показан на рис. 1. На рис. 2 показано распределение давления на поверхности в отдельные моменты времени для варианта с энергией 300 кт. В расчетах значительный вклад в спектр давления на измеряемых частотах осуществляется на стадии, когда ударная волна, распространяющаяся вдоль поверхности, является слабой.

На рис. 3 показаны вычисленные спектры давления, точнее величина

$$\omega|p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2}))|/P_0,$$

которая является подинтегральным выражением в (2), если давление на поверхности зависит от двух координат. Спектры устанавливаются за время около 1 мин.

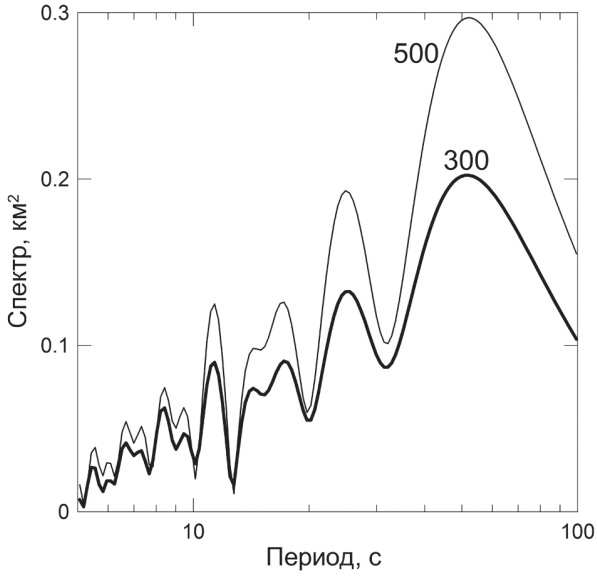


Рис. 3. Величина $\omega|p(\omega, \omega/c_R\sqrt{2}), \omega/(c_R\sqrt{2}))|/P_0$ как функция периода $T = 2\pi/\omega$

Вычисленные по формулам (4), (2), (3) магнитуды оказались равными 3,85 для начальной энергии метеороида 300 кт и 4,0 – для энергии 500 кт.

Магнитуды взрывов, вызываемых выделением энергии на разных высотах

Мы провели также серию расчетов сферически-симметричных взрывов на разных высотах с энергиями от 30 кт до 30 Мт. Энергия 30 кт соответствует кинетической энергии каменного тела (с плотностью 3 г/см^3) диаметром ~7 м, движущемуся со скоростью 20 км/с. Такие тела падают на Землю в среднем раз в 5 лет [Ivanov, 2008]. Энергия 30 Мт в 2–4 раза больше оцененной энергии Тунгусского события – тела с такой энергией сталкиваются с Землей примерно раз в 3000 лет.

Начальные данные для взрывов выбирались в виде равномерно нагретой сферы воздуха с постоянной плотностью, равной нормальной плотности в атмосфере на

высоте взрыва, и удельной внутренней энергией 50 кДж/г (температура ~20 000 К), радиус сферы определялся энергией взрыва. Изменение плотности и давления воздуха с высотой z соответствовало стандартной модели атмосферы. Поверхность Земли считалась жесткой отражающей стенкой. Численное моделирование проводилось путем решения уравнений газовой динамики в осесимметричной системе координат (r, z) методом, предложенным в работе [Shuvalov, 1999]. Уравнение состояния воздуха бралось из таблиц [Кузнецов, 1965]. Потери энергии на излучение не учитывались.

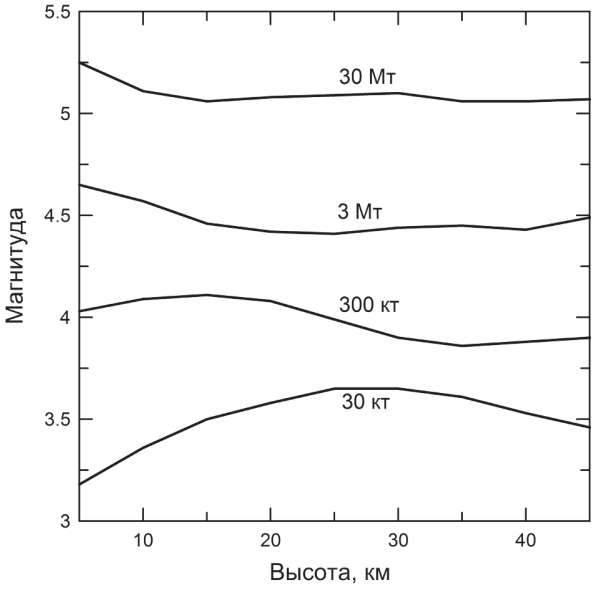


Рис. 4. Зависимость магнитуды события от высоты сосредоточенных взрывов в воздухе с энергиями от 30 кт до 30 Мт

Магнитуды событий определялись по уравнениям (1)–(3). Результаты вычислений магнитуд показаны на рис. 4. Оказалось, что магнитуды довольно слабо зависят от высоты взрыва, а для взрыва мощностью 30 кт магнитуда заметно снижается при уменьшении высоты. Очевидно, что при удалении взрыва от земли амплитуда ударной волны, падающей на поверхность, уменьшается, но увеличивается площадь воздействия, что компенсирует уменьшение давления. Мы вычисляем магнитуды в определенном интервале периодов от 15 до 25 с, и поэтому основной вклад в магнитуду дают области воздействия размером порядка длины волны 50–100 км. При взрыве небольшой мощности на небольшой высоте область воздействия имеет небольшие размеры вследствие увеличения кривизны фронта ударной волны, что снижает вклад в интеграл в выбранном интервале частот.

Вычисленные нами магнитуды Челябинского события 3,85 и 4,0 соответствуют сферически-симметричным взрывам с энергиями, равными кинетической энергии тела как 300, так и 500 кт, на высоте около 35 км. Высота максимальной яркости болида была около 30 км [Popova et al., 2013; Brown et al., 2013], причем по оценкам [Brown et al., 2013] половина энергии выделилась на высотах 27–33 км, а почти вся энергия – на высотах 25–35 км. Для взрыва 300 кт на высотах 30 и 25 км магнитуда оказывается равной 3,9 и 4,0. Таким образом, для падения метеороида мы получили несколько меньшую (на 0,05–0,15) магнитуду, чем дают сосредоточенные взрывы на высотах 30 и 25 км. Это может быть как из-за несколько мень-

шей величины давления на поверхности, так и из-за вытянутости изолиний давления вдоль проекции траектории на поверхность.

Обсуждение результатов

Вычисленные по формулам магнитуды 3,85 и 4,0 для энергий болида 300 и 500 кт согласуются с результатами, полученными по данным регистраций сейсмической волны, $M_S = 3{,}7 \pm 0{,}3$ [Tauzin et al., 2013] и $M_S = 4{,}0 \pm 0{,}3$ [Brown et al., 2013, Supplementary information] в пределах ошибок измерений. Отдельные измерения могут сильно отличаться от средних. Так в работе [Brown et al., 2013, Supplementary information] магнитуда $M_S = 4{,}0$ получалась усреднением по 33 регистрациям разных станций, и энергия взрыва 420 кт также получена усреднением по разным станциям, которые дают разброс энергии от ~100 до ~900 кт. Если использовать средние значения магнитуды, полученные в этих работах, то наилучшее согласие с расчетами дает магнитуда $M_S = 4{,}0$ при энергии взрыва 500 кт. Средняя магнитуда $M_S = 3{,}7$, полученная в работе [Tauzin et al., 2013], по-видимому, слишком занижена. Если бы погрешности измерений магнитуды событий, вызванных падением космических тел, имели меньший разброс, то можно было бы определять энергию метеороида по сейсмическим сигналам с большей точностью.

При моделировании Челябинского события мы получили, что магнитуды сосредоточенных взрывов, достаточно близки к магнитудам событий, вызванных ударами космических тел под углом к горизонтали. Поэтому в первом приближении можно оценивать энергию метеороида по магнитуде, рассчитанной для высотного взрыва.

Чулымский болид, вероятно, разрушился на высоте около 10 км [Анфиногенов, Фаст, 1985]. Магнитуда взрыва, вызванного этим болидом, была определена по каналовым волнам с периодом около 2 с [Овчинников, Пасечник, 1988]. Волны Релея с большими периодами не были зарегистрированы, по-видимому, из-за отсутствия соответствующей аппаратуры. Взяв высоту взрыва 10 км и магнитуду 3,4, мы получаем энергию Чулымского метеороида около 35 кт. Но с учетом ошибок измерений сейсмическими станциями энергия Чулымского болида могла лежать в пределах от 6 до 250 кт.

Выводы

Вычисленные магнитуды сейсмического события, вызванного падением Челябинского метеороида, равны 3,85 и 4,0, если кинетическая энергия космического тела составляла 300 и 500 кт, соответственно. Магнитуда 4,0 очень хорошо согласуется со средним значением, полученным по данным регистрации около трех десятков сейсмических станций [Brown et al., 2013, Supplementary information]. Численный метод расчета магнитуды сейсмических событий, вызванных падениями космических тел, дает достаточно точные результаты. Определение энергии космического тела по измеренной магнитуде ограничено ошибками измерений.

Авторы благодарны О.П. Поповой за плодотворные обсуждения Челябинского события и Г.Г. Кочаряну за полезные замечания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. М.: Мир. 1983. 520 с.

Анфиногенов Д.Ф., Фаст В.Г. Яркий болид на юге Сибири // Земля и Вселенная. 1985. № 3. С. 72–75.

Емельяненко В. В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277.

Коган С.Я. К вопросу о связи параметров воздушного взрыва с сейсмической энергией // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 4. С. 9–22.

Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука. 1975. 152 с.

Кузнецов Н.М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение. 1965. 463 с.

Овчинников В.М., Пасечник И.П. Землетрясение, вызванное взрывом Чулымского болида // Метеоритика. 1988. Вып. 47. С. 10–20.

Пасечник И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М.: Наука. 1970. 192 с.

Пасечник И.П. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным // Космическое вещество на Земле. Новосибирск: Наука. 1976. С. 24–54.

Попова О.П., Шувалов В.В., Рыбнов Ю.С. и др. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4: Сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва. Изд. ГЕОС. 2013. С. 10–21.

Светцов В.В. Оценки энергии поверхностных волн при взрывах в атмосфере и параметров источника Тунгусского события // Физика Земли. 2007. Т. 43. №. 7. С. 57–66.

Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела 15 февраля 2013 г. // 2014, Статья в настоящем сборнике.

Brown P.G., Assink J.D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013. V. 503. No. 7475. P. 238–241.

Crampin S. Higher-mode seismic surface waves from atmospheric nuclear explosions over Novaya Zemlya // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, № 12. P. 2951–2958.

Ewing W.M., Jardetzky W.S., Press F. Elastic waves in layered media / New-York: McGraw-Hill book company. 1957. 380 p.

Harkrider D.G., Newton C.A., Flinn E.A. Theoretical effect of yield and burst height of atmospheric explosions on Rayleigh wave amplitudes // Geophys. J. R. Astr. Soc. 1974. V. 36. P. 191–225.

Ivanov B. Size-frequency distribution of asteroids and impact craters // Catastrophic events caused by cosmic objects // Springer. 2008. P. 91–116.

Lamb H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 1904. V. 203. P. 1–42.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. V. 9. № 6. P. 381–390.

Tauzin B., Debayle E., Quantin C,, Coltice N. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. No. 14. P. 3522–3526.

Toksöz M. N., Ben-Menahem A. Exitation of seismic surface waves by atmospheric nuclear explosions // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 8. P. 1639–1648.

СЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ОТ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

О.А. Усольцева[1], Р.А. Дягилев[2], С.Н. Мулев[3]

[1] – Институт динамики геосфер РАН, Москва; [2] – Горный институт УО РАН, Пермь; [3] – НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевой научный центр ВНИМИ РАН, Санкт-Петербург

Вхождение в атмосферу Челябинского болида произошло 15 февраля 2013 года в 3 часа 20 минут GMT. Сейсмические колебания, вызванные ударной волной от этого события, были записаны 6 сейсмическими станциями в районе п. Коркино, находящемся на эпицентральном расстоянии $\Delta = 10$ км от координат точки максимальной яркости. В работе проведено определение амплитуды сейсмических колебаний. Амплитуда соответствует избыточному давлению для этой области. Измеренные времена вступления волны по сейсмограммам согласуются с теоретически рассчитанными временами. Выполнено вычисление азимута на источник и угла падения с использованием трехкомпонентного датчика. Рассчитанные координаты акустического источника на основе азимута и угла падения подтверждают тезис, что первый звук приходит из ближайшей точки траектории.

Введение

Сейсмические колебания от акустического источника изучались ранее в работах [Lin, Langston, 2009], [Kitov et al., 1997], [Langston, 2004] и других. В этих работах используются разные источники возбуждения колебаний. В [Lin, Langston, 2009] источником является гром при грозе, в [Kitov et al., 1997] – воздушный химический взрыв, в [Langston, 2004] – ударная волна от пролета болида. В [Lin, Langston, 2009] и [Kitov et al., 1997] сейсмические наблюдения дополнены акустическими данными. Замечено, что волна давления имеет достаточно четкий N-образный вид. Несмотря на разные акустические источники возбуждения колебаний, на сейсмических записях наблюдается ряд общих характерных особенностей. На большинстве записей вступление волны очень четкое и резкое, сейсмические колебания более продолжительные, чем акустические, частотные диапазоны колебаний при разных акустических источниках возмущения близки. Основной частотный диапазон при регистрации гроз в [Lin, Langston, 2009] и акустическим, и сейсмическим датчиком – 3–7 Гц, при регистрации болида в [Langston, 2004] сейсмометром – 3–4 Гц. В случае воздушных химических взрывов в [Kitov et al., 1997] доминирующая частота акустических колебаний ~1,7 Гц, а соответствующий сейсмический сигнал ~2,5 Гц. В [Langston, 2004] проведено моделирование сейсмических колебаний, вызванных ударной волной от пролета болида, для угла падения 47^0 методом Хаскела-Томпсона. В [Langston, 2004] утверждается, что сейсмические колебания, вызванные акустическим источником, связаны только со скоростным строением верхнего 30–50-метрового приповерхностного слоя под станцией.

Челябинский метеорит был самым крупным космическим телом после Тунгусского события 1908 года, вызвавшим разрушения в районе с численностью населения более 1 млн человек [Popova et al., 2013]. Сейсмические записи пролета Челябинского болида исследуются в [Tauzin et al., 2013], [Brown et al., 2013], [Kitov et al., 2013], [Heimann et al., 2013]. В этих работах показано, что ударная волна от болида инициировала сейсмическое событие с Ms = 4,0±0,3 по [Brown et al., 2013], с Ms = 3,7±0,3 по [Tauzin et al., 2013], с Ms(IDC) = 3,95±0,06 по [Kitov, et al., 2013]. В работах исследуются записи поверхностных волн Рэлея на эпицентральных расстояниях 246-4000 км от предполагаемого источника сейсмических волн. Данная публикация отличается от уже существующих тем, что в ней исследуются сейсмические колебания, связанные с пролетом Челябинского болида в зоне максимальной амплитуды ударной волны согласно [Popova et al., 2013]. В этом районе датчиками, установленными на глубине до 14 метров, регистрируются главным образом колебания, пришедшие из верхнего полупространства в точку приема, а не из нижнего. Характерными признаками этого являются большая амплитуда колебаний – сотни микрометров (раздел 2); форма записи (рис. 2); высокочастотный спектр колебаний (рис. 2).

Рассматриваемые колебания не связаны с падением самого массивного фрагмента болида в озеро Чебаркуль, так как время пролета фрагмента, упавшего в озеро, соответствует примерно 62 с [Popova et al., 2013] от момента максимальной яркости, возбуждаемые этим падением сейсмические колебания, распространяются со скоростью большей акустической примерно в 10 раз. Расстояние между п. Коркино и оз. Чебаркуль – 69 км и, следовательно, сейсмические колебания могут быть зафиксированы в п. Коркино через 80–85 секунд после вспышки. Ниже в разделе 3 показано, что изучаемые в данной работе колебания наблюдаются через 92–94 секунды после вспышки. Также в разделе 4 и в [Харламов и др., 2014] вычислен азимут на источник колебаний, который существенно отличается от азимута на оз. Чебаркуль (рис. 1 и 6).

Цель данной работы – установить связь между траекторией пролета болида, определенной в [Borovicka et al., 2013], и обсуждаемыми сейсмическими данными, определить местоположение акустического источника и амплитуду волны давления по сейсмическим данным в п. Коркино.

1. Данные

Упругие возмущения грунта, связанные с пролетом болида, зарегистрированы шестью трехкомпонентными датчиками, установленными в бортах Коркинского угольного карьера. Географические координаты карьера – 54,9° с.ш. и 61,4° в.д. Датчики в п. Коркино расположены в непосредственной близости от точек, которые вычислены в [Tauzin et al., 2013] и [Heimann et al., 2013] в качестве сейсмического источника от болида и от точек, в которых на высотах 30,6 и 31,9 км произошли самые сильные разрушения болида [Borovicka et al., 2013] (рис. 1,а). Эпицентральное расстояние до сейсмического источника по [Tauzin et al., 2013] равно 13,6 км, по [Heimann et al., 2013] – 11,8 км, а до области, где произошло самое сильное разрушение, – 10 км. Карта местоположения датчиков в п. Коркино представлена на рис. 1,б. 3-й датчик – самый ближний к траектории пролета. 2-й, 5-й и 4-й датчики расположены немного дальше от траектории. Датчики 7 и 8 удалены от траектории более всего. На карьере установлена автоматическая система мониторин-

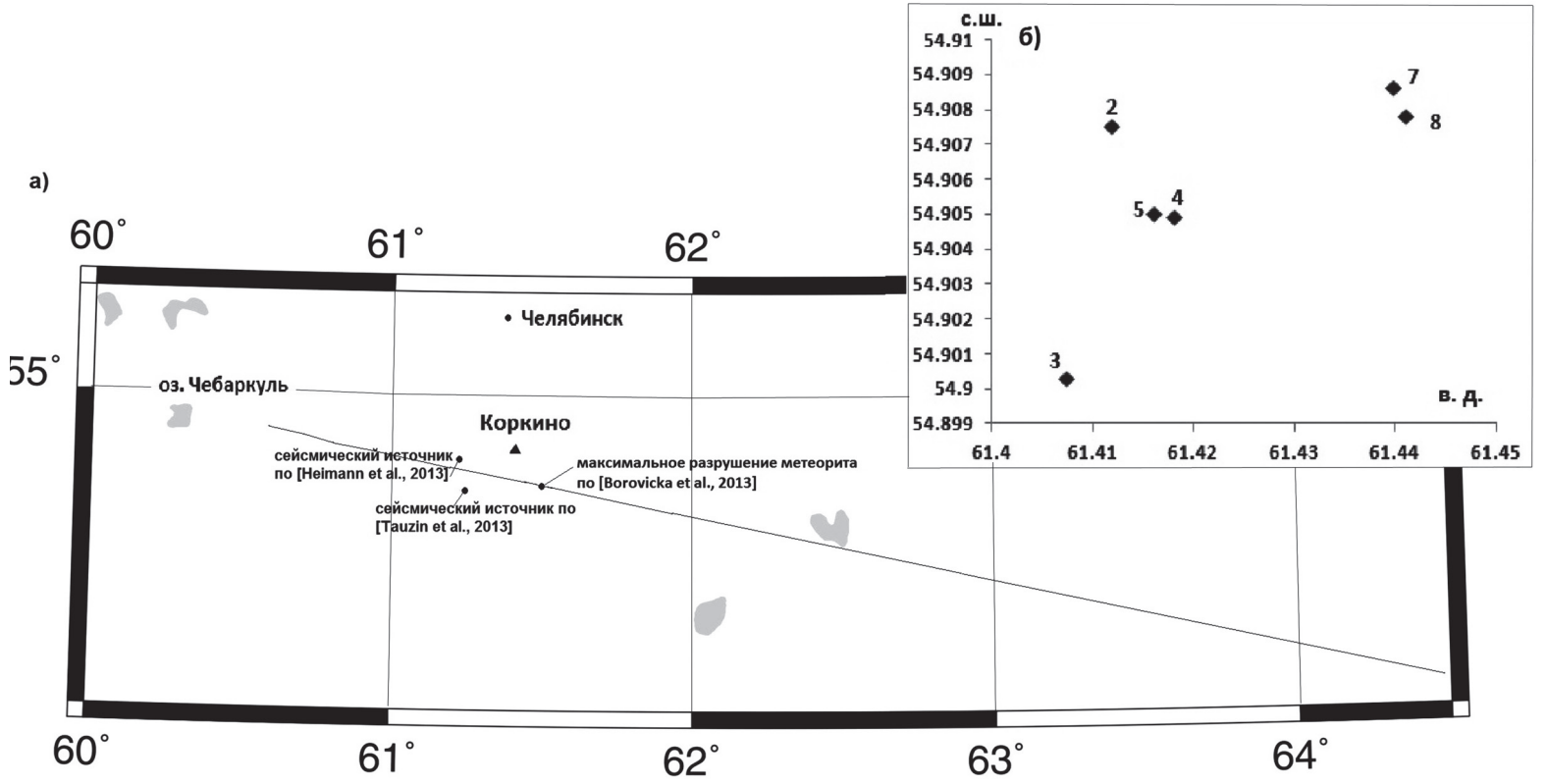


Рис. 1. (а) местоположение карьера относительно траектории пролета болида [Borovicka et al., 2013], (б) – карта местоположения геофонов в п. Коркино

га IMS (Австралия), которая ведет триггерную запись по превышению отношения сигнал-шум определенной величины. Датчиками в системе являются скважинные геофоны с полосой пропускания 4–2000 Гц. Скважины для датчиков бурились на глубину до 14 м. Они размещены на площади 2,2 · 1,0 км^2, вертикальный разнос – 288 м. Фрагменты исходных сейсмограмм с самым сильным сигналом представлены на рис. 2. Начальное время полной записи – 03:21:59 GMT, длина записи составляет 23 с. Обработка сейсмограмм проводилась с помощью программы Seismic Handler [Stammler, 1993].

2. Определение амплитуды колебаний

Первичный анализ сейсмических записей показывает, что амплитуды сигнала и его спектральный состав на всех датчиках разные (рис. 2). При детальном изучении момента вступления волны можно заметить, что на 3-м датчике вступление очень четкое и резкое, а на остальных датчиках амплитуда сигнала в начале, возрастает незначительно, колебания продолжаются 0,4–1,2 секунды, а только потом происходит резкое увеличение амплитуды сигнала. На 3-м датчике – колебания самые интенсивные. На 2-м и 4-м датчиках, находящихся в центре карьера, колебания минимальны. На 5-м датчике, который также находится в середине каменноугольного карьера, колебательный цуг короткий, но с высоким значением максимальной амплитуды. 7-й и 8-й датчики расположены на северо-восточном окончании карьера. На этих датчиках наблюдаются колебания средней интенсивности между 3-м и группой из 4-го, 5-го и 2-го датчиков. Определенные по сейсмограммам максимальные амплитуды скорости смещения грунта для трех компонент представлены в табл. 1.

