

Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов

© Ю.И. Лобановский

ПАО «Корпорация «Иркут», Москва, 125315, Россия

Показано, что концепция воздушного взрыва хондритного метеороида плотностью 3300 кг/м^3 , диаметром порядка 15...20 м, массой 10...15 кт и энергией взрыва 0,3...0,5 Мт в тротиловом эквиваленте, произошедшего 15 февраля 2013 г. в небе к юго-юго-западу от Челябинска, абсолютно не согласуется с реальными явлениями, наблюдавшимися в тот момент в атмосфере и на подстилающей поверхности. Это доказывают данные инфразвуковых исследований, уровни избыточного давления на ударной волне в Челябинске и окрестностях, а также информация о разбитых стеклах, выбитых воротах и деформированных стальных несущих балках. Об этом свидетельствует и масса следа Челябинского метеороида. Анализ имеющихся данных, проведенный в работе, объясняет причины появления ошибочных, но широко растиражированных оценок параметров этого метеороида и характеристик его взрыва.

Ключевые слова: Челябинский метеорит, метеороид, ядерный взрыв, инфразвук, вспышка, ударная волна, давление.

Введение. В первые же часы после взрыва очень крупного метеороида 15 февраля 2013 г. в небе юго-юго-западнее Челябинска появились скоропалительные умозаключения как астрономов-профессионалов, так и дилетантов, до сих пор довлеющие над умами, что не позволяет правильно и беспристрастно оценить произошедшее событие.

Автор настоящей статьи не является профессиональным астрономом, но как ученый-физик заинтересовался таким неординарным явлением. Не используя предвзятых точек зрения о природе и характеристиках метеороидов, в марте 2013 г. он построил математическую модель, связывающую параметры движения небесных тел как в сфере действия Солнца, так и в сфере действия и атмосфере Земли с их массоэнергетическими характеристиками и характеристиками взрывов, вызванных их разрушением, которые, в свою очередь, увязываются с наблюдающимися при этом явлениями [1–3]. Важнейшая часть модели — интерактивный интернет-модуль, описывающий разрушение метеороидов в атмосфере и/или их падение на поверхность Земли [4]. Такая комплексная модель при известной орбите метеороида до столкновения с Землей позволяет перейти от более или менее правдоподобных предположений о характеристиках метеороидов, входящих в ее атмосферу, к их прямым расчетам.

Применение разработанной модели к Челябинскому метеороиду показало, что его параметры и характеристики его взрыва значитель-

но отличаются от заявленных в большинстве современных работ и их интерпретаций средствами массмедиа, тиражируемых различными изданиями в бесчисленных количествах. Поэтому целесообразно провести анализ данных, представленных другими исследователями, и выявить причины расхождения между ними и данными, полученными в работах [1–3]. Для этого будем последовательно сравнивать по основным направлениям исследований результаты, полученные с помощью разработанной математической модели, и данные, опубликованные двумя крупными коллективами исследователей (всего 92 чел.) [5, 6] в конце 2013 г. в авторитетных научных журналах Nature и Science и в целом аккумулирующие мнения большинства ученых.

Оценки параметров Челябинского метеороида и характеристик его взрыва по данным инфразвуковых станций. В релизе NASA 15 февраля 2013 г. сообщалось, что Челябинский «метеор» имел диаметр до входа в атмосферу 15 м, массу 7 кт, скорость полета 18 км/с и энергия его взрыва составляла «сотни килотонн» в тротиловом эквиваленте [7]. Основания для таких оценок не были указаны. В тот же день последовало уточнение, что диаметр объекта уже составил 17 м, масса «выросла» до 10 кт, а оценка энергии взрыва увеличилась на 30 кт, примерно до 500 кт, хотя кинетическая энергия метеороида, по указанным в первом релизе данным должна была бы составить 270 кт, и при ее увеличении на 30 кт значение энергии в 500 кт никак не могло получиться. Основаниями для новых (уточненных) оценок послужили данные, полученные «на 5 «дополнительных» станциях инфразвукового наблюдения, расположенных по всему миру, причем первой из них, зарегистрировавшей событие, была станция на Аляске» [7].