Таблица 1

Скорости и плотности пород под разными датчиками, максимальные амплитуды колебаний в п. Коркино по трем компонентам в мкм/с, максимальный разброс по z компоненте и рассчитанные по z компоненте амплитуды ударной волны в Па

№ дат	$A_{макс}$ по x	$A_{макс}$ по y	$A_{макс}$ по z	Cp, м/с	Плотность, кг/м^3	ΔP по амплитуде Z	Максимальный разброс по z	ΔP по максимальному разбросу
2	116	153	167	1793	2200	659	320	1262
3	540	457	571	1002	1800	1030	1110	2002
4	48	54	112	2322	2100	546	220	1073
5	230	148	523	2280	2100	2504	1060	5075
7	176	300	359	1608	2100	1212	700	2364
8	499	252	471	1706	2100	1687	930	3332
ΔP среднее						1273		2518
Стандартное отклонение						729		1494

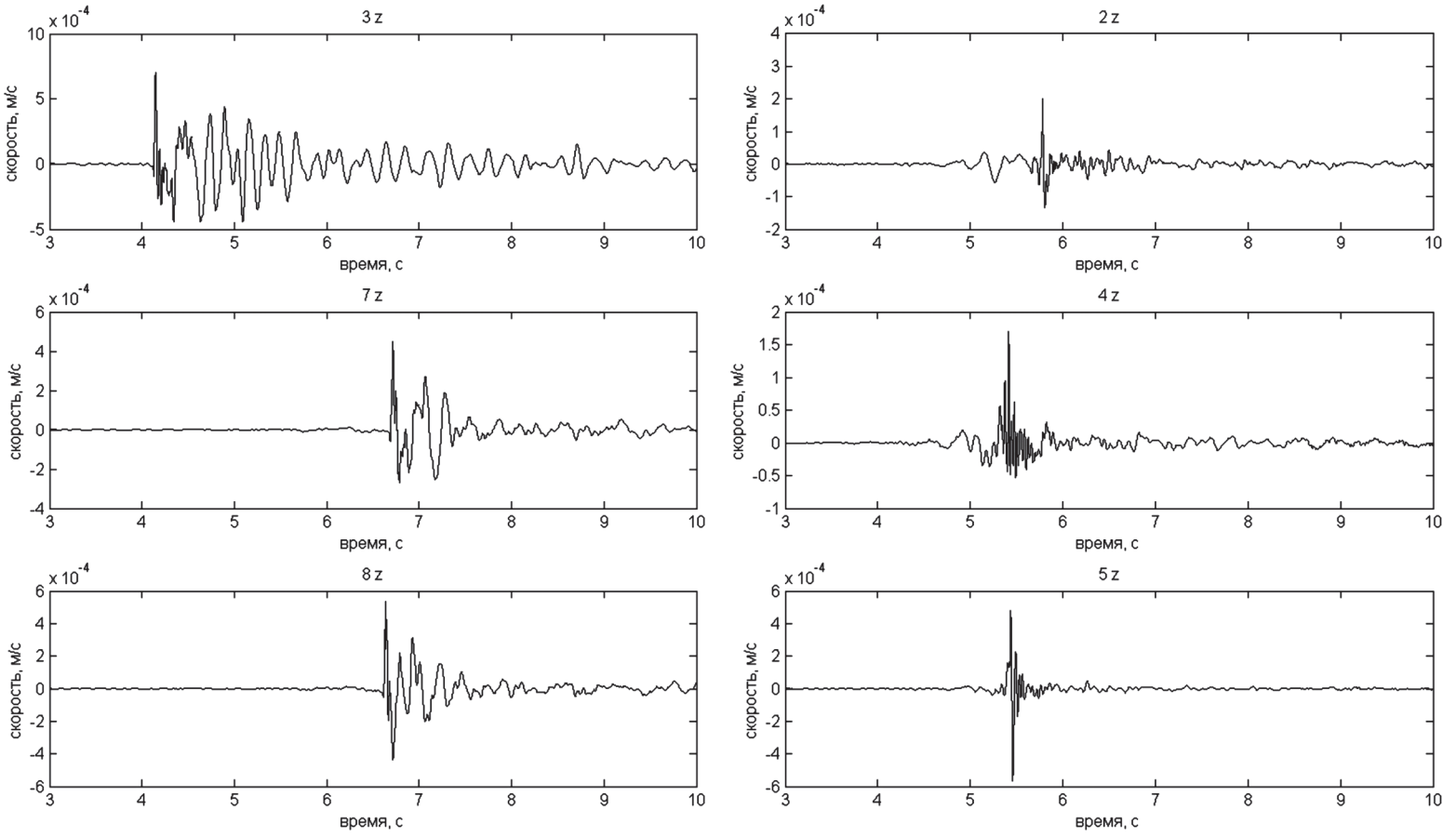


Рис. 2. Сейсмические записи в п. Коркино на 6 датчиках (представлена *Z* компонента скорости смещения) в период 3:22:03–3:22:10 GMT

По порядку величины все амплитуды близки (сотни мкм/с). На Z компоненте выделяются амплитуды на 5-м и 3-м датчике, на X компоненте – на 8-м и 3-м, на Y компоненте – на 3-м датчике. На 3-м датчике отмечается максимальное значение амплитуды по всем трем компонентам.

По-видимому, основной частотный состав сигнала, пришедшего на датчики, ниже собственной частоты геофонов 4,5 Гц и, следовательно, был зарегистрирован с искажением данной аппаратурой. Сильная зависимость частоты сигнала от скоростного строения верхних 20–30 метров приповерхностного слоя, ранее отмечалась в работе [Langston, 2004], в которой исследуются сейсмические колебания, вызванные ударной волной при пролете болида 3 ноября 2003 года. Анализ спектров для всех датчиков также показывает, что амплитудные максимумы спектра сигнала находятся на частотах, близких к частоте собственных колебаний сейсмометров. Поэтому, максимальные амплитуды, представленные в табл. 1, возможно являются заниженными. Например, при корректировке сейсмической записи для 3-го датчика по разностной формуле из [Беседина, 2014] с параметром затухания $h = 0{,}56$ и частотой, до которой нужно понизить колебания сейсмометра $f_0 = 0{,}8$ Гц, максимальная амплитуда сигнала на z компоненте возрастает до 990 мкм/с.

Согласно [Физика взрыва, 2002] для плоской прямой ударной волны в приближении плоской земной поверхности, характеризующейся постоянной скоростью, по закону сохранения количества движения, имеем формулу:

$$\Delta P \approx A_z \cdot \rho_{\text{грунта}} \cdot C_{\text{грунта}}, \qquad (1)$$

где ΔP – амплитуда волны давления в Па, A_z – амплитуда колебаний грунта, измеренная по вертикальной компоненте в м/с, $\rho_{\text{грунта}}$ – плотность в грунте в кг/м^3, $C_{\text{грунта}}$ – скорость продольных волн в грунте в м/с. В [Усольцева, 2014] для грозовых импульсов по данным акустического и сейсмического датчика, расположенных в одном месте, подтверждена правомерность использования соотношения (1) в случаях, когда акустическая волна вызывает колебания грунта, зафиксированные на сейсмограммах. При расчете давления для датчиков использовались $C_{\text{грунта}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$, представленные в табл. 1. $C_{\text{грунта}}$ измерены на карьере, $\rho_{\text{грунта}}$ получено из справочника. Дополнительно проведен расчет амплитуды волны давления по формуле (1), но вместо A_z используется максимальный разброс по z компоненте. Рассчитанные двумя разными способами амплитуды волны давления представлены в табл. 1. Среднее значение ΔP с использованием амплитуды колебаний грунта равно 1273 Па, а с использованием максимального разброса 2518 Па. Высокие значения стандартных отклонение для $\Delta P_{\text{среднее}}$ связаны с недостаточно точным учетом свойств грунта в местах установки датчиков, а также искажениями регистрации сигнала из-за установки геофонов в скважинах на глубине, а не на поверхности.

3. Определение времени вступления ударной волны на станции

Для оценки времени вступления ударной волны на сейсмостанциях в п. Коркино используется время самой яркой вспышки 03:20:32.2 (точность 0,1°с) из [Popova et al., 2013]. Считается, что вспышка произошла на высоте ~30 км. Согласно [Попова и др., 2013] средняя по высоте скорость звука по данным метеостанции

Верхнее Дуброво равна 0,301 км/с. Оценки эпицентрального расстояния, азимута и угла падения для ударных волн проводятся с помощью построения перпендикуляра из данной точки к траектории пролета болида. Траектория считалась прямой линией, проходящей через 2 точки: 61,193°E, 54,864°N, h = 25,0 км и 60,943°E, 54,892°N, h = 20,0 км [Borovicka et al., 2013]. Теоретическое время вступления ударной волны рассчитывалось по формуле из [Попова и др., 2013], которая выведена из предположения, что ударная волна приходит из ближайшей точки к траектории.

Полученные теоретические оценки времени вступления ударной волны на станции в Коркино и определенные по сейсмограммам, представлены в табл. 2. Так как на датчиках 2, 4, 5, 7, 8 сначала идут слабые колебания, а затем происходит резкий всплеск, считалось одинаково вероятным время вступления ударной волны от начала слабых колебаний до начал резкого всплеска. Из этих соображений рассчитывалась ошибка для датчиков 2, 4, 5, 7, 8.

Измеренное время вступления волны отличается менее чем на 1 секунду от теоретического. Для датчиков 2, 3, 4, 5 измеренное среднее время позже теоретического и ошибка измерения времени вступления не превосходит 0,34 секунды. Для 7 и 8 датчиков измеренное среднее время вступления раньше теоретического, ошибка измерения превышает ошибку для датчиков 2, 3, 4, 5 и равна 0,49–0,50 сек.

Таблица 2

Теоретически рассчитанные азимут, угол падения, время вступления ударной волны и реальные времена вступления, определенные по сейсмограммам, в п. Коркино

№ дат	Азимут (град)	Угол падения (град)	Время вступл., теоретическое (мм:сс)	Время вступл., реальное (мм:сс±сс)
2	239	21	22:04.4	22:05.33±0.4
3	243	20	22:03.4	22:04.15±0.05
4	240	21	22:04.6	22:05.02±0.34
5	240	21	22:04.4	22:05.27±0.22
7	238	21	22:06.4	22:06.19±0.50
8	238	21	22:06.4	22:06.13±0.49

4. Определение направления, угла падения и координат акустического источника

Определение направления на источник и угла падения проводилось с помощью изучения траектории движения частиц по трехкомпонентной станции [Montalbetti and Kanasewich, 1970]. Проведенный поляризационный анализ показывает, что в ближней зоне акустосейсмическая волна очень неустойчива, ее азимутальное направление часто меняется. Для расчета координат и высоты источника по трем ком-

понентам использовались значения азимута и угла падения, полученные для 3-го датчика, так как на нем указанные величины остаются постоянными в пределах ошибки дольше по времени, чем на других датчиках.

Начальные колебания частиц на 3-м датчике (временное окно 0,07 сек) изображены на рис. 3. Направление главной оси эллипса, полученного при проекции траектории движения частицы на горизонтальное сечение, равно 224°±6°. Оно сохраняется в течение 0,07 секунд, что соответствует 35 точкам на сейсмограмме, так как оцифровка записи производилась с частотой 500 Гц. Это направление соответствует азимуту на источник. Угол падения, вычисленный по вертикальной проекции траектории на плоскость N-Z, равен 20°, а по вертикальной проекции траектории на плоскость E-Z равен 26,5°. Такие углы сохраняются только в течение 0,02 секунд (15 точек на сейсмограмме). Движение в вертикальных плоскостях происходит по часовой стрелке.

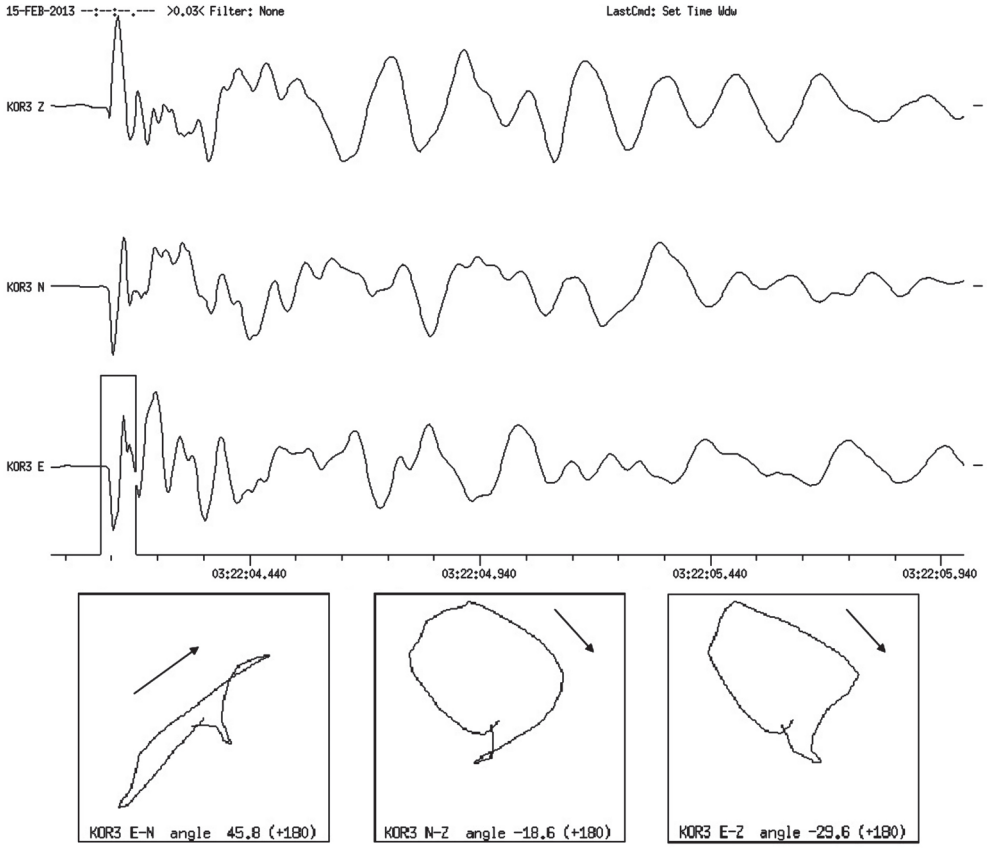


Рис. 3. Скорости смещения грунта на 3-м датчике на трех компонентах и проекции траектории движения частиц на горизонтальную плоскость (E-N) и две вертикальные (N-Z и E-Z) (временное окно 0,07 сек выделено прямоугольником на сейсмограмме)

Анализ траектории движения частиц на 2-ом датчике также показывает, что существует колебательный цуг, во время которого траектории движения частиц

близки к изученным траекториям на 3-м датчике (рис. 4). Азимут, определенный по горизонтальной проекции, для 2-го датчика равен 214°, направление сохраняется в течение 0,03 секунд. Угол падения, вычисленный по вертикальной проекции траектории на плоскость N-Z, равен 30°, а по вертикальной проекции траектории на плоскость E-Z – 23°. Как и на рис. 3, направление движения частиц нормальное.

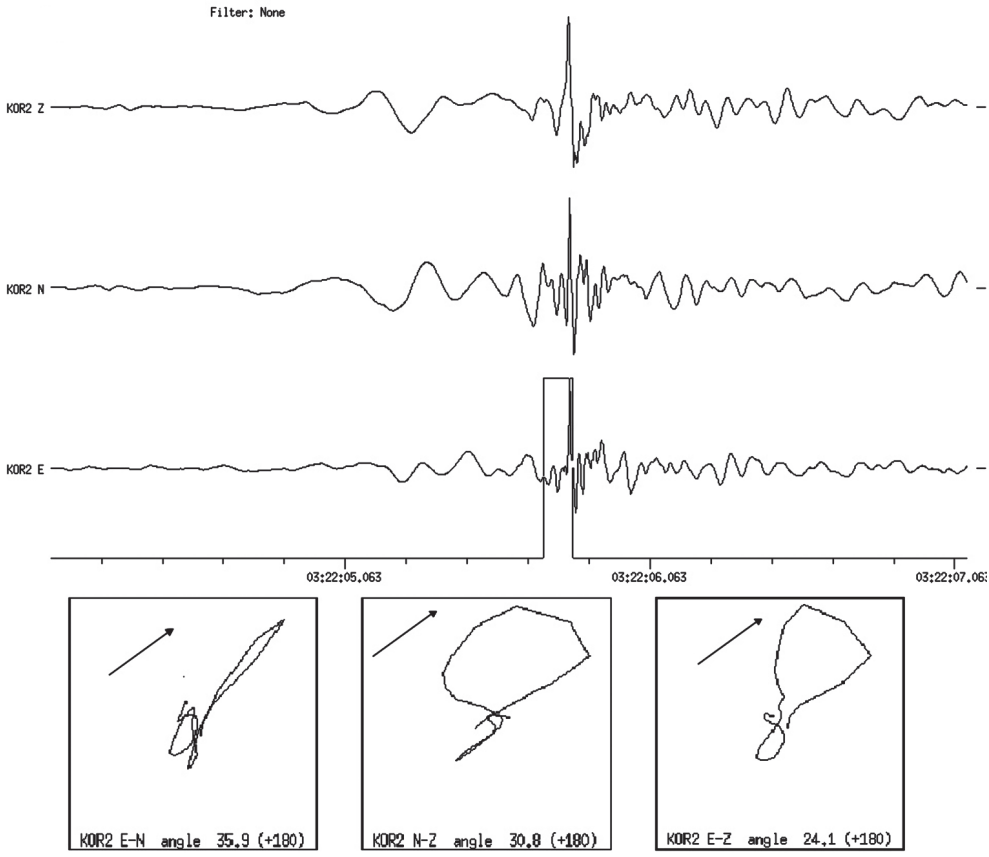


Рис. 4. Скорости смещения грунта на 2-м датчике на трех компонентах и проекции траектории движения частиц на горизонтальную плоскость (E-N) и две вертикальные (N-Z и E-Z) (временное окно 0,07 сек выделено прямоугольником на сейсмограмме)

При анализе поляризации на остальных датчиках (4, 5, 7, 8) в п. Коркино не удается выявить единого направления прихода сигнала. Для примера результаты анализа для 5-го датчика представлены на рис. 5. Азимутальное направление, полученное по проекции E-N, равно 300°, значение азимута отличается от азимута для 3-го датчика на 76°,, а от азимута для 2-го датчика – на 86°. Угол падения, определенный для 5-го датчика по проекции N-Z, равен 5°, а по проекции E-Z – 19°. Движение частиц в вертикальной плоскости N-Z ретроградное, против часовой стрелки, а в плоскостях E-N и E-Z нормальное.

Измеренные координата и высота источника по трем компонентам для 3-го датчика представлены в табл. 3 и на рис. 6.

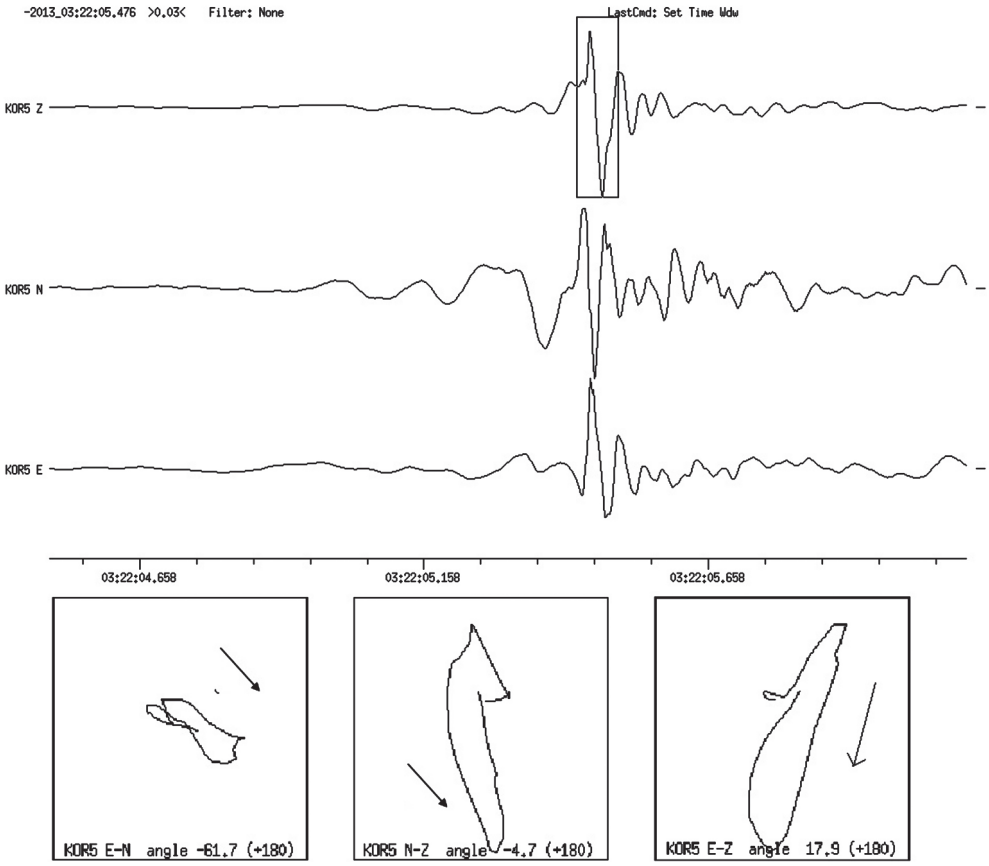


Рис. 5. Скорости смещения грунта на 5-м датчике на трех компонентах и проекции траектории движения частиц на горизонтальную плоскость (E-N) и две вертикальные (N-Z и E-Z) (временное окно 0,07 сек выделено прямоугольником на сейсмограмме)

Таблица 3

Результат определения координат и высоты акустического источника по азимуту, углу падения и времени вспышки

Метод	Азимут, (град)	Угол падения, (град)	С. Широта, (град)	В. Долгота, (град)	Высота, (км)
Три компоненты	224	23	54,84	61,29	25,1

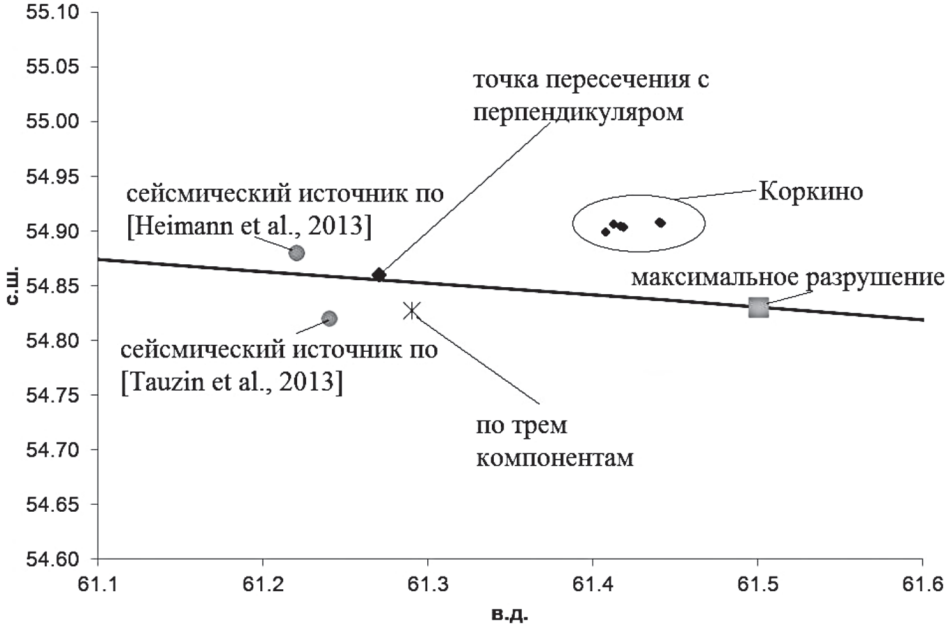


Рис. 6. Местоположение акустического источника, определенное в работе по трем компонентам, относительно траектории пролета болида

Выводы

Проведенные исследования доказывают, что максимальные колебательные цуги на сейсмограммах в п. Коркино связаны с воздушной волной, возникшей при движении тела со сверхзвуковой скоростью. Определенные по сейсмограммам времена вступления акустосейсмической волны для шести датчиков отличаются менее чем на 1 секунду от теоретически рассчитанных времен прихода ударной волны в эти точки. Оцененная высота акустического источника с использованием одного трехкомпонентного датчика менее чем на 5 км отличается от высоты пролета болида. Определенное юго-западное направление на акустический источник от п. Коркино совпадает с направлением, рассчитанным теоретически, согласно [Попова и др., 2013]. Наблюдаемое на 3-м датчике резкое вступление волны характерно для источников акустической природы [Lin, Langston, 2009], [Kitov et al., 1997], [Langston, 2004]. Частотный состав колебаний (4–10 Гц) близок к частотному составу сейсмических колебаний, инициированных акустическим источником.