Учитывая тот факт, что, умножая половину квадрата заявленной скорости объекта на заявленную массу и деля результат на 4,185 МДж/кг (стандартную удельную энергию тротила), любой, кроме авторов уточнения к релизу, получил бы не более 390, а не 500 кт, можно понять: они так торопились, что забыли даже о законе сохранения энергии. Кроме того, как работники научно-исследовательского центра NASA — лаборатории JPL, они должны были бы знать следующее: у таких небольших объектов энергия финального взрыва меньше их начальной кинетической энергии на входе в атмосферу вследствие рассеяния энергии по траектории. В данном случае при пологой траектории полета расчеты приводят к энергии взрыва не более 100...150 кт в тротиловом эквиваленте. При таком взрыве избыточное давление на ударной волне в Челябинске было бы минимум на два порядка ниже наблюдавшегося, и тогда не могли бы произойти разрушения (см. рубрику «Расчет избыточного давления на ударной волне»).

Очевидно, что инфразвуковыми станциями, которые фиксируют только атмосферные возмущения, размер объекта напрямую не мог быть определен. Единственный логически обоснованный вариант — авторы релиза заявили в качестве размера Челябинского объекта тот максимум, который они считали не обнаруживаемым в ближайшем околоземном космическом пространстве современными оптическими автоматизированными системами слежения. Это вскоре было подтверждено «научным обоснованием» такого подхода [8]. Однако никто из них не подумал, что этим системам недоступны околосолнечные ракурсы, а Челябинский объект заходил именно так — его линия входа была отклонена от направления на Солнце на угол всего лишь около 10° [1–3].

Спустя два месяца после инцидента представленный в газетной статье [9] как «крупнейший в мире специалист в области анализа инфразвуковых волн болидов» П. Браун на Международной конференции по защите от астероидно-кометной опасности (Флагстафф, США, 15–19 апреля 2013 г.) заявил: инфразвуковые волны, создаваемые Челябинским метеоритом, были такой низкой частоты, что существующее программное обеспечение для их обработки «не смогло с ними справиться» [10]. Таким образом, он публично признал ошибочность своих данных, которые были фактически единственным основанием версии NASA о параметрах Челябинского метеороида. Примерно в то же время П. Браун заявил репортеру канадской газеты «Star» К. Аллену: инфразвуковая волна от взрыва метеороида была трижды зарегистрирована в Гренландии [9], т. е. на инфразвуковой станции П18DK Международной системы мониторинга [11], а значит, волна «пробежала» вдоль поверхности Земли не менее 85 тыс. км [12]. Отсюда трудно представить, как даже не «крупнейший в мире специалист», а просто человек, знакомый с основами логики и арифметики, мог спустя несколько месяцев снова утверждать (Nature): энергия взрыва Челябинского метеороида составила (500 ± 100) кт [5], при том что при почти такой же длине пробега у инфразвуковой волны от крупнейшего рукотворного взрыва Царь-бомбы (боезаряда АН602) его энергия составила 58 000 кт, т. е. почти в 120 раз больше [13]! С более точным и подробным анализом описанной ситуации читатель может ознакомиться в работе [14], а с простейшим качественным анализом — в работе [15]. Повторяться, на наш взгляд, излишне.

Яркость вспышки Челябинского метеороида. Вскоре (март 2013 г.) появились «дополнительные подтверждения» этой, как показывают расчеты, совершенно неадекватной оценки энергии взрыва Челябинского объекта — порядка 500 кт [16]. Посредством корреляции энергии световой вспышки и энергии самого взрыва [17] снова (как будто бы) было получено пресловутое значение в 500 кт. Однако

корреляция из источника [17] только по одному параметру была проведена для энергии взрыва 0,1...1 кт, а вследствие того, что в реальности имеет место многопараметрическая зависимость, отличалась большими расхождениями между эмпирическими точками и корреляционной кривой. И такую ненадежную зависимость авторы работы [16] экстраполировали, как они полагали, на три порядка, а в самом деле даже на пять! Вследствие некорректности такой экстраполяции с ее помощью можно получить абсолютно любые наперед заданные результаты.

По тому же пути пошли и авторы статей [5, 6]. Прямые измерения яркости вспышки Челябинского метеороида, по понятным причинам, не были проведены, поэтому авторам соответствующего раздела работы [6] ничего не оставалось, как использовать изображения, полученные с видеорегистраторов, в основном автомобильных. Эти изображения, как правило, создавались светом, отраженным различными твердыми поверхностями с неизвестными для вычислителей яркости коэффициентами отражения. К тому же каковы были спектрально-яркостные характеристики по интенсивности света и длинам волн у этих видеорегистраторов, осталось неизвестно. Для того чтобы учесть влияние этих неопределенностей, исследователи [6] провели коррекцию измерений интенсивности света с помощью калибровки на произвольно выбранной камере (Mediox DVR100) по яркости Луны. Однако при этом не были учтены следующие обстоятельства.