Амплитуда рассматриваемых колебаний согласно табл. 1 имеет порядок сотни микрон. Это самый сильный известный авторам регистрируемый сейсмометром акустический сигнал. В [Kitov et al., 1997] амплитуда давления – 10–50 Па, максимальная амплитуда сигнала 2–5 мкм, в [Langston, 2004] – амплитуда давления 0,1 Па, амплитуда скорости смещения 1,2 мкм/с. Рассчитанные амплитуды волны давления, в целом, соответствуют карте избыточного давления из [Popova et al., 2013], полученной на основе анализа повреждений в домах и на улице.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.М. Овчинникову за ценные советы и замечания и О.П. Поповой за важные пояснения и предоставление необходимой литературы.

Литература

Беседина А.Н. Научное обоснование методов коррекции волновых форм при проведении сейсмических наблюдений // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва, ИДГ РАН, 2014.

Попова О.П., В.В. Шувалов, Ю.С. Рыбнов, В.А. Харламов, Д.О. Глазачев, В.В. Емельяненко, А.П. Карташова, Дженнискенс П. Параметры челябинского метеороида. Анализ данных // Динамические процессы в геосферах. Вып. 4.: Сборник научных трудов ИДГ РАН. Москва, ГЕОС, 2013, с. 10–21.

Усольцева О.А. Отчет по проекту РФФИ № 12-05-31472, 2014 г.

Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко, Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002, 832 с.

Харламов В.А., О.П. Попова, Ю.С. Рыбнов, Е.Д. Подобная, Дженнискенс П. Оценка по данным регистрации 3D-места излучения звукового сигнала при взрыве челябинского метеорита // Настоящий сборник, 2014.

Borovicka Jirı´, Pavel Spurny, Peter Brown, Paul Wiegert, Pavel Kalenda, David Clark, Luka´sˇ Shrbeny. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // doi:10.1038/nature12671, 2013.

Brown P.G., J.D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, M.B. Boslough, J. Borovička, N. Brachet, D. Brown, M. Campbell-Brown, L. Ceranna, W. Cooke, C. de Groot-Hedlin, D.P. Drob, W. Edwards, L.G. Evers, M. Garces, J. Gill, M. Hedlin, A. Kingery, G. Laske, A.Le Pichon, P. Mialle, D.E. Moser, A. Saffer, E. Silber, P. Smets, R.E. Spalding, P. Spurný, E. Tagliaferri, D. Uren, R.J. Weryk, R. Whitaker & Z. Krzeminski. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature, 503, 238–241, 2013, doi:10.1038/nature12741.

Heimann S., Á. González, R. Wang, S. Cesca, T. Dahm. Seismic Characterization of the Chelyabinsk Meteor's Terminal Explosion // Seismological Research Letters Volume 84, Number 6 November/December 2013.

Kitov, I.O., Murphy J.R., Kuznetsov O.P., Nedoshivin N.I. An analysis of seismic and acoustic signals measured from a series of atmospheric and near-surface explosions // Bull. Seismol. Soc. Am., vol. 87, No. 6, pp. 1553–1562, 1997.

Kitov, I., D. Bobrov, M. Rozhkov, and K. Sitnikov. The DPRK 2013 underground test and Chebarkul meteorite:joint interpretation of seismic, infrasound, acoustoseismic, and seismoacoustic waves, International Data Centre, Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization Vienna, Austria, 2013, oral report.

Kvaerna, T. And D.J. Doornbos (1986). An integrated approach to slowness analysis with arrays and three-component stations, Semiannual Tech. Summary, 1 October 1985-31 March 1986, NORSAR Sci. Rept. No. 2-85/86, Kjeller, Norway.

Lin T.-L., Langston C.A. (2009) Thunder-induced ground motions: 1. Observations // JGR. 2009. V. 114. B04303. 19 pp. Doi :10.1029/2008JB005769

Langston, C.A. (2004), Seismic ground motions from a bolide shock wave // J. Geophys. Res., 109, B12309, doi:10.1029/2004JB003167.

Montalbetti J.F. and E.R. Kanasewich (1970). Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 21 (2), 119–129.doi:10.1111/j.1365-246X.1970.tb01771.x.

Popova Olga P., Peter Jenniskens, Vacheslav Emel'yanenko, Anna Kartashova, Eugeny Biryukov, Sergey Khaibrakhmanov, Valery Shuvalov, Yurij Rybnov, Alexandr Dudorov, Victor I. Grokhovsky, Dmitry D. Badyukov, Qing-Zhu Yin, Peter S. Gural, Jim Albers,

Mikael Granvik, Läslo G. Evers, Jacob Kuiper, Vladimir Kharlamov, Andrey Solovyov, Yuri S. Rusakov, Stanislav Korotkiy, Ilya Serdyuk, Alexander V. Korochantsev, Michail Yu. Larionov, Dmitry Glazachev, Alexander E. Mayer, Galen Gisler, Sergei V. Gladkovsky, Josh Wimpenny, Matthew E. Sanborn, Akane Yamakawa, Kenneth L. Verosub, Douglas J. Rowland, Sarah Roeske, Nicholas W. Botto, Jon M. Friedrich, Michael E. Zolensky, Loan Le, Daniel Ross, Karen Ziegler, Tomoki Nakamura, Insu Ahn, Jong Ik Lee, Qin Zhou, Xian-Hua Li, Qiu-Li Li, Yu Liu, Guo-Qiang Tang, Takahiro Hiroi, Derek Sears, Ilya A. Weinstein, Alexander S. Vokhmintsev, Alexei V. Ishchenko, Phillipe Schmitt-Kopplin, Norbert Hertkorn, Keisuke Nagao, Makiko K. Haba, Mutsumi Komatsu, Takashi Mikouchi (the Chelyabinsk Airburst Consortium) Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // *Science* 29 November 2013: Vol. 342 no. 6162 pp. 1069–1073 *DOI:* 10.1126 / science.1242642/

Stammler K., Seismic Handler – programmable multichannel data handler for interactice and automatic processing of seismological analyses, Comp // Geosciences, 19, 1993, 135–140.

Tauzin B., Debayle E., Quantin C., Coltice N. Seismoacoustic coupling induced by the breakup of the 15 February 2013 Chelyabinsk meteor, V. 40, Issue 14, pages 3522–3526, 2013.

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА ПРИ ВЗРЫВЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА ПО ДАННЫМ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

***В.А. Харламов*[1], *О.П. Попова*[1], *Ю.С. Рыбнов*[1], *Е.В. Подобная*[1], *П. Дженнискенс*[2]**

[1] – Институт динамики геосфер РАН; [2] – SETI Institute

Приведена методика расчета пространственных координат и результаты вычислений пеленгов и координат источника излучения звукового сигнала и их ошибок при взрыве челябинского метеорита по данным регистрации акустических сигналов в различных пунктах.

Введение

Сигналы от пролета и взрыва челябинского метеорита были зарегистрированы различными датчиками во многих пунктах. В частности были сделаны записи акустических сигналов сейсмическими датчиками в карьере Коркино, а в ряде точек в Челябинске и окрестностях зафиксированы моменты времени вступлений звуковых сигналов в эти пункты. Координаты всех точек регистрации определены с высокой точностью. Совместная обработка набора некоторых записей позволила оценить пеленги и координаты места источника сигнала.

Регистрация в Челябинске

Приход звуковых сигналов от пролета метеорита зафиксирован рядом пунктов в г. Челябинске. Точки регистрации сигналов, их координаты и времена регистрации приведены в таблице S12 из [Popova et al., 2013]. На основании этих данных можно рассчитать как минимум пеленги на источник сигнала. Такие расчеты для некоторых комбинаций точек регистрации проведены с использованием метода PMCC (Progressive Multichannel Cross-Correlation method) [Cansi, 1995]. Результаты расчетов приведены в таблице 1. Точки регистрации – это номера наблюдений в таблице S12; базы – расстояния между точками наблюдений, РВП – разность времен прихода, пеленг – направление на источник, скорость следа – скорость распространения сигнала вдоль поверхности земли, угол места – направление на источник от горизонтальной плоскости.

Таблица 1

Базы регистрации и измеренные пеленги и скорости на источник сигнала от взрыва метеорита

Точки регистрации	Базы, км	РВП, с	Пеленг, гр.	Скорость следа, м/с	Угол места, гр.
417, 35, 216	9.5, 3.5, 7.7	24.4, 2.9, –21.5	191±5	357 ±5%	50
30 a, 160, 30	6.4, 4.1, 6.3	–1.1, –10, –8.9	194±3	416 ±8%	54
30 a, 160, 90	6.4, 4.4, 10.0	–1.1, –10.3, –9.2	195±2	297 ±10%	44
258, 60, 329	2.2, 3.0, 3.98	5.3, 1.5, –3.8	207±5	376 ±7%	51
31, 60, 329	3.2, 5.2, 4.0	9.1, 5.3, –3.8	204±3	323 ±5%	47
30a, 30, 90	6.3, 8.2, 4.4	10, 0.3, 10.3	201±3	350 ±5%	49
177, 237,452	4.97, 3.0, 7.8	0.7, 6.5, 5.75	198±12	406 ±21%	53

Погрешности расчетов определяются ошибками измерения РВП, скорости звука и размеров длин баз. При высокоточной привязке пунктов последней составляющей можно пренебречь. Ошибка в определении скорости звука так же невелика (~1%). Следует отметить, что здесь ошибки измерений РВП в пункты регистрации вызваны не столько ошибкой фиксации времени (±0,1 с), сколько выбранными событиями (табл. S12 из [Popova et al., 2013]), по которым фиксировались моменты прихода сигнала. При расчетах погрешность измерения РВП принята равной ±0,5 с.

Видно, что пеленги на источник по выбранным комбинациям точек регистрации близки и, учитывая погрешности расчетов, лежат в диапазоне 199±5°. Значения пеленгов, оцененные как кратчайшее расстояние до траектории пролета метеороида, составляют 198–204º, что оказывается в том же диапазоне.

Регистрация в карьере Коркино

На угольном карьере в г. Коркино размещены сейсмические датчики для регистрации событий в карьере (9 разнесенных в пространстве датчиков) [Усольцева и др., 2014]. 6 сейсмических датчиков зарегистрировали акустические сигналы от

Челябинского события 15.02.2013. Сигналы, записанные некоторыми датчиками, показаны на рис. 1. Координаты датчиков приведены в таблице 2. Для измерения координат источника по этим сигналам нужно не менее трех датчиков, образующих измерительный комплекс. На рисунке 2 показано расположение в пространстве датчиков К2, К4 и К8, образующих одну из измерительных систем. По координатам датчиков (табл. 2) рассчитываются размеры и ориентация баз в выбранной системе координат. Следовательно, база в данном случае вектор, имеющий 3 координаты. Необходимо также измерить РВП по сигналам рис. 1 в точках расположения эти датчиков.

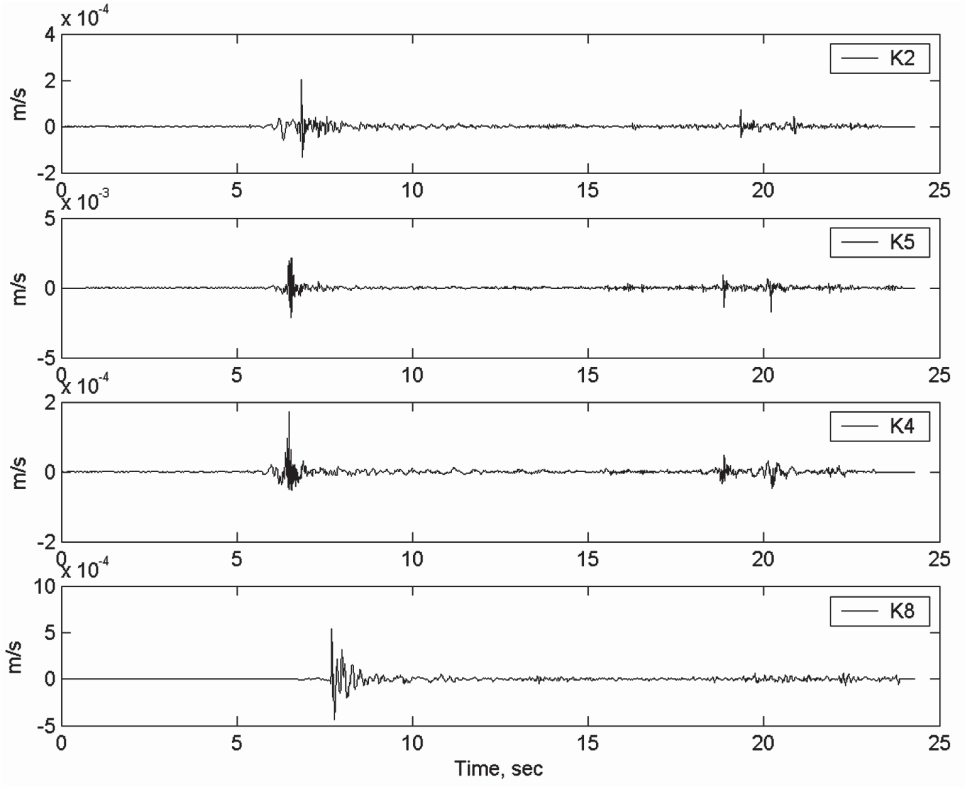


Рис. 1. Сигналы от взрыва Челябинского болида, зарегистрированные датчиками, установленными в карьере Коркино

Таблица 2

Координаты датчиков

Номер датчика	Широта°, с	Долгота°, в	Высота, м
К2	54.907614	61.412222	-51.879
К3	54.900001944	61.407267	234.930
К4	54.904536	61.417533	79.48
К5	54.904914	61.415767	59.40
К8	54.907619	61.4396	160.578

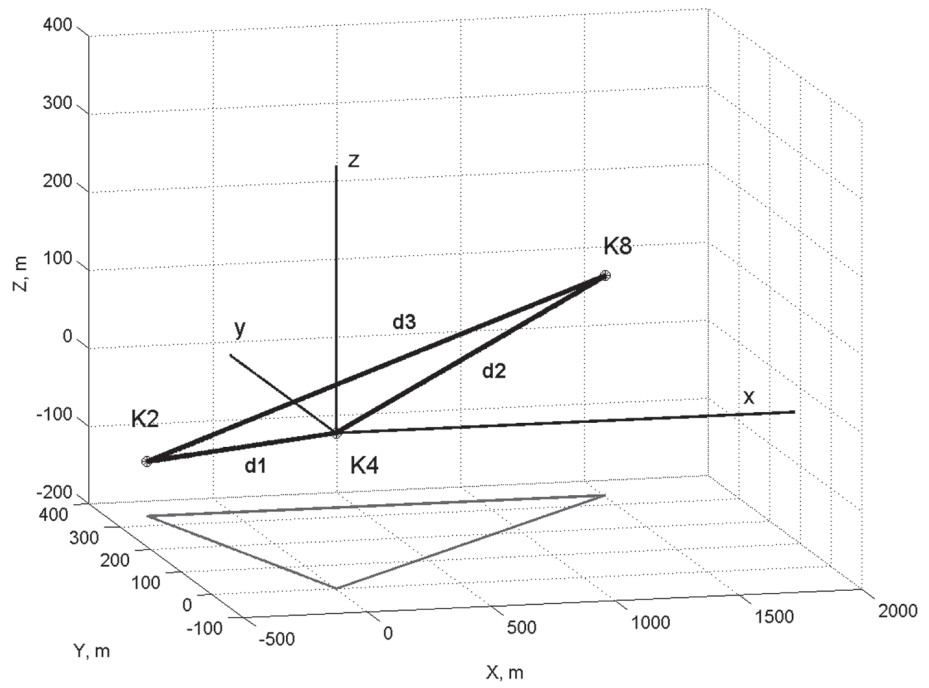


Рис. 2. Схема размещения в карьере трех датчиков К2, К4 и К8, образующих измерительную группу, и проекция группы на горизонтальную поверхность. База *d*1 = 499 м отклонена от оси *x* на угол $\varphi_1 = 135{,}2°$ и наклонена к оси *z* на угол $\theta_1 = 95°$; соответственно база *d*2 = 1549 м, $\varphi_2 = 12{,}8°$, $\theta_2 = 87°$; база *d*3 = 1859 м, $\varphi_3 = 0°$, $\theta_3 = 83{,}5°$

Характеристики баз и измеренные для каждой базы РВП приведены в таблице 3. *d*1–*d*6 – название базы, соединяющей датчики, приведенные в соответствующей ячейке. Приведены также наклонная длина базы, высота (вертикальный размер), угол поворота φ от направления на восток, угол отклонения от горизонтали θ.

Совокупность этих данных позволяет определить пространственные координаты расположения источника акустического сигнала от взрыва метеорита. То, что сигналы, показанные на рис. 1, зарегистрированы сейсмическими датчиками от акустического источника свидетельствуют их времена прихода в пункты регистрации (табл. 3), соответствующие скорости звука *c* = 300 м/с.

Таблица 3

Характеристики измерительных баз

База	Длина, м	Высота, м	Поворот φ°	Наклон θ°	dt, сек
*d*1-К4-К2	499.3	131.4	135.4	15.2	-0.368
*d*2-К4-К8	1549.3	81.1	12.8	3.0	1.222
*d*3-К2-К8	1859.0	212.5	0	6.5	0.854
*d*4-К3-К2	945.2	285.8	69.3	17.5	1.56
*d*5-К3-К8	2325.4	73.3	21.3	1.8	2.42

Методика измерения координат источника сигнала

Следует сразу оговориться, что расчеты проводятся в предположении точечного источника. По результатам измерений РВП *dt* для каждой базы вычисляется параметр поверхности положения источника *dr* = *dt***c* (разность расстояний от источника до образующих базу приемников, *c* – скорость звука), которая представляет собой гиперболоид вращения около направления базы. Задача определения места или направления на источник сводится к расчету поверхностей положения (гиперболоидов) для всех баз и отысканию их линий и точек пересечения. Такая задача решена в [Харламов, 2003].

Необходимы три базы (например, *d*1, *d*2 и *d*3) для определения трех координат источника акустического сигнала, находящегося в произвольной точке М пространства (рис. 2). Разности расстояний от точки М до соответствующей пары приемников К4-К2, К4-К8 и К2-К8 определяют 3 гиперболоида вращения вокруг соответствующей базы.

Проведены расчеты в системе координат с центром, совмещенным с точкой приемника К4, ось *z* вертикальна, а ось *x* направлена на восток и ось *y* направлена на север. При этом базы *d*1, *d*2, *d*3, *d*4 и *d*5, являющиеся осями вращения гиперболоидов, не совпадают ни с одной из координатных осей. Поэтому для записи уравнения конкретного гиперболоида в канонической форме следует выбрать другую систему координат, в которой ось x' повернута на угол φ_i и ось z' наклонена на угол θ_i относительно соответствующих осей исходной системы координат.

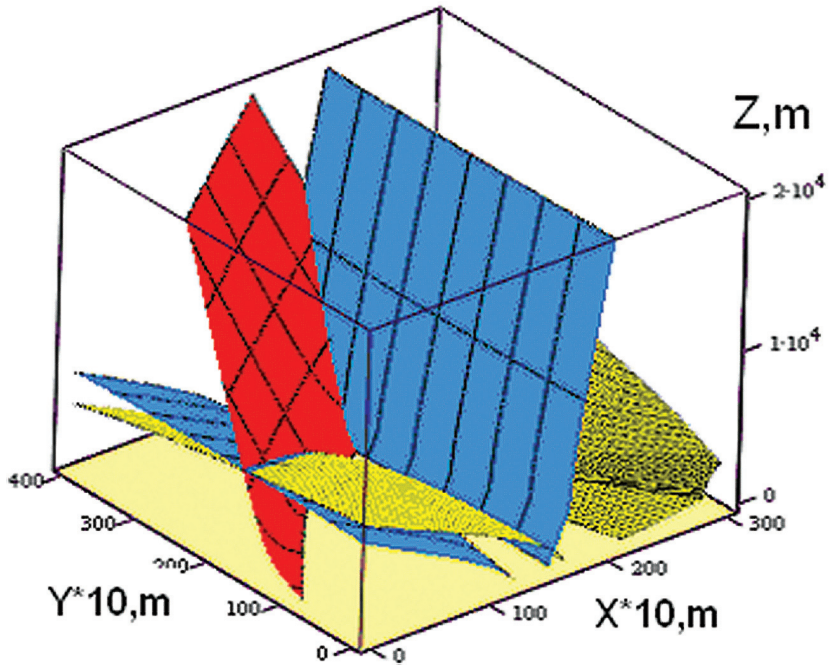


Рис. 3. Фрагменты гиперболоидов, построенных по трем базам *d*1 (К4-К2), *d*2 (К4-К8) и *d*3 (К2-К8) и их линии пересечения, которые практически слились в одну, изображенную на рис. 4.

В повернутой системе координат в качестве оси вращения гиперболоида выберем ось x'.

Пример пересечения трех гиперболоидов в пространстве показан на рис. 3. Пересечение каждой пары линий положения дает точку.

Результаты расчетов

По приведенной методике с использованием данных таблицы 3 проведены расчеты для трех сочетаний пар баз. В качестве примера на рис. 4 показаны построенная линия пересечения гиперболоидов по базам (К4-К2) и (К4-К8) и на ней отмечена точка источника сигнала. Место источника сигнала находится как точка пересечения линии пересечения гиперболоидов с конусом, построенным из начала координат под углом ε (угол места источника). Отыскание точки пересечения показано на рис. 5. Диапазон углов места ε = 73–75° источника найден из данных регистрации пролета метеорита, показанных на Fig. S26 из [Popova et al., 2013].