1. Коэффициенты отражения разных материалов в разных спектральных диапазонах и при различных углах отражения и яркости должны изменяться. Если не учитывать это обстоятельство, можно прийти к различию между расчетными результатами и реальными значениями яркости в разы.

2. Осредненная коррекция характеристик регистраторов при вспышке неизвестной яркости (но ясно, что очень большой и нерасчетной для регистраторов) в данной ситуации — это экстраполяция по экспоненте с неопределенными коэффициентами в очень широком диапазоне аргумента. Куда она может привести, ясно любому, кто пытался когда-нибудь это делать. Ошибки могут в десятки и сотни раз отличаться от реальных оценок. Причем, насколько экспонента может реально описать чувствительность указанных разнотипных видеорегистраторов, тоже остается вопросом.

3. Калибровка кривой яркости на ее нижней границе [6] по источнику с интенсивностью света в миллионы или, возможно, в десятки миллионов раз меньшей, чем максимальная яркость вспышки, — это операция, никак не связанная с адекватным пересчетом данных по яркости на максимуме вспышки.

4. Изменение длины волны излучения при калибровке также может и должно повлиять на чувствительность датчиков. В интересующем нас случае максимум мощности сдвигается примерно с 0,3 мкм

(свечение вспышки при температуре $\sim 10^4$ К) на 0,5 мкм (отраженный Луной солнечный свет, спектральные характеристики которого соответствуют $\sim 6 \cdot 10^3$ К).

Таким образом, попытки получить [6] оценки абсолютной яркости вспышки Челябинского метеороида с приемлемой точностью в силу объективных обстоятельств, а также в связи с нежеланием или неспособностью предпринимавших их лиц провести действительно адекватные калибровки, коррекции и перерасчеты, опирались на плохо верифицируемые и незадокументированные действия. В работе [5] авторы только ссылаются на данные «правительственных сенсоров», проверить и проанализировать которые нет возможности.

И, наконец, главное. В принципе невозможно, используя данные видеокамер и видеорегистраторов, получить правильную оценку интенсивности света, излучаемого вспышкой, яркость которой многократно превосходит яркость Солнца. Как известно, при фотографировании Солнца с помощью современных фотоаппаратов и видеокамер происходит соляризация — на изображении возникают фиолетовые или черные пятна вследствие так называемого пересвечивания (полной потери чувствительности) соответствующих участков воспринимающей свет матрицы. И подобный эффект можно наблюдать не только при наведении камеры на Солнце, но даже и на его отражение, например, в водах Днепра в окрестностях Херсона [18] (рис. 1).



Рис. 1. Пятна соляризации на изображении Солнца и на его отражении в воде

В связи с этим отметим, что пиковая абсолютная яркость вспышки (яркость на расстоянии 100 км) при взрыве Челябинского объекта, по данным источника [6], составила $(-27,3^m \pm 0,5^m)$ звездной величины (или магнитуды, по терминологии статей [5, 6]) и -28^m , по данным сенсоров, «принадлежащих американскому правительству» [5]. Известно, что видимая звездная величина Солнца составляет $-26,7^m$ [19], т. е. его яркость в 1,7–3,3 раза ниже, чем у вспышки по данным источников [5, 6]. По-видимому, вследствие того, что «правительственные» (следует понимать «принадлежащие военному ведомству») сенсоры находились дальше от взрыва, чем челябинские видеокамеры и/или были качественнее, на них и была зарегистрирована большая яркость вспышки, однако по указанным причинам она также вполне могла быть все же значительно ниже реальной.

По фотографии (см. рис. 1) можно оценить минимальную магнитуду свечения, при которой уже происходит пересвечивание обычных матриц. Угловая высота Солнца над о-вом Малый Потемкин на Днепре [20] составляет около 10° . При этом яркость отраженного поверхностью воды света составляет около $1/3$ от яркости прямого солнечного света [21], и тогда ее магнитуда близка к значению $-25,5^m$, так как камеры, с помощью которых в источнике [6] определялась яркость вспышки, находились в Челябинске, то расстояние до точки максимума вспышки на высоте 31,7 км [6] составляло около 50 км, и яркость ее там была в 4 раза больше, чем на дистанции 100 км, на которой определяется абсолютная яркость. Так как эти камеры фиксировали отраженный свет, то его интенсивность могла быть на порядок ниже, чем прямого. Тогда магнитуда потока отраженного света была примерно на единицу выше, чем абсолютная яркость по данным источника [6], или на единицу ниже (около $-26,5^m$, примерно, как у Солнца), чем та магнитуда, на которой явно было зафиксировано пересвечивание матрицы фотоаппарата (чем ниже магнитуда, тем больше яркость).