Результаты вычислений приведены в таблице 4. Оценим точность полученных результатов. Расчет ошибок по методике, изложенной в [Харламов, 2003], дает следующие результаты. Так, при величине ошибки измерения РВП σ_{dt} = 0,01с

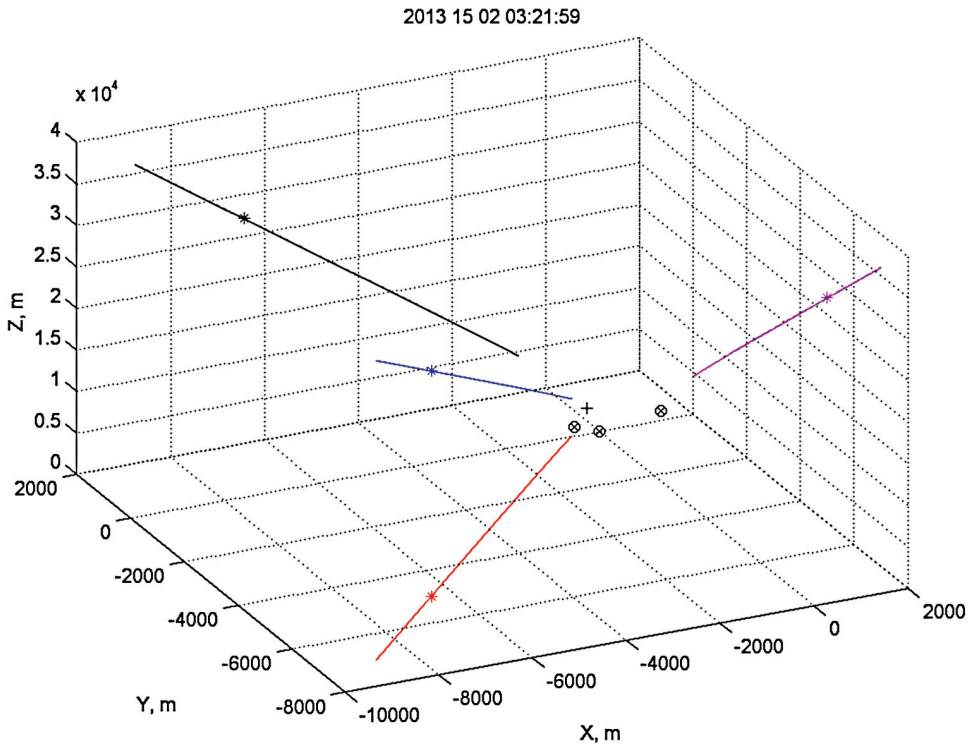


Рис. 4. Линия положения источника сигнала в пространстве и ее проекции на координатные плоскости; ☼ – точка источника сигнала с координатами X = –6300 м, Y = –4500 м, Z = 26600 м и α = 235°

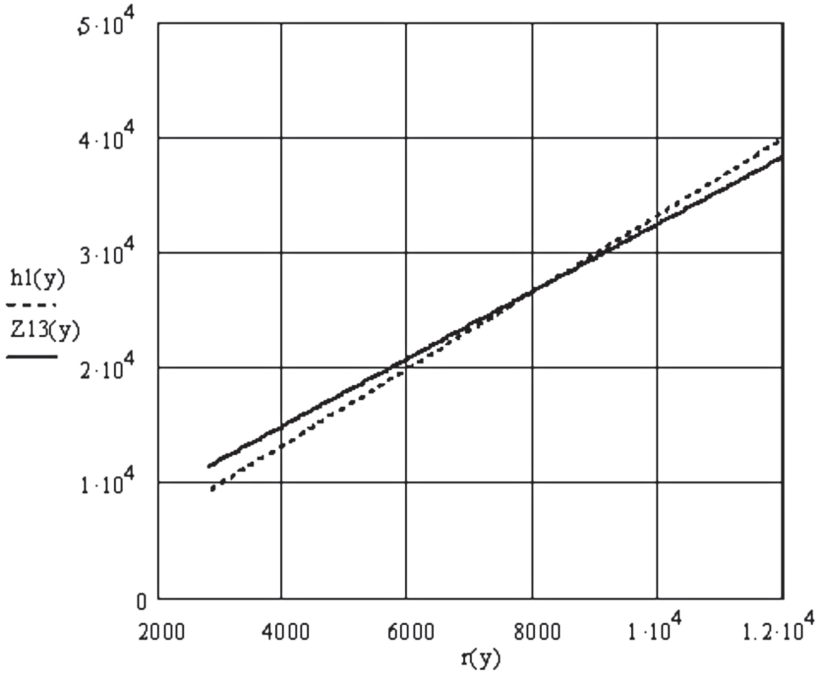


Рис. 5. Проекция линии положения источника сигнала (сплошная линия) и конуса с углом ε = 73,2° (пунктирная линия) на плоскость *r0h*; Точка пересечения линий дает координаты источника сигнала *r* = 7500 м, *h* = 26 500 м

($\sigma_{\Delta r}$ = 3 м) получаем величины флуктуаций гиперболоидов σ_h = 100–300 м и величину ошибок линий положения 550 м, которая определяет точность измерения координат. При этом ошибка измерения высоты равна σ_z = 700 м, а ошибка измерения пеленга σ_α = 3°.

Таблица 4

Рассчитанные координаты источника сигнала от взрыва метеорита

	Базы К2-К4-К8	**Базы К2-К3-К8**	**Базы К2-К3-К4**
Дальность, м	7500	6000	6700
Высота, м	27000	25500	26300
Азимут, º	232	240	243
Угол места, º	73.2	76.5	75.5

Рассчитанные пеленги от точек регистрации в Челябинске и от карьера в Коркино нанесены на карту рис. 6. С учетом погрешностей измерений пеленгов нанесен район возможных ошибок определения точки источника.

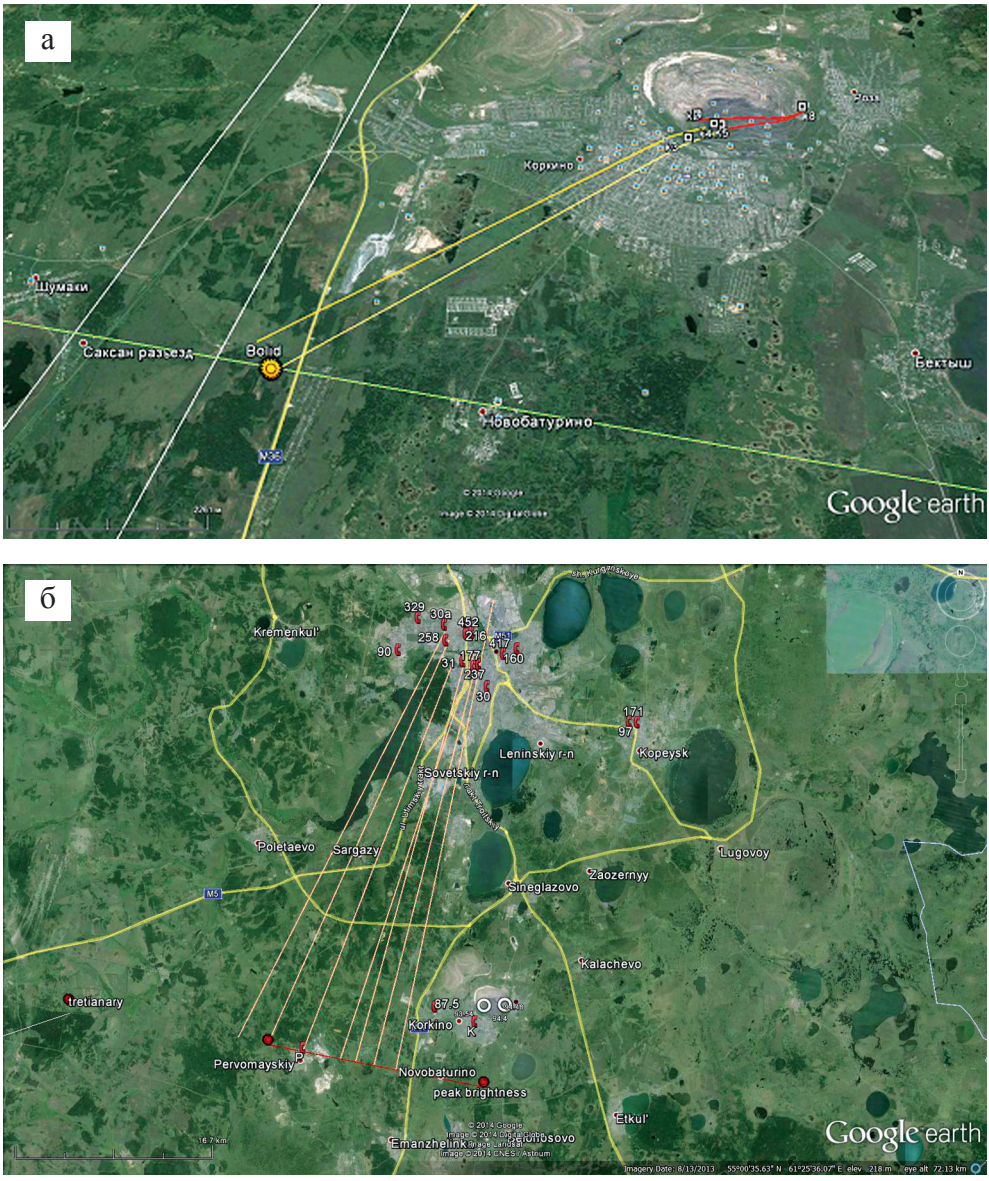


Рис. 6. Карта района расположения рудника в Коркино, на которой проложены измеренные на источник сигналов пеленги от карьера Коркино (а) (от измерительных групп К4-К2-К8 и К3-К2-К8) и пеленги от пунктов регистрации в Челябинске (б). Нанесена также траектория пролета болида [Popova et al., 2013]

Следовательно, по результатам расчетов координаты источника составляют высота ≈26 км с погрешностью σ_z = 700 м, дальность 7–8 км и пеленг 235–240° с ошибкой σ_α = 3°. Таким образом, средние географические координаты источника акустического сигнала от разрушения метеорита (при измерении на Коркинском карьере) составляют 54,86° с.ш. и 61,31° в.д. Кратчайшее расстояние до траектории соответствует пеленгу 238–243°.

Литература

Усольцева О.А., Дягилев Р.А., Мулев С.Н. Сейсмические колебания, вызванные ударной волной от Челябинского болида в ближней зоне. (Настоящий сборник).

Харламов В.А. Измерение координат источников инфразвука в трехмерном пространстве // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Книга 2: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: 2003. С. 386–396.

Canci Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The PMCC method // Geophys. Res. Lett., 22, p. 1021–1024, doi:10.1029/95GL00468, 1995.

Г. Корн и Т. Корн. Справочник по математике. М.: Наука, 1977, 832 с.

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. V. 342. P. 1069–1073.

ПРОНИКНОВЕНИЕ ФРАГМЕНТА ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА ЧЕРЕЗ ЛЕД ОЗЕРА ЧЕБАРКУЛЬ: ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Б.А. Иванов

15 февраля 2013 г. крупный каменный метеорит вошел в атмосферу Земли и разрушился в несколько этапов над городом Челябинск. Основная масса мелких обломков выпала на поверхность с малой (терминальной) скоростью, однако зафиксировано падение, по крайне мере одного крупного (~600 кг) обломка, пробившего лед на озере Чебаркуль. Позднее этот обломок (или его часть) был извлечен со дна озера. В месте падения образовалась округлая полынья размером 6–8 м, частично покрытая плавающим льдом. В настоящей работе проводится предварительный анализ процесса образования этой полыньи с учетом минимальной (обнаруженной) массы обломка и его скорости, оцененной величиной, близкой к терминальной скорости падения данной массы в атмосфере.

Введение

Падение Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. считается крупнейшим событием такого рода со времени Тунгусского взрыва 1908 г. [Galimov, 2013; Popova et al., 2013]. Анализ инструментальных наблюдений позволил сделать с высокой достоверностью оценки орбиты, начальной массы и процесса дробления Челябинского метеороида в атмосфере [Borovicka et al., 2013; Popova et al., 2013]. Детали распределения по размерам собранных обломков метеорита описаны в дополнительных материалах к статье Поповой и др. [Popova et al., 2013]. Там же подробно описана находка на озере Чебаркуль округлой полыньи размером 6–8 м. Была найдена запись фоторегистратора, зафиксировавшего момент удара по льду, позднее на дне озера вблизи полыньи был обнаружен и поднят на поверхность фрагмент метеорита массой около 600 кг (см. дополнительные материалы к [Popova et al., 2013]).

Первые расчеты удара по льду (раздел G. Gisler в доп. материалах к [Popova et al., 2013]) были проведены, судя по рисункам, только для начальной стадии проникновения метеоритного фрагмента через лед. Целью данной работы является численное моделирования Чебаркульского падения до более поздних стадий процесса (образование переходной полости и ее схлопывание) и анализ результатов моделирования в контексте известных данных о взрывании льда и ударов в воду, не покрытую льдом.

Взрывная аналогия

Для постановки задачи численного моделирования Чебаркульского падения полезно оценить энергию события по данным о взрывах подо льдом. Взрывание плавающего льда является широко применяемым методом регулирования ледохода на реках и озерах [Саков et al., 1998; Mellor, 1987]. Полной аналогии между взрывом и ударом нет, так как процесс подводного взрыва включает расширение в воде газового пузыря, заполненного продуктами детонации, в то время как полость в воде при ударе образуется за счет кинетической энергии, переданной в воду при торможении ударника. Однако по опыту сравнения взрывов и ударов в песчаной мишени можно предположить близость величин энергии источника для схожих параметров кратера [Oberbeck, 1971].

Здесь наиболее интересны данные о взрывах зарядов непосредственно под поверхностью льда [Van der Kley, 1965] (цитируется по рисункам в [White and Kay, 1996], доступной в Интернете в книгах Гугла). Доступные данные для льда толщиной 0,76 и 2 м показаны на рис. 1 (данные численного моделирования обсуждаются ниже). Для сравнения показаны рекомендации МЧС [Саков et al., 1998] для переменной приведенной глубины заряда подо льдом, толщиной от 0,6 до 0,8 м. Веса зарядов пересчитаны в энергию взрыва в МДж.

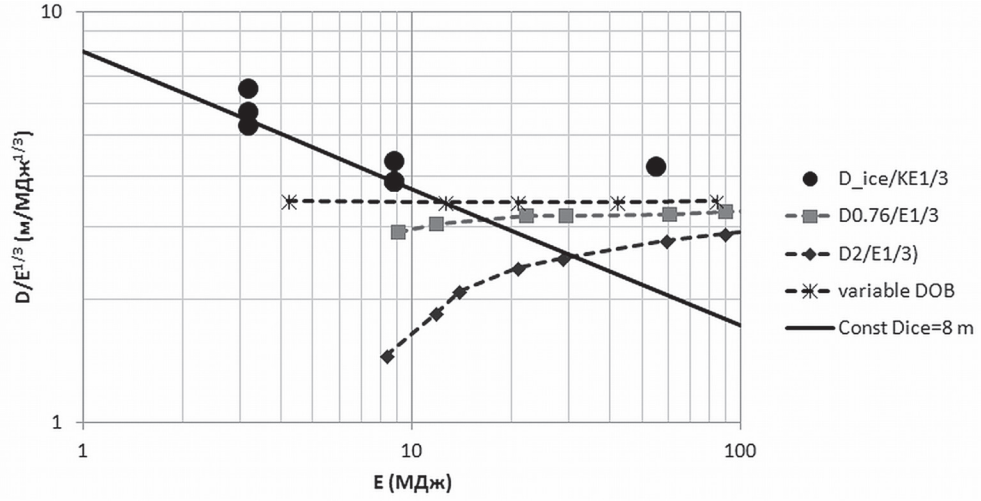


Рис. 1. Приведенный диаметр полыньи в плавающем ледяном поле, $D/E^{1/3}$ (м/МДж$^{1/3}$), при модельных ударах (черные кружки), описанных ниже, и взрывах: серые квадраты – взрыв подо льдом и ромбы – взрыв на нижней поверхности льда толщиной 76 см и 2 м, соответственно [Van der Kley, 1965]; звездочки – взрывы на различной глубине подо льдом толщиной 60–80 см [Саков et al., 1998]

Размер Чебаркульской полыньи, принятый здесь равным 8 м, показан на рисунке сплошной наклонной линией, соответствующей уменьшению приведенного размера $D/E^{1/3}$ при увеличении энергии E, отложенной по горизонтальной оси рис. 1. Пересечение этой зависимости с экспериментальными данными о подледных взрывах происходит при энергии порядка 10–15 МДж, что соответствует весу заряда ВВ в диапазоне 2–4 кг. Представляется разумным предположить, что кинетическая энергия Чебаркульского фрагмента должна быть близка к этой величине.

Скорость и угол падения Чебаркульского фрагмента

Опубликованные в статье Поповой и др. [Popova et al., 2013] оценки (G. Gisler) указывают на диапазон параметров удара, пробивающего лед толщиной 70 см при температуре льда –25 °C, в пределах 100–1000 кг при скорости 600–1300 м/с. Из общего моделирования разрушения метеорита Попова и др. [Popova et al., 2013] предполагают угол падения затормозившихся в атмосфере обломков порядка 45° (как это упомянуто G. Gisler на стр. 87 Дополнительных материалов). Энергия таких ударов составляет от 18 до 170 МДж; нижний предел этих оценок соответствует выводам из взрывной аналогии (рис. 1). Однако в таблице S15 в [Popova et al., 2013] скорость удара фрагмента массой 600 кг оценивается в 225 м/с (что близко к терминальной скорости падения шара). Расхождение в оценках скорости Чебаркульского фрагмента внутри одной статьи (~1000 м/с в разделе G. Gisler'а против 250 м/с в таблице S15) привело к необходимости сделать независимые («во вторую руку») расчеты.

Использовалась модель каскадного дробления, когда каждый обломок, начиная с родительского тела, делится на две части, причем соотношение масс новых фрагментов к массе фрагмента, их порождающего, выбирается как случайное число в диапазоне от 0,5 (равные фрагменты) до, практически, нуля (родительский фрагмент выживает) [Ivanov et al., 2009]. Высоты фрагментации распределены равномерно от 20 до 30 км высоты. В качестве начальных условий взяты параметры входа метеорита из [Popova et al., 2013] – предполагается, что на высоте 100 км родительское тело массой 10,128.876 тонн (шар диаметром 18 м при плотности 3300 кг/м^3) имеет скорость 19,16 км/с, направленную под углом 18,3^o к местному горизонту (первая строка табл. S5a, [Popova et al., 2013]).

Для расчета движения обломков в атмосфере Земли использовалась программа, основанная (любезно предоставленная) на первичном коде, ранее созданная авторами работы [Artemieva and Shuvalov, 2001]. Были рассчитаны два модельных случая: (1) – все фрагменты имеют сферическую форму и (2) – все фрагменты имеют цилиндрическую форму с высотой, равной диаметру и летят торцом вперед. Зависимость коэффициента сопротивления c_D от числа Маха M для сферы была принята такой же, как и в [Popova et al., 2013]: $c_D = 0{,}43$ для $M < 0{,}5$ и $c_D = 1$ для $M > 1{,}4$ с плавным переходом в интервале $0{,}5 > M > 1{,}4$. Для цилиндра экспериментальные данные, собранные в [Hoerner, 1965], были аппроксимированы в виде: $c_D = 0{,}8$ для $M < 0{,}8$ и $c_D = 1{,}7$ для $M > 1{,}7$ с плавным переходом в интервале $0{,}8 > M > 1{,}7$. Модель порождает рой обломков, каждый из которых движется в невозмущенной атмосфере. Результаты интегрирования движения в стандартной атмосфере для фрагментов в интересующем нас диапазоне размеров показаны на рис. 2.

В наиболее вероятном диапазоне масс обломков (от найденного в ~600 кг до в несколько раз большей массы) прямое моделирование дает оценки скорости уда-

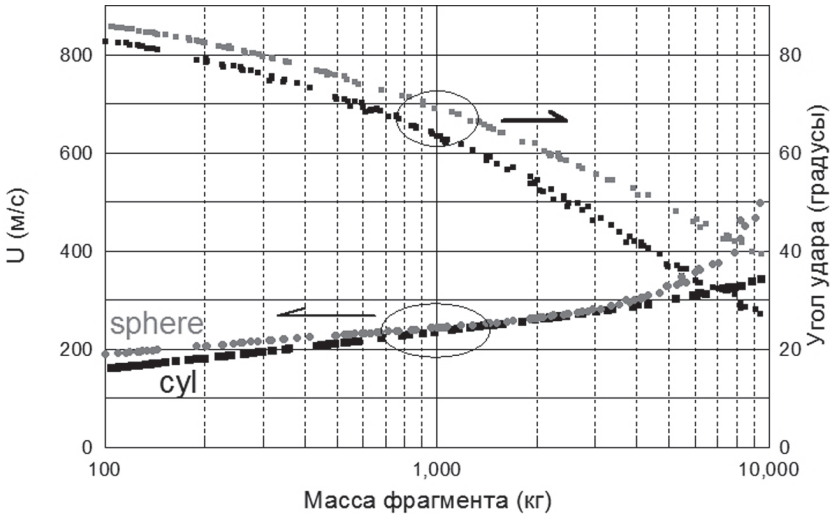


Рис. 2. Расчетные скорости (левая ось) и углы удара (правая ось) для фрагментов массой от 100 кг до 10 тонн в предположении сферической (серые значки) и цилиндрической (черные значки) формы фрагментов

ра 220–250 м/с и угол удара (к горизонту) в диапазоне 60–70°, что близко к вертикальному соударению, которое можно моделировать в двумерной осесимметричной постановке.

Численная модель проверялась на примере вертикального падения одиночного тела через экспоненциальную атмосферу и показала хорошее соответствие известному аналитическому решению.

Численное моделирование

Для интегрирования использовалась двумерная осесимметричная программа SALEB [Иванов, 2005], модифицированная из программы SALE [Amsden et al., 1980]. Разрушение и прочность льда и горных пород описаны ранее [Collins et al., 2004; Ivanov et al., 2010; Ivanov and Pierazzo, 2007; Ivanov and Pierazzo, 2011]. Уравнение состояния льда/воды [Ivanov, 2005] задавалось в табличном виде; термодинамика каждой фазы рассчитывалась по программе ANEOS [Thompson and Lauson, 1972]; материал метеорита описывался в табличном виде с ANEOS-параметрами из [Benz et al., 1989].

Начальные условия (несколько варьировавшиеся в процессе работы) в базовом варианте включают лед толщиной 1 м на поверхности водоема глубиной 10–15 м. Дно водоема задавалось как скальное основание, так и как жесткая граница. Радиус бассейна варьировался от ~15 до ~60 м. В центральной области расчетная зона покрыта регулярной сеткой с шагом $\Delta x = \Delta y$. Шаг составлял от 0,05 до 0,025 м. Сферический ударник имел диаметр, равный толщине льда (1 м), материал ударника описывался как ANEOS-дунит плотностью 3317 кг/м^3. Для качественного обзора косого удара было проведено несколько расчетов в плоской двумерной постановке. Скорость удара варьировалась от 60 до 500 м/с, кинетическая энергия – от 3 до 220 МДж. Механические свойства ударника описывались как два крайних слу-

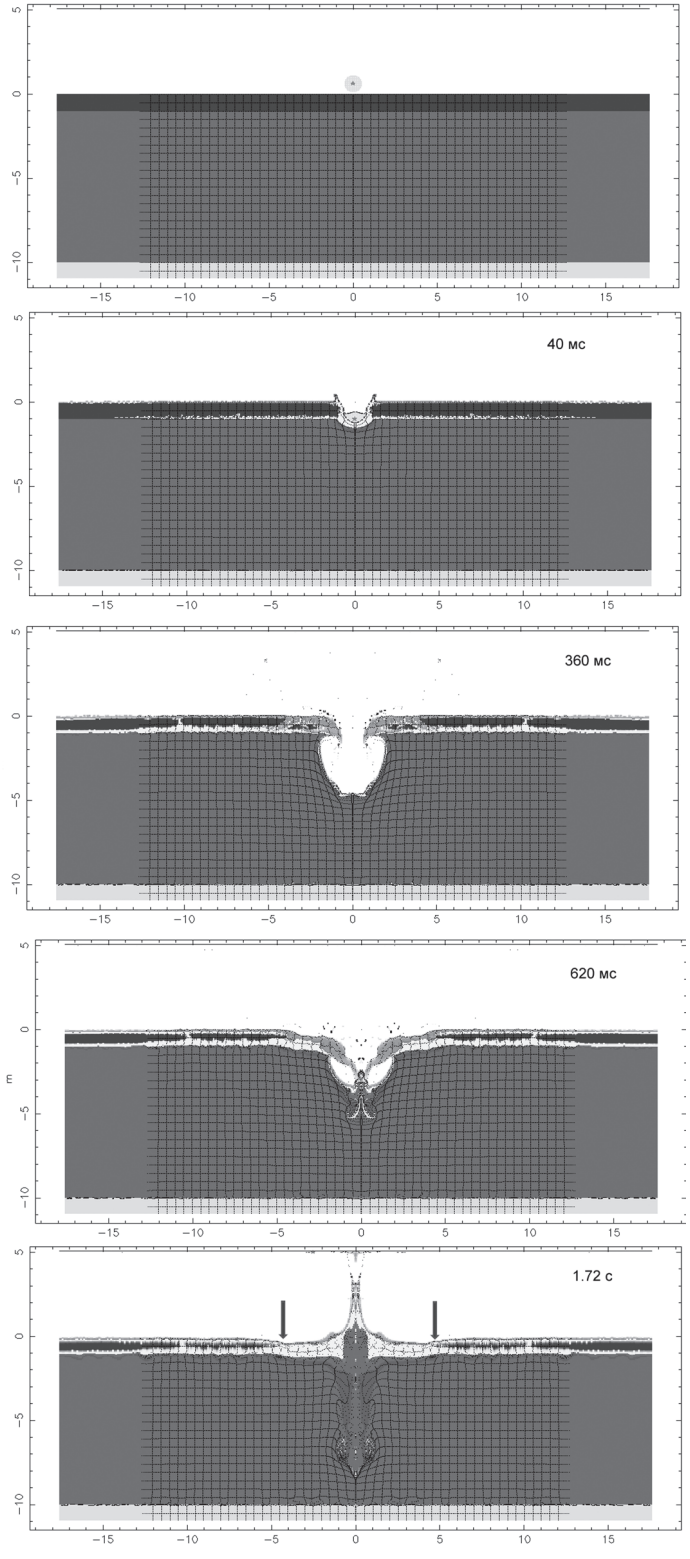


Рис. 3. Избранные кадры пробивания льда толщиной 1 м ударником диаметром 1 м со скоростью 60 м/с. На верхнем кадре темно-серый цвет отвечает неразрушенному льду, менее серый тон – воде, и светло-серый тон внизу – скальному дну, сделанному из того же материала, что и ударник. По мере разрушения льда используется все более светлый тон. Момент времени 360 мс соответствует началу коллапса переходной полости. Через 620 мс после удара идущее вверх дно полости встречается с падающим в полость льдом. На последнем показанном кадре (1,72 с) вертикальные стрелки указывают на край «полыньи» из сохранившего прочность льда. На расстоянии ~10 м от центра видны отдельные кольцевые трещины

чая: (1) – сыпучая среда с сухим трением (предельно трещиноватая горная порода) и (2) – упругий шар с пределом текучести в несколько ГПа, разрушающийся только при достаточно сильном растяжении. В последнем случае ударник достигал дна водоема как одно целое и рассыпался при ударе о дно. Наличие ила на дне озера в данной работе не учитывалось в виду трудности моделирования водонасыщенной взвеси – наличие ила может помочь сохранению обломка, достигшего дна.

Общая последовательность событий при ударе со скоростью 60 м/с сферического тела с диаметром, равным толщине льда h_{ice}, показана на рис. 3. Кинетическая энергия удара составляет ~3,16 МДж. В данном расчетном варианте ударник полагался «сильно трещиноватым», то есть сдвиговая прочность целиком определяется локальным давлением и постоянным трением. Такой ударник деформируется при пробивании льда и эффективно передает энергию в течение воды. В результате подо льдом возникает переходная полость, размеры которой ограничиваются растущей потенциальной энергией. По окончании роста дно полости вздымается вверх. Во встречном движении участвует часть ледяного покрова, разрушенного при пробивании. Падающий в полость лед встречается с движущимся вверх дном коллапсирующей полости, и процесс завершается воздыманием и опаданием центральной струи. Ко времени начала опадания струи диаметр «полыньи», окруженной льдом лишь частично потерявшим прочность, составляет около 9 м (или, в относительных единицах, 9 h_{ice}). При толщине льда в 0,7 м и диаметре ударника 0,7 м диаметр «полыньи» составил бы ~6,3 м.

Необходимо упомянуть ряд проблем, созданных устройством программы SALEB и относительно низким пространственным разрешением (20 ячеек на толщину льда и на диаметр ударника). Программа SALEB рассчитывает двумерную осесимметричную задачу. Следовательно, в ней невозможно описать образование радиальных трещин. Поэтому при выполнении критериев разрушения в некоторой точке материал считается «разрушенным», хотя в реальности это могут быть единичные радиальные трещины [Ivanov et al., 1997a; Ivanov et al., 1997b]. Низкое пространственное разрешение вынуждается желанием отодвинуть боковые стенки «водоема» как можно дальше, чтобы снизить краевые эффекты. Проведенные расчеты с вдвое большим разрешением (40 ячеек на диаметр ударника) позволили нам рассмотреть процесс пробивания льда более детально (рис. 4, а,б), но расчет с таким разрешением требует более недели машинного времени без распараллеливания исходного кода. Эту задачу пришлось отложить на будущее.

Пробивание льда «твердым» ударником качественно похоже на картину, показанную на рис. 3, с тем отличием, что после проникания ударник продолжает тормозиться в воде, оставляя за собой открытый канал. Здесь коллапс переходной полости начинается с закрытия канала (рис. 4, а,в,д). В классической гидродинамике схлопывание канала за телом, тормозящимся в воде, порождает струю, называемую струей Вортингтона (Worthington jet). В маломасштабных классических экспериментах [Mallock, 1918] эффект гравитационного коллапса водяной полости существенно осложняется поверхностным натяжением. В численных расчетах масштаба Чебаркульского удара поверхностное натяжение незначительно, что несколько меняет картину коллапса.

Эффективность образования полости в воде подо льдом можно оценить сравнением с известными результатами по удару в воду [Schmidt and Housen, 1987]. Эти данные собраны из двух групп экспериментов – удар твердых снарядов со скоростью до 2 км/с и падение капель в воду со скоростями в несколько метров в секун-

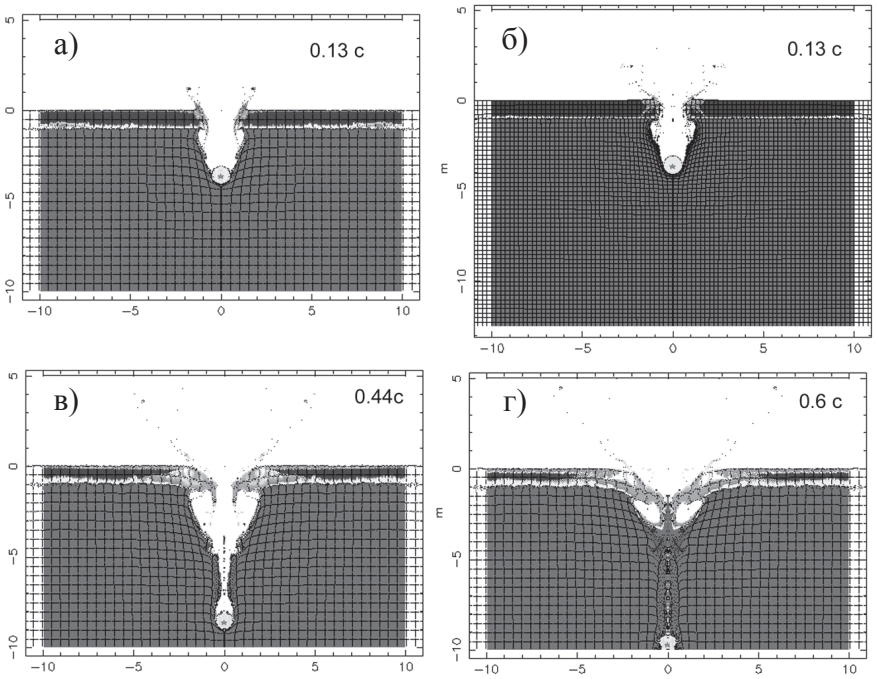


Рис. 4. Пробивание льда прочным ударником. Оттенки серого имеют то же значение, что и на рис. 3. Верхняя пара рисунков сравнивает момент времени 0,13 с для вариантов с пространственным разрешением 20 (а) и 40 (б) ячеек на диаметр ударника. Рисунки (в) и (г) показывают схлопывание следа ударника в воде (в) и коллапс полости в воде при встрече центральной восходящей струи с падающим в полость льдом (г) (сравните с рис. 3, 620 мс)

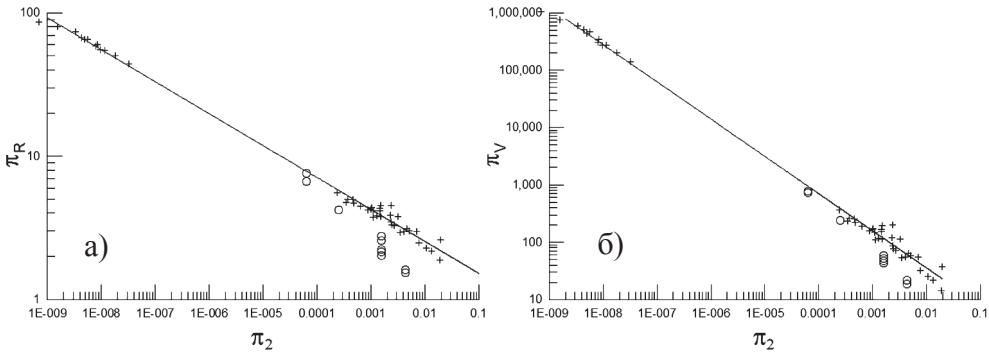


Рис. 5. Эффективности ударов в чистую воду (кресты) и модельных ударов через лед (кружки) сближаются с ростом скорости удара (уменьшение π_2)

ду. Данные о размерах полостей доступны в базе данных K. Holsapple[1]. На рис. 5 результаты расчетов сравниваются с базой данных в приведенных параметрах [Holsapple and Housen, 2007]: $\pi_2 = g \times m^{1/3}/U^2$, $\pi_V = V^*(\rho/m)$, $\pi_R = R^*(\rho/m)^{1/3}$, где g – ускорение силы тяжести, m – масса ударника, U – скорость удара, V – максималь-

[1] http://keith.aa.washington.edu/craterdata/ (проверено 30 марта 2014 г.)

ный объем полости в воде ниже уровня исходной поверхности, ρ – плотность воды и *R* – максимальный радиус полости в момент максимума объема.

Как видно на рис. 5 удары с наименьшей кинетической энергией (большие величины π_2) заметно менее эффективны, чем удары в чистую воду. Это, конечно, связано с потерей энергии ударника, затраченной на пробивание льда. С ростом кинетической энергии (уменьшение π_2) эффективность образования полости в воде подо льдом приближается к эффективности удара в воду. При этом становится заметным влияние дна. Еще на стадии роста полости лед разрушается на значительных радиальных расстояниях от точки удара (рис. 6). К сожалению, двумерность расчетов не позволяет оценить состояние льда в зоне разрушения – это разрушение в реальности может выражаться в появлении достаточно редких радиальных трещин.

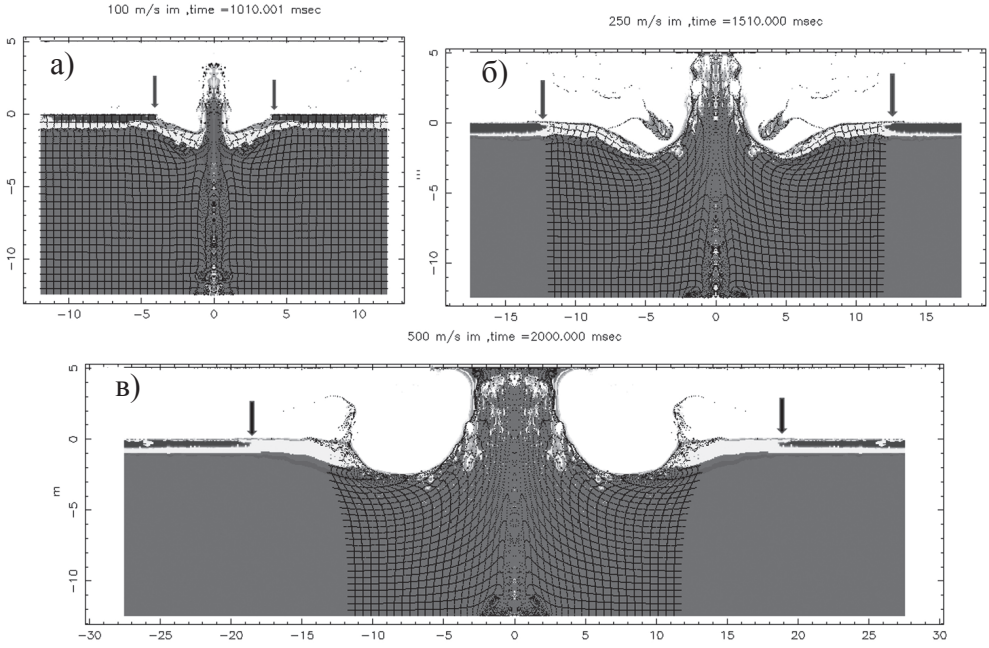


Рис. 6. Влияние скорости удара на размер полыньи при ударе со скоростями 100 (а), 250 (б), и 500 м/с (в) для ударника с диаметром равном толщине льда (1 м в расчетах) при глубине водоема 12,5 м. Радиальный размер водоема 55 м. Стрелками отмечена граница неразрушенного льда

Хотя полное параметрическое исследование задачи требует гораздо большего объема расчетов, из уже накопленного материала можно сделать некоторые предварительные выводы. На рис. 1 в сравнении с данными о подледных взрывах ВВ данные проведенного моделирования дают похожие соотношения размера полыньи во льду и энергии взрыва. Из первых результатов можно заметить сложную связь между максимальным диаметром полости в воде подо льдом и размера полыньи. Как показано на рис. 7, для наименьших значений кинетической энергии диаметр полыньи составляет 2–2,5 диаметра полости в момент достижения ее максимального объема. В рамках исследованных параметров это случай ударника с диаметром, равным толщине льда при скорости удара 60 м/с. При скорости удара 100 м/с и выше (кинетическая энергия более 10 МДж) это отношение остается примерно постоянным и составляет 1,5–1,6. Вместе с условиями подобия, проиллюстриро-

ванными на рис. 5, эти результаты позволяют (при некоторой детализации) построить довольно общую схему оценки образования полыньи на тонком льду при ударе.

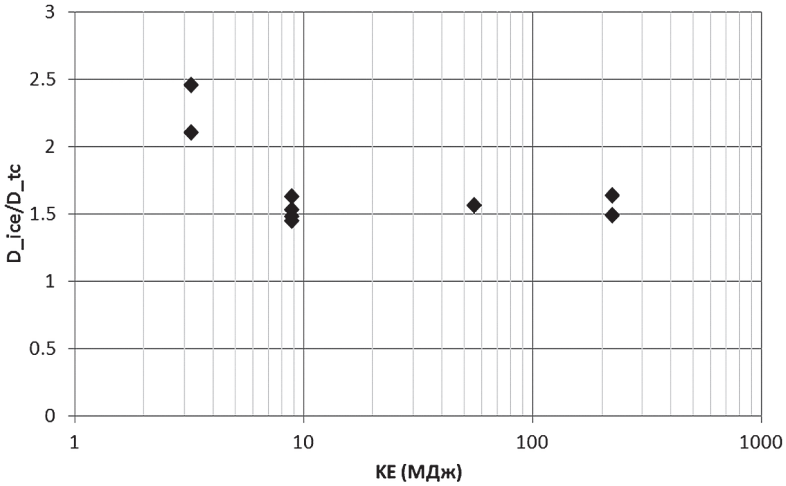


Рис. 7. Отношение диаметра полыньи, по границе частично разрушенного льда, к диаметру переходной полости (в момент достижения максимального объема полости) в зависимости от энергии удара

Заключение

Предварительное моделирование удара в лед в условиях, близких к падению Чебаркульского фрагмента, показало, что для возникновения полыньи диаметром 6–8 м во льду толщиной 70 см необходимо взрывное или ударное воздействие с энергией 3–10 МДж. По первым прикидкам представляется, что удар несколько эффективнее подледного взрыва (рис. 1). Поскольку основной массив расчетов в модели делался для метеороида с поперечником, равным толщине льда, из полученных результатов легко получить ограничения на гипотезу о том, что найденный обломок массой около 600 кг и образовал полынью – при плотности 3300 кг/м^3 диаметр эквивалентной сферы составит как раз около 70 см, что близко к сообщаемой толщине льда на озере в день падения. При скорости 60–100 м/с, должна была образоваться полынья диаметром около 6–7 м. При наиболее вероятной скорости 250 м/с [Popova et al., 2013], размер полыньи должен быть больше. В то же время при ограниченной точности модели нельзя исключать, что Чебаркульский фрагмент был больше по массе, и другие его фрагменты могут быть найдены на дне озера. Трудно дать количественную оценку, но удвоение начальной массы относительно извлеченного обломка не представляется невероятным.

Наиболее серьезным расхождением с доступными наблюдениями нужно признать наличие чистой воды на всех фотографиях полыньи, включая спутниковые снимки высокого разрешения. На фотографиях «кратеров» во льду, образованных взрывами [Billings et al., 2003] битый лед плавает в полынье. Из наших расчетов вертикального удара тоже следует наличие битого льда в полынье. Проблему можно анализировать с различных точек зрения: (1) – рыбаки очистили полынью; (2) – сильный ветер сдул часть султана (на видеорегистрации удара виден снос облака снега по ветру); (3) – наклонный удар привел к несимметричному коллапсу

полости и движению султана в направлении движения ударника. Причины (2) и (3) могли быть скомбинированы. Несимметричный коллапс при косом ударе астероидов хорошо известен из работ по трехмерному моделированию образования кратеров в земной коре, но аналогичные расчеты для озерного льда еще предстоит провести. Наши попытки качественного анализа косого удара в плоской постановке дают основания продолжить анализ, однако ограниченный объем статьи вынуждает нас отложить дискуссию.

Литература

Иванов, Б.А. Численное моделирование крупнейших земных метеоритных кратеров // Астрон. вестн, 39, с. 381–409, 2005.

Саков, Г.П., М.П. Цивилев, Поляков И.С. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: учебник в 3-х частях: Часть 2. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: в 3-х книгах: книга 1. Способы и средства инженерного обеспечения ликвидации чрезвычайных ситуаций / Под общ. ред. С.К. Шойгу/ 404 с. ЗАО «ПАПИРУС», Москва, 1998.

Amsden, A.A., H.M. Ruppel, and C.W. Hirt, SALE: A simplified ALE Computer Program for Fluid Flow at All Speeds // Los Alamos Laboratory Report LA-8095, pp. 101, Los Alamos, NM, 1980.

Artemieva, N.A., and V.V. Shuvalov, Motion of a fragmented meteoroid through the planetary atmosphere // Journal of Geophysical Research, 106, 3297–3310, 2001.

Benz, W., A.G.W. Cameron, and H.J. Melosh, The origin of the Moon and the single-impact hypothesis III // Icarus, 81 (1), 113–131, 1989.

Billings, S.E., S.A. Kattenhorn, and E. Stansbery, Comparison Between Terrestrial Explosion Crater Morphology in Floating Ice and Europan Chaos, in Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, edited by S. Mackwell, pp. 1955, 2003.

Borovicka, J., P. Spurny, P. Brown, P. Wiegert, P. Kalenda, D. Clark, and L. Shrbeny, The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature, 503, 235–237, 2013.

Collins, G.S., H.J. Melosh, and B.A. Ivanov. Modeling damage and deformation in impact simulations // Meteoritics & Planetary Science, 39 (2), 217–231, 2004.

Galimov, E.M., Chelyabinsk meteorite: an LL5 chondrite // Solar System Research, 47, 255–259, 2013.

Hoerner, S.F. Fluid-Dynamic Drag. Hoerner Fluid Dynamics // Second Edition, 455 pp., 1965.

Holsapple, K.A., and K.R. Housen, A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // Icarus, 187, 345–356, 2007.

Ivanov, B.A., Shock melting of permafrost on Mars: Water ice multiphase equation of state for numerical modeling and its testing // Lunar and Planetary Conference, #1232, 2005.

Ivanov, B.A., A.T. Basilevsky, and G. Neukum, Atmospheric entry of large meteoroids: implication to Titan // Planetary and Space Science, 45, 993–1007, 1997a.

Ivanov, B.A., D. Deniem, and G. Neukum, Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // International Journal of Impact Engineering, Hypervelocity Impact Proceedings of the 1996 Symposium, 20 (1–5), 411–430, 1997b.

Ivanov, B.A., H.J. Melosh, A.S. McEwen, and Hirise_Team, Small Impact Crater Clusters in High Resolution HiRISE Images – II // Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, pp. 1410, 2009.

Ivanov, B.A., H.J. Melosh, and E. Pierazzo, Basin-forming impacts: Reconnaissance modeling, in GSA Special Papers 465, edited by R.L. Gibson, and W.U. Reimold, pp. 29–49, Geological Society of America, Boulder, Colorado, USA, 2010.

Ivanov, B.A., and E. Pierazzo, Ice-rock mixture behavior in full scale impact crater modeling, in 7th Int. Conf. on Mars, LPI Contrib 1353, pp. #3236 (http://www.lpi.usra.edu/meetings/7thmars2007/pdf/3236.pdf), LPI, Houston TX, 2007.

Ivanov, B.A., and E. Pierazzo, Impact cratering in H_2O-bearing targets on Mars: Thermal field under craters as starting conditions for hydrothermal activity // Meteoritics and Planetary Science, 46, 601–619, 2011.

Mallock, A., Sounds Produced by Drops Falling on Water // Royal Society of London Proceedings Series A, 95, 138–143, 1918.

Mellor, M., Derivation of guidelines for blasting floating ice // Cold Regions Science and Technology, 13 (2), 193–206, 1987.

Oberbeck, V.R., Laboratory simulation of impact cratering with high explosives // J. Geophys. Res, 76 (23), 5732–5749, 1971.

Popova, O.P., P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova, E. Biryukov, S. Khaibrakhmanov, V. Shuvalov, Y. Rybnov, A. Dudorov, V.I. Grokhovsky, D.D. Badyukov, Q.-Z. Yin, P.S. Gural, J. Albers, M. Granvik, L.G. Evers, J. Kuiper, V. Kharlamov, A. Solovyov, Y.S. Rusakov, S. Korotkiy, I. Serdyuk, A.V. Korochantsev, M.Y. Larionov, D. Glazachev, A.E. Mayer, G. Gisler, S.V. Gladkovsky, J. Wimpenny, M.E. Sanborn, A. Yamakawa, K.L. Verosub, D.J. Rowland, S. Roeske, N.W. Botto, J.M. Friedrich, M.E. Zolensky, L. Le, D. Ross, K. Ziegler, T. Nakamura, I. Ahn, J.I. Lee, Q. Zhou, X.-H. Li, Q.-L. Li, Y. Liu, G.-Q. Tang, T. Hiroi, D. Sears, I.A. Weinstein, A.S. Vokhmintsev, A.V. Ishchenko, P. Schmitt-Kopplin, N. Hertkorn, K. Nagao, M.K. Haba, M. Komatsu, T. Mikouchi, and t.C.A. Consortium), Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science, 342 (6162), 1069–1073, 2013.

Schmidt, R.M., and K.R. Housen, Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering // Int. J. Impact Engng., 5, 543–560, 1987.

Thompson, S.L., and H.S. Lauson, Improvements in the Chart-D radiation hydrodynamic code III: Revised analytical equation of state, pp. SC-RR-71 0714, 119 pp., Sandia Laboratories, Albuquerque, NM, 1972.

Van der Kley, I.F., The use of explosives for clearing ice, in Rijkswaterstaat Communication Nr. 7, pp. 56, The Hague, Netherlands, 1965.

White, K.D., and R.L. Kay, Ice Jam Flooding and Mitigation: Lower Platte River Basin, Nebraska, in Special Report 96-1, pp. 83, US Army Corps of Engineers, CRREL, Hanover, New Hampshire, 1996.

АТМОСФЕРНЫЙ ШЛЕЙФ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

Н.А. Артемьева, В.В. Шувалов

Одним из наиболее длительных явлений после 10-секундного болида при пролете Челябинского метеорита (далее – ЧМ) был шлейф, оставленный метеороидом в атмосфере. Этот след напоминал гигантский инверсионный след самолета, был хорошо виден над Уралом в течение получаса, постепенно размывался ветрами и дрейфовал на юг и позднее – на восток. Именно его можно увидеть на большинстве фотографий события. В статье описывается численное моделирование шлейфа в течение первых 3 минут после пролета метеороида. Результаты сравниваются с наблюдениями. Анализируется возможность образования баллистического плюма при небольших ударах.

Введение

Существует два вида шлейфов, оставляемых метеороидами при пролете в атмосфере. Первый – ионизационный – связан со свечением горячего воздуха и паров в следе. Обычно такие шлейфы хорошо видно в темное время суток. Продолжительность свечения очень невелика, всего несколько секунд, так как воздух и пары быстро остывают при расширении. Другой шлейф – аналог инверсионного следа самолета – связан с абляцией и фрагментацией метеороида. Мельчайшие частицы бысто тормозятся в атмосфере, отстают от основного тела, перемешиваются с окружающим воздухом и рассеивают палающий на них свет. Такие шлейфы наблюдаются, как правило, только при достаточно крупных событиях (иначе концентрация частиц очень мала), лучше всего – на фоне слабо освещенного неба, т.е. во время заката или восхода.

Описание метода и начальные условия

Для решения трехмерных уравнений, описывающих эволюцию следа в атмосфере, использовалась программа SOVA [Shuvalov, 1999]. Ось X была направлена вдоль траектории, Z – ей перпендикулярно в плоскости траектории, Y – перпендикулярно этой плоскости. Размер сетки составлял 800´140´340 ячеек; минимальный шаг – от 100 до 200 м (в зависимости от варианта) в центральной области с увеличением до 500 м на краях сетки. Материал следа описывался двумя разными способами: как сплошное вещество, описываемое уравнением состояния воздуха, или как набор частиц разного размера, которые могут обмениваться моментом и энергией с атмосферой.

Идеальными начальными условиями для моделирования шлейфа могли бы быть данные по пространственному распределению паров и горячего воздуха в следе метеороида, их перемешивание, остывание и конденсация. Или хотя бы независимые распределения массы и энергии частиц метеороида в атмосфере (если энергия известна по наблюдениям, то о массе можно судить только по оценкам интенсивности абляции, которая сильно зависит от плохо известных параметров). Частицы и газ при этом могут иметь разные температуры и скорости. В данной работе использовались два упрощенных подхода.

В первом случае (вариант I) материал метеороида рассматривается как отдельное вещество, которое описывается тем же уравнением состояния (то есть это смесь воздуха с другим веществом малой концентрации). Начальная энергия вещества шлейфа распределена по высоте согласно кривой энерговыделения [Brown et al., 2013]. Избыточная масса на данной высоте тоже пропорциональна энергии, а полная избыточная масса равна доатмосферной массе метеороида, то есть 10^7 кг. Определить реальную массу частиц метеороида в шлейфе невозможно, но полная масса найденных метеоритов пренебрежима мала по сравнению с начальной массой метеороида, поэтому можно считать, что все вещество осталось в шлейфе. Скорость вещества в начальный момент времени равна нулю. На заданной высоте масса и энергия распределены равномерно внутри цилиндра с радиусом 300 или 600 м. Такая постановка задачи близка к постановке, использованной для расчета ударных волн ЧМ ([Шувалов и др., 2014], этот сборник), за исключением того, что вводилось дополнительное вещество (то есть в атмосфере распределялась не только энергия, но и масса). Нетрудно показать, что эта избыточная масса много меньше массы атмосферы в цилиндре такого же размера: на длине траектории от 20 до 50 км, где

произошло выделение всей энергии ЧМ, масса атмосферы в 80 или 320 раз (радиус цилиндра 300 или 600 м, соответсвенно) больше полной массы ЧМ.

Во втором случае (II) те же самые распределения массы и энергии были приписаны частицам разного размера. Распределение частиц по размерам задавалось стандартным экспоненциальным распределением: $N_{>\mathrm{m}} = Cm^{-b}$, где $N_{>\mathrm{m}}$ – число частиц с массой больше массы m, C – константа, определяемая по полной массе частиц, b – показатель экспоненты. Всего рассматривалось 6 классов частиц, в каждом последующем классе размер частиц был меньше на порядок. Диаметр самых крупных частиц был 10 см, самых мелких – 0,1 мкм. Если показатель экспоненты $b < 1$, то в распределении преобладают крупные частицы, если $b > 1$ – мелкие. Моделировались два распределения: (IIa) при $b = 0{,}8$, 75% по массе составляют частицы >1 см, и только 0,375% – частицы диаметром меньше 10 мкм); (IIb) при $b = 1{,}2$, когда ситуация противоположная, частиц размером больше 1 см – 0,075%, 10-микронных (и меньше) частиц – 94%. Считалось, что частицы и окружающий атмосферный газ находятся в термодинамическом равновесии, а их скорость равна 0. Пробный вариант (IIc) аналогичен варианту (IIb) с точки зрения распределения частиц по размерам, но вся энергия приписывалась кинетической энергии частиц метеороида, а воздух нагревался в результате торможения этих частиц.

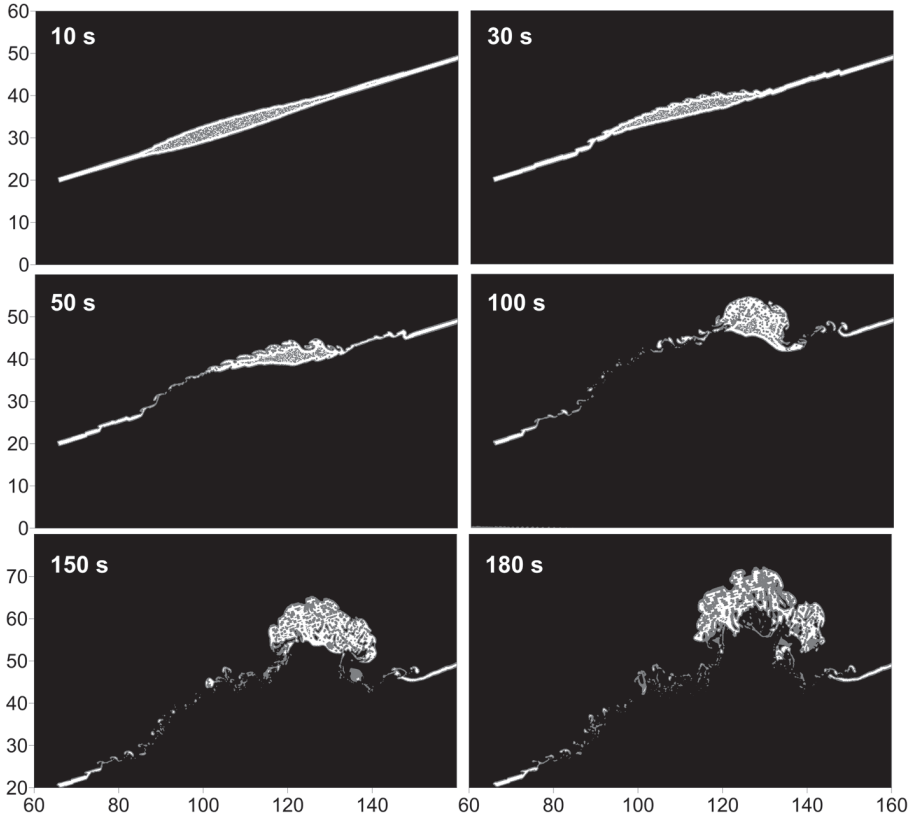


Рис. 1. Эволюция следа в варианте I (вид сбоку) – показана плоскость траектории метеороида, расстояния вдоль траектории и по высоте – в км. Атмосфера показана черным цветом, вещество метеороида – градациями от белого к серому, в зависимости от концентрации вещества метеороида

Эволюция шлейфа

На рисунках 1 и 2 показана эволюция шлейфа во времени для варианта I (материал шлейфа – контрастное вещество с уравнением состояния воздуха). Сначала щлейф быстро расширяется на высотах 25–35 км (где выделилась почти вся энергия метеороида) и начинает всплывать вверх и вдоль следа метеороида (30 секунд). Примерно через 50 секунд на верхней кромке развиваются неустойчивости Рэлея-Тейлора (вещество шлейфа имеет меньшую плотность, чем окружающая атмосфера) и Кельвина-Гельмгольца (из-за наличия в начальный момент небольшой скорости вдоль траектории). Утолщенная часть шлейфа превращается в массивное кучевое облако, которое медленно всплывает на высоту до 70 км (180 секунд), при этом остальная часть шлейфа практически неподвижна и только медленно рассеивается. Продолжать расчеты на большие времена нет смысла, так как влияние местных ветров становится преобладающим. На рис. 2 хорошо видно раздвоение следа, аналогичное образованию тора при всплытии горячего пузыря, но при всплытии цилиндра образуются два цилиндрических вихря. Наблюдавшееся раздвоение шлейфа происходило, видимо, по двум причинам: в первую очередь из-за обтекания всплывающего следа окружающим воздухом и, во-вторых, из-за того, что крупные фрагменты могли образовывать собственные шлейфы (этот процесс при моделировании не учитывался), которые тоже могли позднее раздваиваться. Реальное раздвоение следа происходило заметно быстрее, чем в модели, в течение

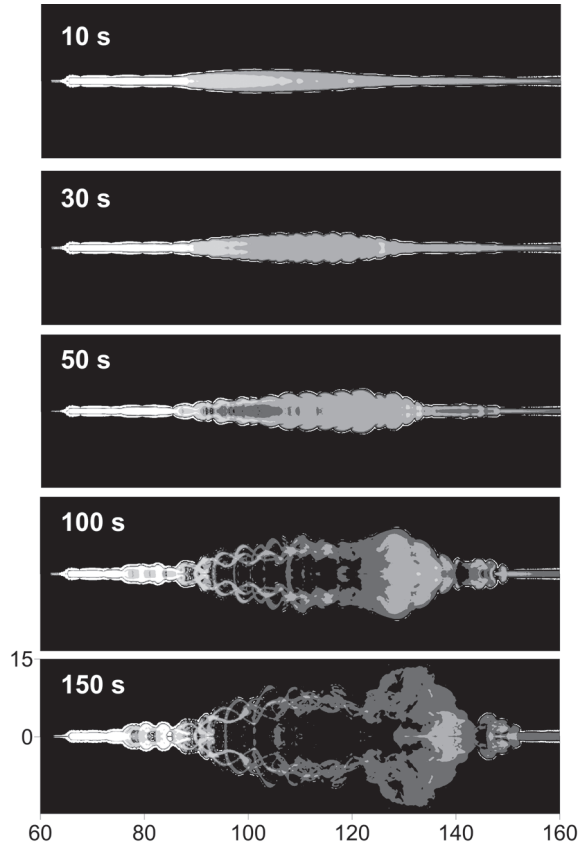


Рис. 2. Тот же шлейф, что и на рис. 1 (вид снизу). Расстояния – в км. Видно развитие неустойчивостей и раздвоение следа в его центральной части. Оттенки серого соответствуют полной массе вещества метеороида вдоль вертикального луча. Белый цвет в нижней части траектории является артефактом, так как все вещество внутри цилиндра заменялось другим материалом, а на малых высотах плотность атмосферы становится существенной

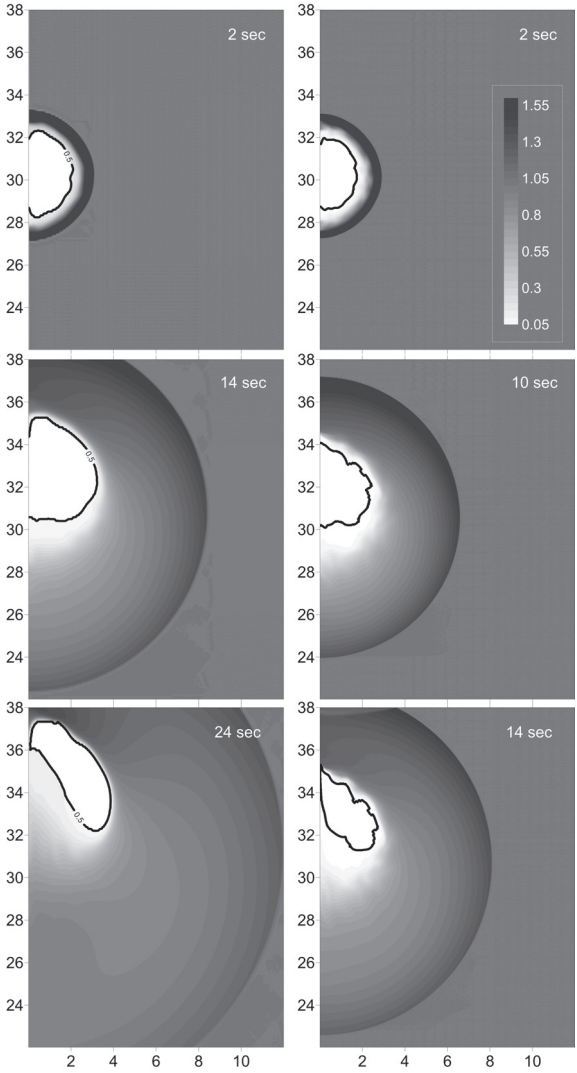


Рис. 3. Образование всплывающего торообразного облака после точечного взрыва мощностью 440 ктон на высоте 30 км. Показана относительная плотность воздуха (шкала на верхнем правом рисунке) и границы материала шлейфа (черная толстая линия). Рисунки слева показывают эволюцию сферической области радиусом 300 м, где в начальный момент времени выделилась вся энергия; размер вычислительной ячейки 30 м (10 ячеек на начальный радиус). Справа – размер начального возмущения 100 метров и размер ячейки 10 м (те же 10 ячеек на радиус). Сравнивая УВ в момент времени 14 секунд, можно сказать, что распространение ударных волн не зависит ни от размера начальной области, которая быстро размазывается на 2 км по радиусу (момент времени 2 сек), ни от разрешающей способности вычислительной сетки. А вот форма облака зависит – при более высоком разрешении (справа) облако превращается в тор через 14 сек, а при низком – через 24 сек. Следует отметить, что разрешение в расчетах реального трехмерного следа было еще ниже

нескольких секунд (например, рис. S20 в статье [Popova et al., 2013]). Возможными причинами такого расхождения может быть либо сильное начальное размазывание следа (300 м по радиусу против нескольких десятков метров в действительности), либо низкая разрешающая способность вычислительной сетки. Рис. 3 иллюстрирует влияние пространственного разрешения и начального размера облака на развитие неустойчивостей и образование всплывающего тора на примере точечного взрыва на высоте 30 км с энергий 440 кт. По-видимому, решающее значение имеет размер вычислительной ячейки.

На рис. 4 сравниваются эволюции двух шлейфов, состоящих из частиц. Слева – преобладают мелкие частицы (IIb), справа – крупные (IIa). Для визуализации шлейфа вычислялась оптическая толщина шлейфа вдоль луча, параллельного поверхности. Считалось, что частицы полностью поглощают падающее излучение, то есть оптическая толщина ячейки с размером Dx на Dz равна S$n_i r_i^2$/DxDz, где n_i – количество частиц сорта i в ячейке, r_i – радиус частиц данного сорта. Так как полная

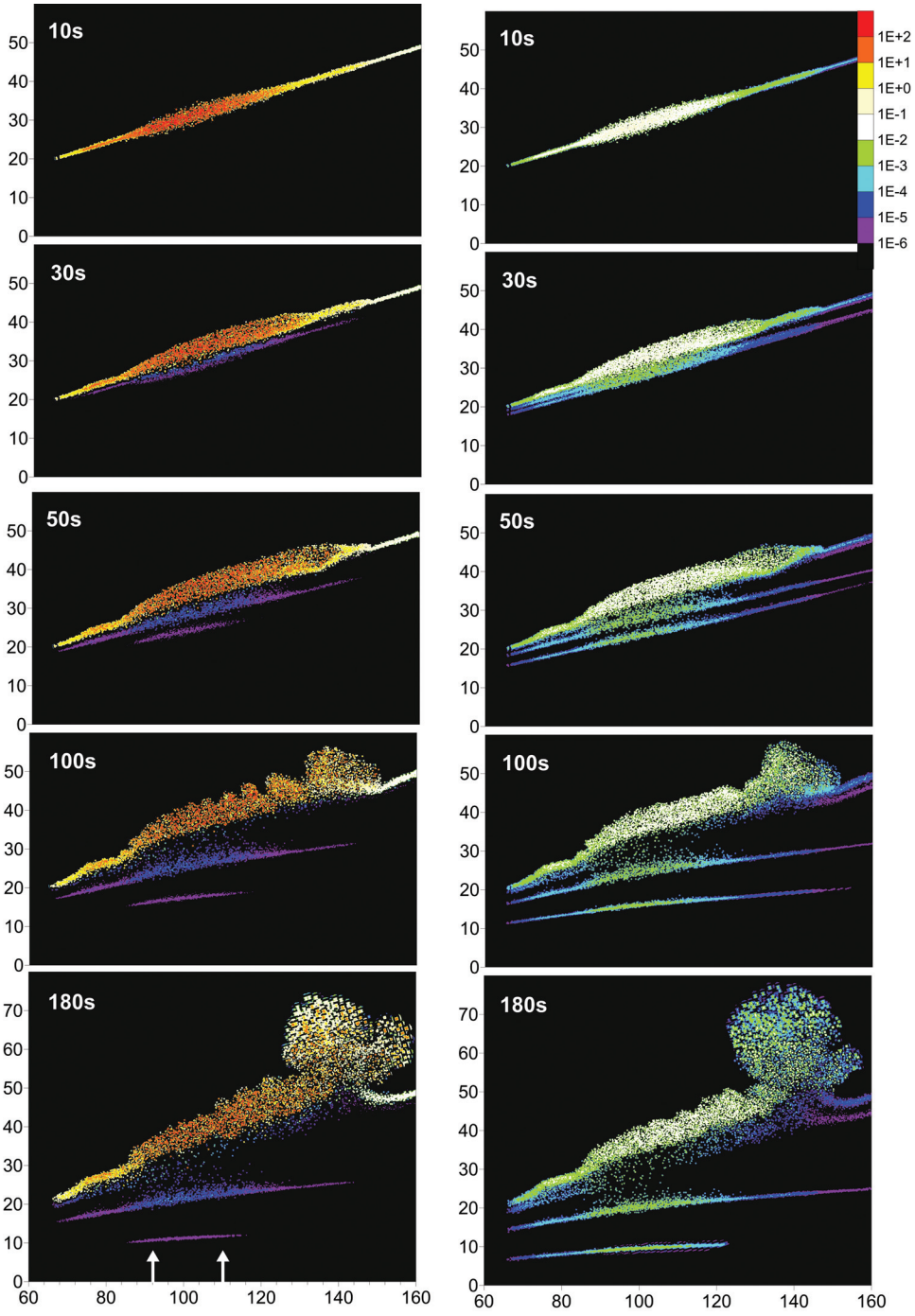


Рис. 4. Эволюция шлейфа, состоящего из частиц размером от нескольких см до долей микрона. В шлейфе слева преобладают мелкие частицы, справа – крупные (см. текст). Показана оптическая толщина вдоль луча, параллельного оси Y. Размеры на осях указаны в км. Белые стрелки на нижнем левом рисунке показывают участок траектории, где произошла самая яркая вспышка и выделилось ~70% энергии метеороида

масса частиц в ячейке пропорциональна $n_i r_i^3$, очевидно, что мелкие частицы (при той же полной массе) поглощают свет эффективнее. Это и видно из рисунка – при одинаковой полной массе частиц шлейф слева имеет оптическую толщину существенно больше 1, то есть он хорошо виден невооруженным глазом. Шлейф справа в начальный момент времени имеет оптическую толщину <0,1, которая постепенно уменьшается до значений <0,01. Наблюдения за инверсионными следами самолетов показывают, что человеческий глаз может различить след только, если его оптическая толщина >0,02 [Kärcher et al., 2009]. Таким образом, шлейф из крупных частиц практически невидим. В целом, эволюция обоих шлейфов одинакова и мало отличается от эволюции шлейфа на рис. 1 – расширение, всплытие, образование неустойчивостей и «кучевого облака» на высотах 50–70 км. Интересным отличием от варианта (I) является разделение шлейфа по высоте на несколько (в правой колонке рис. 4 в момент времени 180 секунд видны четыре). Такое четкое разделение объясняется тем, что использовались дискретные классы частиц, а не непрерывное распределение, которое привело бы к существенному размыванию следа по высоте. В то время как мелкие частицы движутся вместе с воздухом, более крупные начинают выпадать на поверхность. Такое разделение не наблюдалось в действительности только потому, что оптическая толщина «дочерних» шлейфов очень мала.

На рис. 5 показан вид шлейфа для варианта IIc, когда вся энергия переводилась в кинтерическую энергию частиц. Этот вариант, хотя и больше всего соответствует реальной картине движения метеороида в атмосфере, получился неудачным при использовании измеренной кривой энерговыделения [Brown et al., 2013] в качестве начальных условий. Пик энерговыделения сместился в сторону меньших высот, так как крупные частицы продолжали двигаться и тормозились на длине траектории порядка нескольких км. Шлейф получился более узким, облако на высотах 50–70 км не образовалось. Единственным положительным итогом этого расчета можно считать рассчитанное положение крупных (1–10 см) фрагментов на поверхности (нижний подшлейф на рисунке) – оно смещено на 10–20 км по направлению движения метеороида по сравнению с максимумом энерговыделения, как и наблюдалось (например, рис. 1 из статьи [Borovička et al., 2013]). В расчете IIb место выпадения крупных фрагментов находится точно под точкой максимального энерговыделения (что и понятно, так как скорость фрагментов в начальный момент времени считалась равной нулю). Для улучшения расчетов в такой постановке необходимы начальные данные не в виде зависимости энергии от высоты, а в виде распределения фрагментов разного размера по высоте, подгоняемые методом проб и ошибок под наблюдавшуюся кривую энерговыделения.

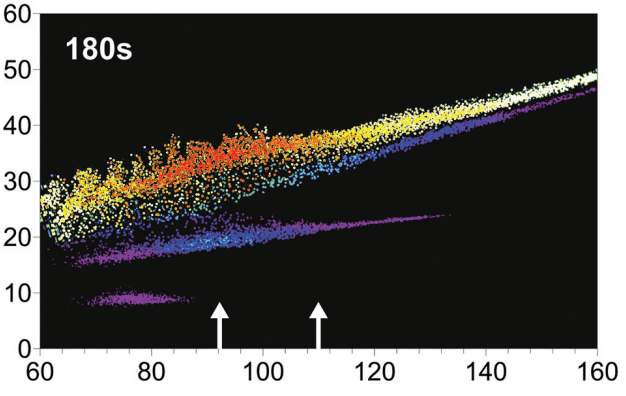


Рис. 5. Шлейф для варианта IIc (вся энергия была переведена в кинетическую энергию частиц) в момент времени 180 секунд. Сравнить с левой нижней панелью рис. 3

Образование плюма

Важность процесса образования плюма стала очевидной после наблюдения падения кометы Шумейкера-Леви 9 на Юпитер. Плюм представляет собой струйное течение вдоль метеорного следа, вызванное нарушением гидростатического равновесия внутри следа. По законам подобия аналогичные плюмы могут образовываться на Земле для тел размером порядка 10–30 м [Boslough and Crawford, 1997]. При ударах тел меньшего размера на границе следа метеороида и атмосферного воздуха образуются неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, которые вызывают перемешивание вещества следа с окружающим воздухом и подавляют развитие плюма [Shuvalov, 1999]. Даже при вертикальном, наиболее благоприятном для образования плюма угле наклона траектории 20-метрового метеороида, максимальная скорость подъема газа вдоль следа не превышает 300 м/с, а высота всплытия – первых десятков км ([Shuvalov, 1999], рис. 4). Для пологих траекторий с углом наклона a условия для образования плюма еще хуже ввиду меньшего градиента давления P по высоте h, измеряемого вдоль следа ($dP/dh \sim \sin a$). Действительно, образование плюма, то есть направленного движения газа (или смеси газа с частицами) вдоль следа вверх, не наблюдается в наших расчетах или оно очень незначительно (рис. 1, 4, 5). Мы провели расчеты эволюции следа для удара аналогичного ЧМ, но под углом 45° к горизонту, результаты которых показаны на рис. 6. Хотя скорость движения вдоль следа несколько больше, по-прежнему вместо плюма образуется плавучее облако на высоте ~80 км. Если при том же угле наклона траектории увеличить еще и полную энергию метеороида в 4 раза, то становится заметным направленное движение газа вдоль следа, а шлейф распадается на две части (рис. 7) – его нижняя часть образует плавучее облако, а верхняя – плюм, который в моменту вре-

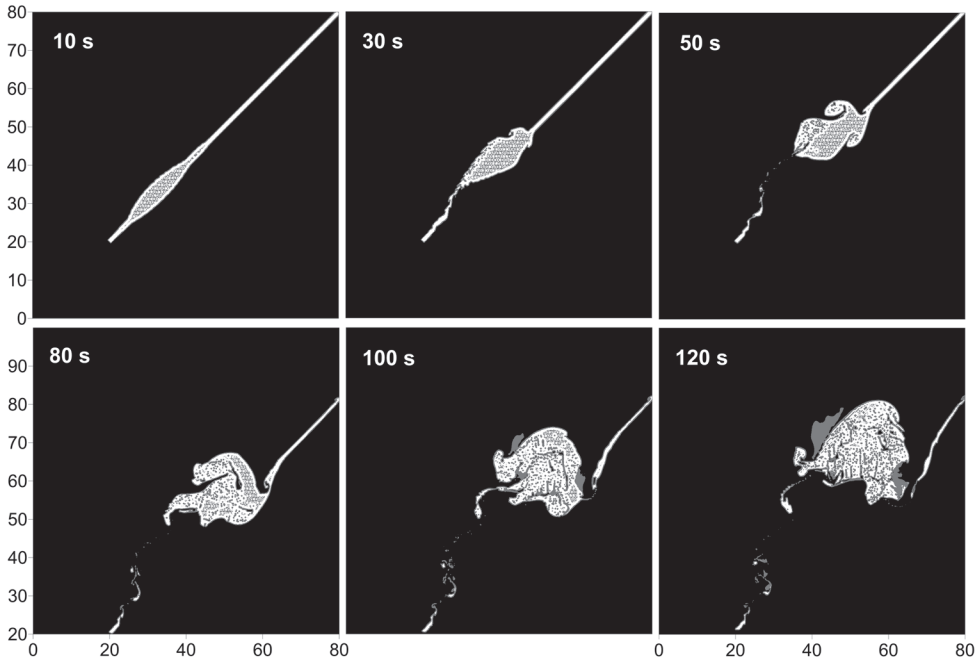


Рис. 6. Развитие шлейфа при угле наклона траектории 45° и том же распределении энергии по высоте

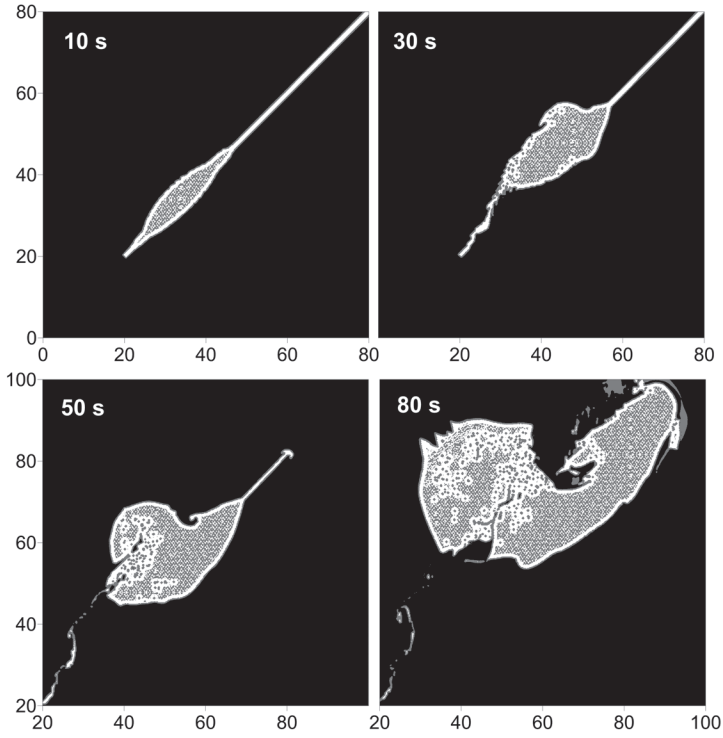


Рис. 7. Развитие шлейфа при угле наклона 45° и в четыре раза большей полной энергии метеороида. Образуется плавучее облако, но часть вещества ускоряется вдоль следа и достигает высоты >100 км (расчеты проводились только до 80 секунд)

мени 80 секунд, то есть гораздо быстрее, чем плавучее облако, достигает высоты 100 км. Следует заметить, что наши расчеты на относительно грубой сетке приводят к заниженным (по размеру метеороида) оценкам, с которых начинается развитие плюма, так как удается описать только сравнительно «длннно-волновые» возмущения. Возможно, что расчеты на более подробных сетках приведут к тому, что оценка полной энергии метеороида для образования плюма будет еще выше, чем 2 мт. С другой стороны уточнение абляции и начальных параметров (температуры и прочности) в следе могут несколько уменьшить критический для образования плюма размер метеороида.

Обсуждение шлейфов

Наблюдавшиеся ранее шлейфы метеороидов

Наиболее ярким, хотя и наименее достоверным, примером шлейфа является шлейф Сихоте-Алиньского метеорита, изображенный на известной картине Н. Медведева (рис. 8,а). Если доверять художнику – свидетелю падения метеорита, то можно сделать вывод, что шлейф практически достиг поверхности земли, то есть метеороид затормозился и перестал испаряться намного ниже, чем в случае ЧМ. Действительно, расчеты показывают, что конечные скорости самых крупных кратерообразующих фрагментов Сихоте-Алиньского метеорита достигали 2–4 км/с.

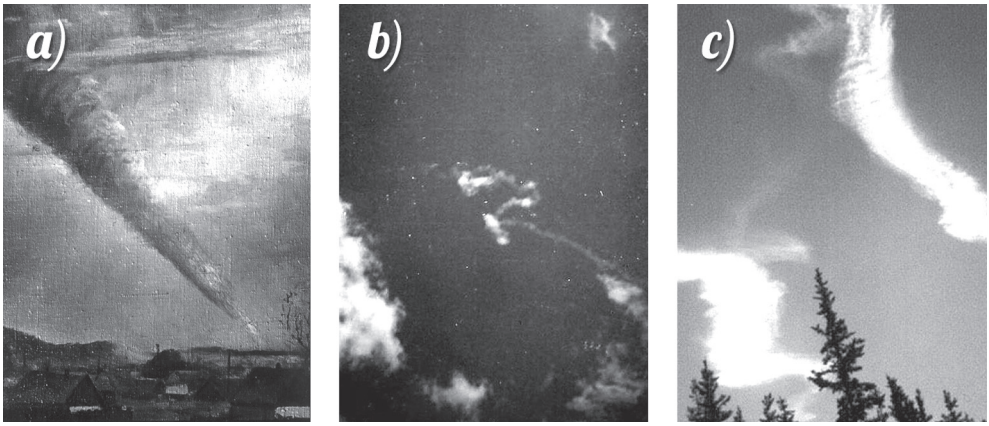


Рис. 8. Шлейфы крупных метеороидов: A) Сихоте-Алиньского метеорита 1947 г. (репродукция картины Медведева; B) Каранкаса 2007 г.; C) Тагиш Лэйк 2000 г.

А даже самый большой фрагмент ЧМ достиг поверхности с дозвуковой скоростью, близкой к скорости свободного падения. Противоположный пример – шлейф Каранкаса (слабо виден на снимке (рис. 6,б), который сделан через 5–7 минут после падения метеорита, образовавшего 13-метровый кратер). Очевидно, шлейф находится на достаточно большой высоте, а не у поверхности, то есть, скорее всего, скорость упавшего фрагмента была небольшой. Шлейф метеороида Тагиш Лэйк (Tagish Lake) с до атмосферной массой около 56 тонн напоминал серебристые облака, которые можно было наблюдать в течение 12 часов после падения метеорита, хотя сильные ветры привели к заметному размыванию шлейфа уже через 3 минуты [Hildebrand et al., 2006] – рис. 6,c.

Измерение размера частиц в следе

3 сентября 2004 г. в атмосферу Земли вошел метеороид, пролет и разрушение которого над Антарктидой были зарегистрированы инфракрасными детекторами геостационарных спутников; полная энергия была оценена в 13 кт ТНТ, а полная масса до входа в атмосферу – в $0{,}65 \cdot 10^6$ кг [Klekociuk et al., 2005]. Через 7,5 часов после события и на расстоянии 2700 км к востоку лидары обнаружили в стратосфере, на высотах 28–32 км, два облака продуктов абляции и разрушения, которые находились выше и были «теплее», чем обычные приполярные стратосферные облака. Размер частиц в нижнем облаке мог достигать 10–20 мкм, в верхнем – был порядка 0,3–1,1 мкм [Klekociuk et al., 2005]. Эти размеры существенно больше, чем теоретические расчеты, предполагающие конденсацию и коагуляцию продуктов абляции в нано-метровые частицы. Аналогичные оценки по размерам существуют и для шлейфов метеороида Тагиш-Лэйк [Hildebrand et al., 2006] и Алмахата-Ситта [Almahata-Sitta, Borovička and Charvát, 2009].

Сравнение с инверсионным следом самолета и серебристыми облаками

Инверсионные следы самолетов возникают в результате конденсации паров воды, которые, наряду с углекислым газом, образуются при сгорании топлива в ре-

активном двигателе. Пары воды быстро конденсируются в капли размером порядка микрона, если относительная влажность окружающего воздуха ниже точки насыщения (поэтому инверсионные следы редко образуются на высотах <8 км). После замерзания кристаллы льда продолжают расти и достигают размера в несколько десятков мкм в течение часа. Поперечный размер «старого» следа достигает первых километров, средняя концентрация ледяных кристаллов ~3,5 см$^{-3}$, а оптическая толщина варьируется в широких пределах от 0,001 до 0,5 [Kärcher et al., 2009]. Время существования следа определяется локальными метеорологическими условиями и варьируется от первых минут до нескольких часов. Серебристые облака видны только в сумерках на высоких широтах, когда отражают лучи солнца на фоне уже темного неба. Они состоят из гораздо более мелких, <70 нм, кристаллов льда и находятся на высоте порядка 82 км; концентрация частиц колеблется от 20 до 200 мкг/м^2 [Thomas and McKay, 1984].

Дальнейшая эволюция следа в атмосфере

Шлейф от ЧМ был обнаружен датчиками, установленными на борту японо-американского спутника и предназначенными для распознавания озона и аэрозолей в атмосфере Земли на средних высотах (25–45 км) и средних широтах (50–70°) северной широты [Gorkavyi et al., 2013]. Первый раз шлейф был зарегистрирован через три с половиной часа после пролета метеороида в 1000 км к востоку от Челябинска, примерно над Новосибирском. Уже через несколько дней шлейф образовал кольцо вокруг Земли на широтах 55–60° и на высотах от 30 до 40 км (см. рис. 9). В последующие месяцы шлейф толщиной около 5 км и шириной 300–400 км мед-

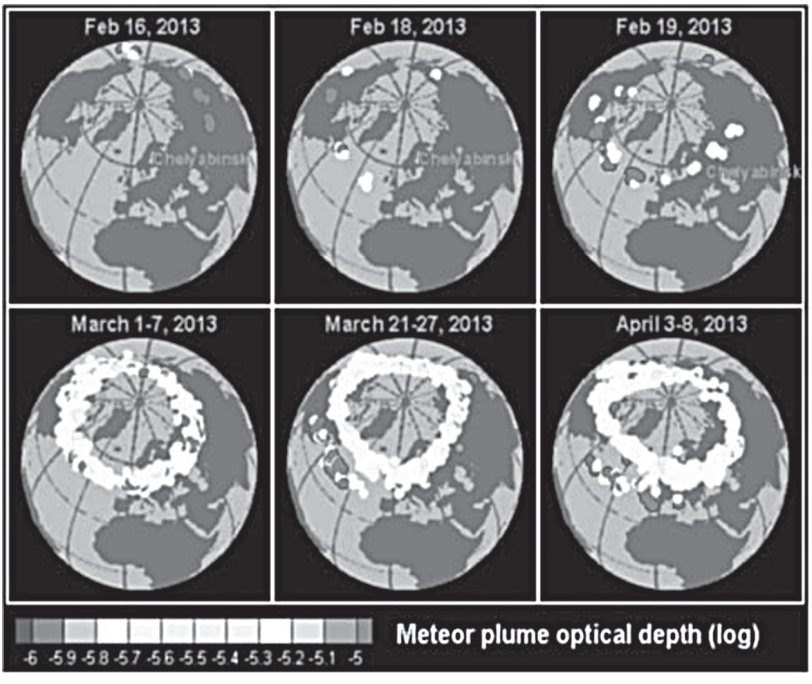


Рис. 9. Эволюция шлейфа в атмосфере с 16 февраля по 8 апреля. Форма шлейфа ределяется полярным атмосферным вихрем (из статьи Gorkavyi et al. 2013)

ленно (90 м/день) опускался, а средний размер частиц уменьшался до сотых долей микрона.

Выводы

Численное моделирование позволяет воспроизвести эволюцию шлейфа ЧМ в течение первых 3 минут, то есть до того момента времени, пока влиянием ветра можно пренебречь. Развитие неустойчивостей и раздвоение следа в расчетах происходят медленнее из-за невысокого разрешения вычислительных сеток. По-видимому, основную массу шлейфа даже сразу после его образования составляли микронные частицы (в противном случае шлейф был бы не виден), а через несколько минут вообще все крупные частицы, которые могут быть обнаружены на поверхности как метеориты, отделились от основного шлейфа. Полную массу шлейфа по результатам моделирования определить невозможно, так как при любой начальной массе шлейфа масса частиц существенно меньше массы окружающего горячего воздуха. При ударах масштаба ЧМ образование плюма не происходит ввиду очень пологой траектории и малого начального размера метеороида и, следовательно, диаметра его следа. В отличие от инверсионных следов самолетов, состоящих из кристаллов льда, шлейфы метеороидов состоят из силикатных частиц типичных для метеоритов (оливин, пироксен, железо и его окиси).

Модели можно усовершенствовать, если удастся правильно вопроизвести распределение фрагментов и продуктов абляции по массе и по высоте в качестве начальных условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00309-а).

Литература

Borovička J. and Charvát Z. Meteosat observation of the atmospheric entry of 2008 TC_3 over Sudan and the associated dust cloud // Astronomy and Astrophysics. 2009. v. 507, p. 1015–1022.

Borovička J. and 6 co-authors. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. 2013, v. 503, p. 235–237.

Boslough M.B.E. and Crawford D.A. Shoemaker-Levy 9 and plume-forming collisions on Earth // Near-Earth Objects, edited by J.L. Remo. 1997, p. 236–282.

Boslough M.B.E. and G.R. Gladstone. An impact plume model for atmospheric holes in the FUV dayglow // Geophysical Research Letters. 1997, v. 24, p. 3117–3120.

Brown P.G. and 32 co-authors. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors // Nature. 2013, v. 503, p. 238–241.

Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., Silva A.M.; DudorovA.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophysical Research Letters. 2013. v. 40, p. 4728–4733.

Hildebrand A.R. and 7 co-authors. The fall and recovery of the Tagish Lake meteorite // Meteoritics and Planetary Science. 2006. v. 41, p. 407–431.

Kärcher B., Burkhardt U., UNterstrasser S., Minnis P. Factors controlling contrail cirrus optical depth // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. v. 9, p. 6229–6254.

Klekociuk A.R. and 8 co-authors. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid // Nature. 2005. v. 436, p. 1132–1135.

Popova O.P. and 59 co-authors. Chelyabinsk airburst, damage assessment, veteorite Rrecovery, and characterization // Science.2013, v. 342, Issue 6162, p. 1069–1073.

Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect // Shock Waves. 1999. v. 9, No. 6, p. 381–390.

Shuvalov V.V. Atmospheric plumes created by meteoroids impacting the Earth // Journal of Geophysical Research. 1999, v. 104, p. 5877–5889.

Thomas G.E. and McKay C.P. On the mean particle size and water content of polar mesospheric clouds // Planetary Space Science. 1985. v. 33, p. 1209–1224.

ЧЕЛЯБИНСКОЕ СОБЫТИЕ: ОПРОС ОЧЕВИДЦЕВ

***А.П. Карташова*[1], *О.П. Попова*[2], *П. Дженнискенс*[3], *С. Короткий*[4], *Е. Бирюков*[5], *И. Сердюк*[4], *В.В. Емельяненко*[1], *Д.О. Глазачев*[2], *С.А. Хайбрахманов*[6], *А.Е. Дудоров*[6], *А.Я. Скрипник*[7], *Ю.С. Рыбнов*[2]**

[1] – ИНАСАН, [2] – ИДГ РАН, [3] – SETI Institute, [4] – обсерватория Ка-Дар, [5] – ЮУрГУ, [6] – ЧелГУ, [7] – ГЕОХИ РАН

Вход космического объекта в атмосферу сопровождается ярким излучением, генерацией ударной волны, привнесением космического вещества на разные высоты в атмосфере и последующими химическими реакциями, и другими эффектами. Свечение Челябинского метеороида было видно на обширной территории, а жители Челябинской области наблюдали не только пролет болида, но и другие явления, вызванные входом метеороида в атмосферу (приход ударной волны, вызвавшей разрушения и травмы, тепловые, звуковые эффекты и т.д.). В данной работе представлены данные об этих эффектах Челябинского метеороида, полученные в результате опросов очевидцев.

Введение

Вход Челябинского метеороида в атмосферу был виден на обширной территории, свидетелями пролета Челябинского метеороида стали жители Челябинской, Свердловской, Курганской и Тюменской областей, а также Республики Башкортостан и Казахстана [Емельяненко и др., 2013]. Жители Челябинской области наблюдали не только пролет болида, но и другие эффекты, вызванные входом метеороида в атмосферу (приход ударной волны, вызвавшей разрушения и травмы, тепловые, звуковые и т.д.). Данные о некоторых из этих эффектов (например, электрофонных звуках, запахах и т.д.) в принципе могли бы быть получены инструментальным образом, если бы соответствующая аппаратура была бы установлена в нужное время и в нужном месте, а в ее отсутствие могут быть собраны только методом опроса.

Опрос очевидцев проводился во время экспедиции 9–25 марта 2013 г., которая была организована сотрудниками ИНАСАН и ИДГ РАН и поддержана SETI институтом, Челябинским государственным университетом и Южно-Уральским государственным университетом. Кроме того, вскоре после падения, был запущен сайт с

интернет-анкетой, которую заполнило большое количество очевидцев [Kartashova et al., 2014а, б]. В общей сложности было собрано более 2000 показаний очевидцев, которые содержат информацию о субъективных ощущениях случайных наблюдателей (тепло, запах, звук, возникновение солнечных ожогов и т.д.).

Одной из целей опроса свидетелей было определить распространение таких эффектов как запах, тепло и солнечные ожоги, звук, область выпадения пепла и др. Поэтому необходимо было охватить большую площадь в различных направлениях (север-юг, запад-восток), где и проводился опрос. Для этого участники экспедиции посетили более 50 населенных пунктов в Челябинской и прилежащих к ней областях.

В ходе интернет-анкетирования задавался целый ряд вопросов, в том числе:

- Вы получили травму?
- Вы слышали звуки болида в течение полета (перед ударной волной)?
- Вы чувствовали повышение температуры?
- Вы ощущали запах после пролета болида?
- Вы видели шлейф пыли?
- Вы услышали звук, и в какое время после того, как болид пролетел?
- Вы или Ваши друзья находили метеориты? и т.п.

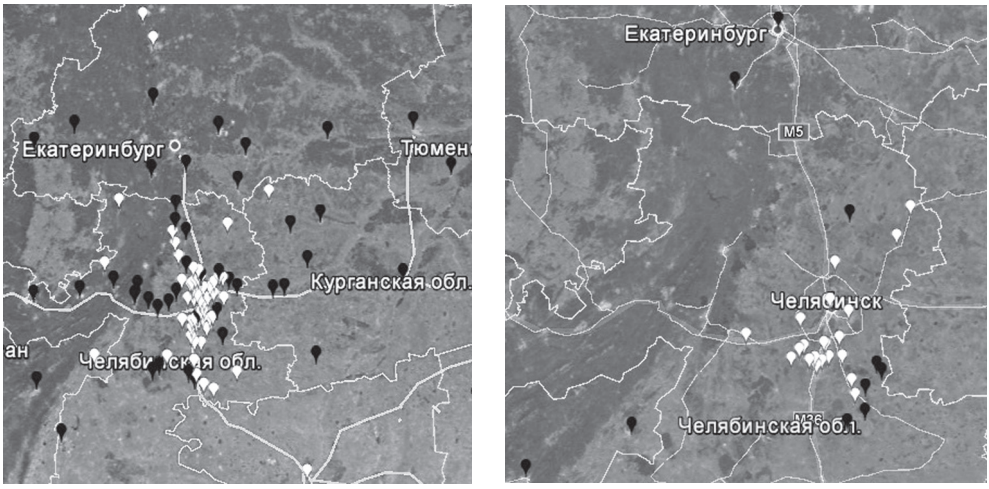
Интернет-анкета была заполнена более чем 1800 свидетелями из 122 населенных пунктов, а также свидетелями, находившимися в момент события на трассах М36 и М5. Наибольшее число очевидцев было из Челябинска, как наиболее крупного населенного пункта с наибольшей плотностью населения и наиболее развитой инфраструктурой (доступом к интернету).

Тепловые эффекты

Большое количество свидетелей сообщало, что ощущало тепло во время пролета болида, даже на некоторых видеозаписях, выложенных на youtube, очевидцы говорят, что «жаром обдало», «как тепло» и т.д. Многие очевидцы упоминали об ощущении тепла, которое возникало в момент пролета болида, когда они стояли к нему спиной и не видели его. Из 1113 очевидцев интернет опроса, которые находились в момент пролета болида на улице 2,3% (25 человек) сообщили о покраснении на коже, 28% (315 человек) ощущали жар, 37% (415 человек) ощущали тепло (рис. 1). Тепловые ощущения были зафиксированы на расстоянии до 110 км от траектории болида. Данные о тепловых ощущениях интернет-очевидцев, находившихся заметно дальше 100 км (например, дальше Екатеринбурга, или в Нижнем Тагиле) от траектории, вызывают сомнение и требуют уточнения.

Очевидцы, которые находились ближе к траектории болида, сообщали, что получили легкие ожоги. В основном это было покраснение открытых (или плохо прикрытых) участков тела (руки, шея, лицо). Распределение 25 свидетельств о покраснениях кожи приведено на рис. 2.

Житель Коркино Владимир Петров и глава Травниковского сельского поселения Н.А. Рыбин рассказывали, что они получили ожоги (аналогичные солнечным), вызвавшие впоследствии шелушение кожи. Коркино находится в 5–6 км от проекции траектории болида на землю. Травники расположены в 3 км от проекции траектории (55 км от основной вспышки и в 4 км от второй вспышки излучения на световой кривой болида). Расстояние от точки максимального энерговыделения до Коркино составляет примерно 30 км, известно, что такого рода покраснения возникают



а) б)

Рис. 1. Данные о тепловых ощущениях: (а) согласно Интернет опросу; (б) полученные в экспедиции. Черные метки – очевидцы не ощущали тепловых эффектов, белые – очевидцы ощущали тепло

Рис. 2. Данные Интернет опроса – показаны данные об ожогах

при потоках примерно в 1000 Дж/м^2 в диапазоне 290–320 нм (в основном УФ излучение). Если пользоваться оценкой температуры излучающей области в 6000 К [Nemtchinov et al., 1997], то поток составит ~200 Дж/м^2 в Коркино, но следует помнить, что эта оценка приблизительна, а в излучающей области имеются и более высокие температуры [Голубь и др.,1997]. Кроме того, свой вклад могло внести и отражение от окружающего снега.

Травмы

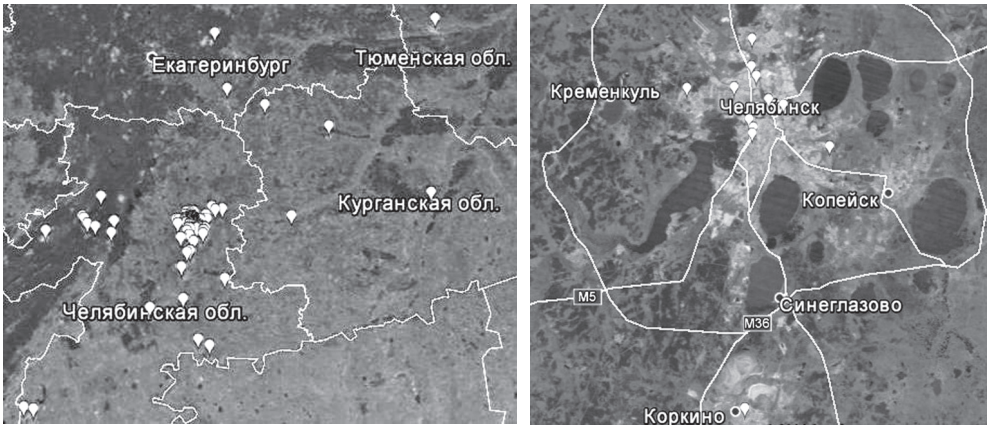
Челябинское событие – единственное на сегодняшний день падение космического объекта, от которого пострадали люди. С точки зрения проблемы астероидной опасности важно понимать, какого рода травмы возникают в таких ситуациях. Челябинское событие, вызванное падением 20-м тела, по Туринской шкале [Binzel, 2000] относится к классу нулевой опасности, тем не менее, достаточно заметное число жителей было вынуждено обратиться за медицинской помощью. Травмы были различного характера, большую часть из них составляли порезы от разбитых стекол. В результате 1625 человек обратились за медицинской помощью, 69 из них были госпитализированы (из которых 13 детей), 2 пострадавших получили тяжелые травмы.

Доля жителей, получивших травмы, требовавшие медицинской помощи, достигала 0,16–0,11% в наиболее заселенных и близко расположенных к траектории районах [Popova et al., 2013]. Далеко не все обратились за медицинской помощью. Из 500 опрошенных по телефону респондентов в Челябинске 1% сообщил, что получил повреждения/недомогания, еще 1% сообщил, что повреждения/недомогания были у него самого и у ближайших родственников, 7% сообщили о тех или иных травмах у ближайших родственников [Kartashova et al., 2014 а,б]. Поэтому можно предполагать, что хотя бы минимальные повреждения или небольшие недомогания получили несколько тысяч человек.

На вопрос о травмах положительно ответило 377 респондентов интернет опроса (20,9% от опрошенных), которые перечислили разные виды травм/недомоганий. 290 оставило вопрос без ответа (16% из числа опрошенных), Основная часть травм/недомоганий была вызвана как действием яркого света на глаза, так и воздействием ударной волны. Видеозаписи свидетельствуют, что ударная волна была достаточно сильная, чтобы в ряде случаев сбить человека с ног. Осколки стекла и каких-либо конструкций привели к порезам и ушибам у 18 (4,8% от числа ответивших положительно) и 11 (2,9%) респондентов, но ни один не сообщил о переломе костей.

Поражения глаз

204 очевидца из 1800 указали, что после Челябинского события у них болели глаза. Ощущения были различного характера. Кто-то указал, что у них были резкие боли (180 респондентов (48% травм/недомоганий)), временное ослепление (70 респондентов, 19% травм/недомоганий), у кого-то опухли глаза, и они обратились за медицинской помощью, возникала чувствительность к дневному свету. На рис. 3 показано расположение очевидцев получивших травму глаз. Были и такие, кто считал, что получил ожоги сетчатки (15 человек (4% из интернет опроса) (рис. 3,б).



а) б)

Рис. 3. (а) Расположение очевидцев события, сообщивших о поражении глаз; (б) расположение очевидцев, сообщивших об ожогах сетчатки

Симптомами ожога сетчатки, по словам очевидцев, являлись ощущения, похожие на возникающие при взгляде на сварку или появление темных пятен в глазах, существовавших долгое время. Официальных данных об ожоге сетчатки не было.

Головные и ушные боли

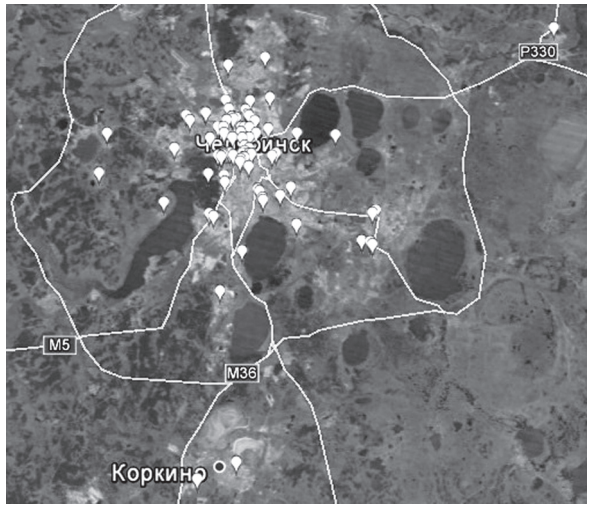
Многие очевидцы говорили, что получили контузию (легкое сотрясение головы) и испытывали головные боли после прихода ударной волны. Об этом сообщил 41 респондент (11% травм/недомоганий) интернет опроса (рис. 4,а), в основном это были жители Челябинска.

85 человек (23% от сообщивших о травмах/недомоганиях или 5% от всех ответивших) жаловались на временное оглушение или заложенность ушей. Не было ни одного сообщения о повреждении барабанной перепонки, что позволяет сказать, что избыточное давление нигде не превышало 16,5 кПа (пороговое значение, при котором вероятность разрыва барабанной перепонки составляет 1% [Mannan and Lees, 2005]). Согласно Гельфанд, Сильников (2002) у 10% людей возникает временная потеря слуха при уровне давления в ударной волне 1,4 кПа. Поэтому можно предположить, что давление в ударной волне достигало и могло превышать 1 кПа, что согласуется с данными по выбитым стеклам [Шувалов и др., 2014].

Запах

Информация о запахах была зафиксирована в 14 населенных пунктах расположенных вдоль траектории болида. Запах ощущался в течение 1–1,5 часов после пролета. Восточная граница с очевидцами данного эффекта совпадает с восточной границей ударной волны и проходит через Белоусово, Лесной и Николаевку. Архангельское, Октябрьское поле являются западной границей, которая также находится вблизи западной границы, где были выявлены повреждения (разбитые стекла в окнах и дверях). Почти все очевидцы сообщали, что запах был похож на запах

а)



б)

Рис. 4. (а) Расположение очевидцев с головной болью; (б) распределение очевидцев, жаловавшихся на поражения ушей

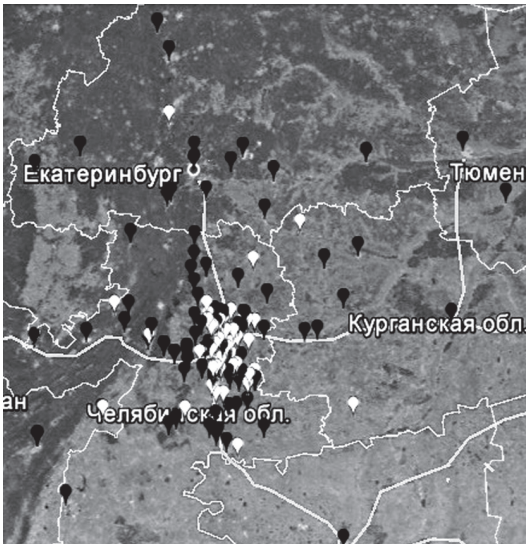


Рис. 5. Расположение очевидцев, чувствовавших запах (данные интернет опроса и экспедиции)

серы, гари или запах пороха после выстрела. Возможным объяснением такого запаха может быть горение троилита (FeS), присутствующего в веществе метеорита в заметных количествах. Кроме того, запах гари мог возникнуть благодаря появлению в воздухе заметного количества пыли и сажи из вентиляционных шахт, дымоходов и печных труб под действием ударной волны. Этим эффектом можно объяснить и появление пепла, о котором сообщал ряд очевидцев. Очевидцы из Еманжелинки, расположенной вблизи траектории болида, также сообщали о появившемся запахе озона, похожего на запах после грозы. Озон может образовываться под воздействием УФ излучения метеора с длиной волны λ = 200–300 нм в непосредственной близости от болида. Наличие солнечных ожогов у очевидцев также свидетельствует о заметной доле ультрафиолета в излучении болида.

Звук

Пролет болидов сопровождается звуковыми эффектами. Челябинское событие стало тем редким случаем, когда полет болида характеризовался различными звуковыми эффектами. Прежде всего, огромное впечатление на очевидцев оказала ударная волна. Звук от нее был зафиксирован, по словам очевидцев, на расстояниях до ~150 км от траектории полета. Кроме того, Челябинский болид сопровождался звуками во время полета, то есть являлся так называемым электрофонным. Многочисленные очевидцы из населенных пунктов (на расстоянии около 50 км от места основного энерговыделения) рассказывали о звуках подобных свисту, треску, шипению, бенгальским огням (табл. 1, рис. 6). По результатам интернет опроса 131 опрошенных из 1800 сообщили о звуках, которые они слышали до прихода ударной волны, во время пролета болида.

Таблица 1

Данные интернет опроса об электрофонных звуках

Звуки	Опрошенные	Звуки	Опрошенные
Шипение или свист, подобный запуску петард	76	Треск	25
Звук подобный бенгальскому огню	13	Шелест, шорох	6
Свист	26	Гул	19
Писк	2	Гул самолета	31

На рис. 6 изображены населенные пункты, где находились респонденты, сообщившие об электрофонных звуках. Область, из которой пришли сообщения об электрофонных звуках, достигает 115 км с запада на восток и 142 км с севера на юг. Три заслуживающих доверия очевидца (инженер, физик по образованию и

а)

Рис. 6. (а) Населенные пункты, из которых были сообщения об электрофонном эффекте; (б) распределение электрофонных звуков в Челябинске. Темные метки – шипение, белые – свист, белые со звездочкой – треск

б)

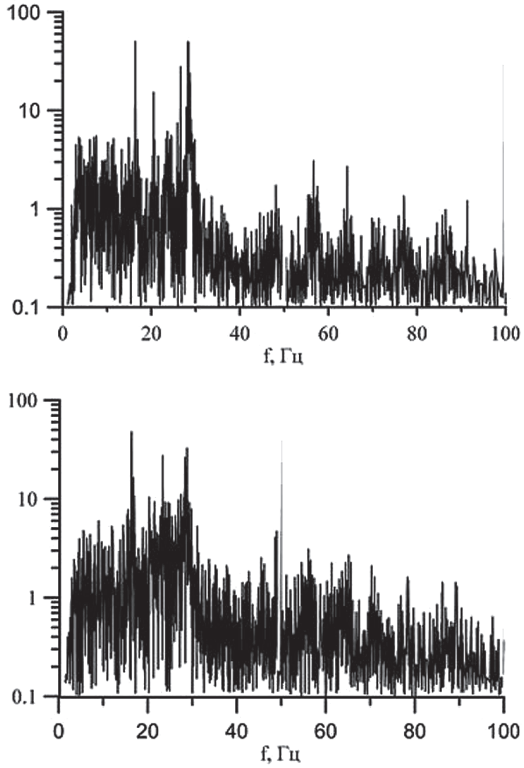


Рис. 7. Спектры шума, создаваемого бенгальскими огнями различных фирм

водитель) описывают звук как шипение масла на сковороде (Челябинск), гудение трансформатора и рев двух истребителей (оба – Еманжелинск). Ни один из этих очевидцев не носит очки, им казалось, что звук доносится со стороны болида.

Для звуков, сопровождающих горение бенгальских огней, характерны спектры, приведенные на рис. 7. Основная мощность звуков приходится на диапазон частот ниже 30 Гц. На более высоких частотах могут быть отдельные пики, но гораздо меньшей мощности. Для человеческого уха эти звуки соответствуют звукам контроктавы и ниже (в научной нотации – первой октаве, которой соответствуют частоты 32,7–61,7 Гц) и большой октаве (в научной нотации второй октаве, которой соответствуют частоты 65,4–123,5 Гц).

На основе этих данных можно сказать, что свидетели слышали низкочастотный шум в диапазоне ~30 Гц и выше. В этом же диапазоне частот регистрировались шумы при наблюдении метеоров потока Леониды [Zgrablic et al., 2002].

Выводы

Челябинское событие хорошо задокументировано. Есть различные фото, видео регистрации, регистрации излучения спутниковой системы наблюдений, инфразвуковые и сейсмические сигналы, спутниковые и наземные регистрации пылевого следа в атмосфере. Но определение других эффектов (запах, тепловые и звуковые ощущения и т.д.) невозможно без опроса очевидцев, поэтому и были организованы интернет опрос и экспедиция в район события. Опрос очевидцев также необходим для составления полной картины полученных травм.

Были получены ответы ~1800 респондентов с помощью интернет опроса, в ходе экспедиции были опрошены свидетели в 59 населенных пунктах. Эти данные позволили определить области, в которых наблюдались различные эффекты, сопровождавшие падение Челябинского метеороида (запахи, связанные с пролетом болида; электрофонные звуки), области, в которых люди получили те или иные травмы и недомогания. Эти данные позволят уточнить картину входа крупного космического тела в атмосферу, составить более точный прогноз поражающих эффектов космических импактов.

Литература

Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Фугасные эффекты взрывов. 2002, СПб., ООО «Издательство Полигон», 272 с.

Голубь А.П., Косарев И.Б., Немчинов И.В., Попова О.П. Спектры излучения ярких болидов // Астрономический вестник. 1997. Т. 31. № 2. С. 99–112.

Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. Астрономические и физические эффекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. 2013, 47, с. 1–16.

Шувалов В.В., Артемьева Н.А., Попова О.П. (данный сборник).

Binzel R.P. The Torino impact hazard scale // Planetary&Space Science. 2000. Vol. 48. P. 297.

Kartashova A. et al. Expedition to the field of the Chelyabinsk event // Proceedings of IMC-2013, Poznan, Poland (in press).

Kartashova A. et al. The eye witnesses interviews of the Chelyabinsk meteorite // Proceedings of IMC-2013, Poznan, Poland (in press).

Nemtchinov I.V., Svetsov V.V., Kosarev I.B. et al. Assessment of kinetic energy of meteoroids detected by satellite-based light sensors // Icarus. 1997, 130, c. 259–274.

Mannan S., Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control, vol. 1, 3rd edition (Elsevier Butterworth-jHeinemann, 2005).

Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V.V. et al. (59 authors). Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization, Science. 342, pp. 1069–1073, 2013.

Zgrablic G, D. Vinkovic´, S. Gradec˘ak, D. Kovac˘ic´, N. Bilis˘kov, N. Grbac, Z. Andreic´, and S. Garaj. Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N. A7, 10.1029/2001JA000310.

ABSTRACT

THE FALL OF CHELYABINSK METEORITE IS A TYPICAL EVENT IN THE EARTH HISTORY

V.V. Svetsov, V.V. Shuvalov, N.A. Artemieva, O.P. Popova

The Chelyabinsk event is described in a context of multiple collisions of space objects of different sizes with the Earth throughout all its evolution. The impacts of bodies smaller than 10 meters in size happen quite often, one-meter-diameter bodies fall on the Earth on the average about once a week, but, as a rule, these falls occur in areas remote from housing and, therefore, they are recorded only by experts. The Chelyabinsk meteoroid, though it had quite a big size ~20 m, represented a typical stone asteroid. Such bodies collide with the Earth approximately once in 50–100 years, but uniqueness of this event is associated mainly with the place of the impact – the area with a dense population and developed industry. In the article, we consider the main physical phenomena occurring during the interaction of meteoroids by size in the first tens of meters with the atmosphere – deceleration, ablation, fragmentation, propagation of a shock wave. Modern methods of registration and modeling of bolide phenomena are described. In the final part, actual problems for further researches are formulated.

ORBIT AND EVOLUTION OF THE CHELYABINSK OBJECT

S.A. Naroenkov[1], *V.V. Emel'yanenko*[1], *O.P. Popova*[2]
[1] – INASAN, [2] – IDG RAS

The orbit of the Chelyabinsk object is calculated, applying the least-squares method directly to astrometric positions. The dynamical evolution of this object in the past is studied. The possible association of the Chelyabinsk object with 86039 (1999 NC43) and 2008 DJ is discussed.

ELECTROMAGNETIC EFFECTS GENERATED IN THE EARTH IONOSPHERE BY METEOROID FALLING

I.Kh. Kovaleva, A.T. Kovalev, O.P. Popova, Yu.S. Rybnov, Yu.V. Poklad, D.V. Egorov

In current study we consider electromagnetic disturbances of different nature accompanying falling meteoroids. We analyze characteristic features of Chelyabinsk meteoroid. A new mechanism for generation of electromagnetic signal in the frequency range from Hz to kHz is proposed. The ionosphere plas-

ma perturbation and characteristics of electromagnetic signals which may be generated in ionosphere are estimated. The model of electrophonic noise formation is based on the excitation of the ion cyclotron resonances on troposphere ions by electromagnetic noise from ionosphere.

ESTIMATES OF PARAMETERS OF THE SHOCK WAVE INDUCED BY AN IMPACT OF THE CHELYABINSK COSMIC BODY

V.V. Shuvalov, N.A. Artemieva, O.P. Popova

We use numerical modeling to consider the generation and propagation of shock waves induced by the Chelyabinsk impact in the Earth's atmosphere, to determine the value of maximum overpressure in different points of the surface, and to estimate the size of a damaged area. Different energy release profiles along the trajectory were considered to study their influence on the size of the damaged area. The times of a sound signal arrival and its shape were analyzed.

FRAGMENTATION OF THE CHELYABINSK METEOROID

O.P. Popova[1], *P. Jenniskens*[2], *D.O. Glazachev*[1]
[1] – IDG RAS, [2] – SETI Institute

The interaction of the Chelyabinsk meteoroid with the atmosphere is considered, its light curve and corresponding energy release are estimated. The meteor model, which allows us to reproduce observational data (light and deceleration curves), is represented. The meteorite strewn field is described, and the total meteorite mass is estimated. The model and observed meteorite distributions are compared.

ESTIMATION OF THE CHELYABINSK BOLIDE ON THE POWER SPECTRUM LONG-PERIOD OSCILLATIONS IN ATMOSPHERIC PRESSURE

Yu.S. Rybnov, O.P. Popova, V.A. Kharlamov

The article discusses the energy estimate of Chelyabinsk bolide on long-period infrasonic fluctuations in atmospheric pressure. The technique, which uses the integrated energy dependence of the power spectrum. These results coincide satisfactorily with those obtained in other articles.

IONOSPHERIC EFFECT OF THE CHELYABINSK IMPACT

M.Yu. Kuzmicheva, T.V. Losseva, A.N. Lyachov

We discuss results of vertical sounding of the ionosphere after the impact of the Chelyabinsk meteoroid on February 15, 2013. A 3D gas dynamic simulation explains observed phenomena

ESTIMATES OF A SEISMIC EFFECT CAUSED BY THE FALL OF CHELYABINSK COSMIC OBJECT

V.V. Svetsov, V.V. Shuvalov

We have made theoretical estimates of the magnitude of a seismic event produced by the fall of the Chelyabinsk bolide. Pressures on the Earth surface have been computed by means of numerical simulations of formation and propagation of shock waves generated by deceleration of the cosmic object and release of energy along its trajectory in the atmosphere. Determination of the magnitude of a seismic source has been made using formulas based on a solution of Lamb's problem for pressure acting on a half-space. Constants in formulas were picked earlier according to the published data on experimental explosions in air. In the assumption that kinetic energy of the Chelyabinsk space body before the entry to the atmosphere was equal to 300 kilotons in a trinitrotoluol equivalent, the calculated magnitude of a seismic event is equal to3.85. For the energy of a body of 500 kt TNT the magnitude is equal to 4.0. These magnitudes agree with the published results of magnitude measurements within measurement errors. The calculations of magnitudes of spherically symmetric explosions in air with energies from 30 kt to 30 Mt TNT at heights from 5 to 45 km were also carried out. The magnitude of the Chelyabinsk event corresponds to spherically symmetric explosions with energies equal to the kinetic energy of a body at an altitude of about 35 km. Estimation of the Chelyabinsk bolide on the power spectrum long-period oscillations in atmospheric pressure

SEISMIC SIGNALS PRODUCED BY THE CHELYABINSK ENTRY SHOCK WAVE IN THE NEAR FIELD

O.A. Usoltseva, R.A. Dyagilev[1], S.N. Mulev[2]

[1] – IDG RAS, [2] – Mining Institute Ural Division RAS; [3] – Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center RAS VNIMI

A seismic event, caused by the shock wave from the Chelyabinsk meteoroid entry, was recorded by 6 seismic sensors near Korkino town located at the epicentral distance $\Delta = 10$ km from the coordinates of the point of maximum energy release. The amplitude and the arrival times of seismic signals are determined. The coordinates of the signal source are calculated based on the determined azimuths and the angles of incidence.

EVALUATION OF THE SPATIAL COORDINATES OF THE ACOUSTIC SIGNAL SOURCE IN THE CHELYABINSK EVENT BASED ON RECORDED SIGNALS

V.A. Kharlamov[1], O.P. Popova[1], Yu.S. Rybnov[1], E.D. Podobnaya[1], P. Jenniskens[2]

[1] – IDG RAS, [2] – SETI Institute

Methodology for calculation of spatial coordinates of the acoustic signal source based on recorded signals is given. This methodology is applied to the records obtained at different locations. The source position is determined.

PENETRATION OF THE CHELYABINSK METEORITE FRAGMENT THROUGH THE CHEBARCUL LAKE ICE COVER: PRELIMINARY MODELING

B.A. Ivanov

15.02.2013 the large stone meteoroid entered Earth's atmosphere and fragmented in several steps above Chelyabinsk City. The most od small fragments settled to the surface with low (terminal) velocity, However, at least one large (mass about 600 kg or larger) penetrated the ice cover at the Chebarcul lake, Later this fragment (or its substantial part) was recovered from the lake bottom. The penetration resulted in the hole formation in the ice with the diameter 6 to 8 m partly filled with the fragmentrd ice. The paper presents a preliminary analysis of the ice hole formation based on the minimal (recovered) mass of the penetrated fragment and its velocity, estimated to be close to the terminal velocity of descending.

SMOKE TRAIN OF THE CHELYBINSK METEOROID

N.A. Artemieva, V.V. Shuvalov

A spectacular smoke train left by the Chelylabinsk meteoroid in atmosphere lasted much longer than the 10-sec bolide. The train was easily visible in the skies above the Ural mountains at least half an hour and looked similar to a giant contrail. Then it was eroded and shifted southward and, later, eastward by local winds. The paper describes numerical modeling of the smoke train during the first 3 minutes. Modelling results are compared with observations. Also, the authors analyze a possibility of plume formation in the atmosphere after relatively small impacts.

CHELYABINSK EVENT: WITNESSES REPORTS

A.P. Kartashova[1], O.P. Popova[2], P. Jenniskens[3], S. Korotkiy[4], E. Biryukov[5], I. Serdyuk[4], V.V. Emel'yanenko[1], D.O. Glazachev[2], S.A. Khaibrrakhmanov[6], A.E. Dudorov[6], A.Ya Skripnik[7], Yu.S. Rybnov[2]

[1] – INASAN, [2] – IDG RAS, [3] – SETI Institute, [4] – Ka-Dar observatory, [5] – SUSU, [6] – ChelSU, [7] – GEOKHI

Entry of cosmic objects into the atmosphere causes bright radiation, formation of a shock wave, deposition of cosmic matter at different heights in the atmosphere, subsequent chemical reactions, and other effects. The Chelyabinsk bolide was observed at large distances, but inhabitants of Chelyabinsk region witnessed not only the bolide but also other effects connected with the event (shock wave arrival which caused damage and injuries, heat sensations, different sounds, etc). Data on these effects obtained due to witnesses' reports are presented.

Научное издание

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСФЕРАХ

Сборник научных трудов ИДГ РАН

ВЫПУСК 5

Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида

Дизайн обложки: *Н.В. Артемьева*
Фотография на обложке: *Эдуард Калинин*
Компьютерная верстка: *М.В. Старшова*

Подписано к печати 00.00.2014
Формат $70\times100^{1}/_{16}$. Бумага офсетная
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 00
Тираж 000 экз.
Тип. зак. № , Москва

Издательство ГЕОС
119017, Москва, Пыжевский пер., 7. к. 332
Тел./факс: (495) 959-35-16
e-mail: geos-books@yandex.ru
www.geos-books.ru