Таким образом, данные по максимальной яркости вспышки Челябинского метеороида, полученные видеорегистраторами, оказались вне их рабочей зоны чувствительности, и обработка таких данных не позволяет оценить яркость столь мощной вспышки.

За день до годовщины взрыва Челябинского метеороида на местном телевизионном канале прозвучало «сенсационное сообщение» о том, что на одном из ранее не демонстрировавшихся видеороликов зафиксировано изображение тела, его вызвавшего [22]. Это темное пятнышко лучше видно на том же видеоролике, но выложенном на YouTube [23], — рис. 2. Пятнышко наблюдается примерно в центре зоны засветки от взрыва. Слева от него в кадре имеется надпись ПС — «пятно соляризации». Совершенно очевидно, что это такой же

результат пересвечивания матрицы камеры видеонаблюдения, как и на рис. 1, и один из двух известных автору настоящей статьи случаев фиксации этого явления на кадрах взрыва Челябинского метеороида. Этот факт снова и явно указывает на то, что видеокамеры работали тогда на пределе и за пределами своих расчетных характеристик, и по изображениям, полученным ими, нельзя каким-либо способом определить яркость вспышки. Поэтому данные по яркости, полученные авторами [5, 6], не могут считаться достоверными из-за предельной яркости вспышки для таких камер на рассматриваемых дистанциях от вспышки. Кроме того, по причинам, указанным в начале этой рубрики, оценки энергии взрыва метеороида на основе этих данных тем более не могут приниматься во внимание.



Рис. 2. Пятно соляризации на изображении вспышки Челябинского метеороида

Оценки избыточного давления на ударной волне по доле разбитых оконных стекол. Рассмотрим оценки избыточного давления на ударной волне, необходимого для массового разбития оконных стекол. В Приложении к статье [6] написано: «Величина перепада Δp , необходимая для разбития оконных стекол, зависит от толщины стекла и его площади». Это совершенно правильное утверждение, более того, нетрудно привести формулы, которые позволили бы заменить это качественное утверждение количественным. К тому же сильно влияют условия закрепления стекла в раме, направление подхода ударной волны, геометрия и ориентация здания, в котором эти окна расположены, а также топография окружающей местности и даже направление ветра. Так как в пределах большого города и еще

нескольких городов и поселков меньшего масштаба нет возможности учесть все эти факторы, остается использовать статистический подход к данному вопросу. А посему абстрактно верные утверждения коллектива авторов статьи [6] на поверку оказываются абсолютно пустыми сентенциями, не имеющими никакого отношения к решению поставленной задачи.

О чем говорит статистика? Условие избыточного давления на ударной волне, необходимого для массового разбития оконных стекол, прямо и непосредственно определяет масштаб взрыва, и это очевидно априори, без всяких расчетов, по основным законам возникновения и распространения ударных волн. В модуль расчета взрывов и столкновений [4], использованный в расчетной процедуре, заложены комментарии, из которых следует, что массово окна начинают разбиваться при перепаде около 7 кПа. Известно, что «в соответствии с российскими строительными нормами временное сопротивление избыточному взрывному давлению остекленных конструкций не должно превышать 5 кПа» [24]. В соответствии с пособием МЧС России, разрушение остекления оконных проемов происходит при избыточном давлении 5...8 кПа [25]. Однако есть сообщение [26] о том, что почти все обычные стекла могут быть разбиты при перепаде давления на волне ~2 кПа со ссылкой на источник [27], где, впрочем, эти данные отсутствуют. К этому следует добавить, что по данным фундаментальной многотомной «Физики взрыва» [28] избыточное давление в падающей ударной волне, необходимое для выбивания стекол, составляет 3,5...7 кПа, а согласно экспериментальным исследованиям 60-летней давности «возможны случаи разбития плохо закрепленных стекол» при 0,5...0,8 кПа [29]. Таким образом, перепад давления 5 кПа в первом приближении можно считать границей массового разбития оконных стекол.

Снова процитируем Приложение к статье [6]: «Эти величины (избыточного давления. — Ю. Л.) не отличаются для окон России (большая часть подверженных удару зданий построена в XX столетии) и окон, расположенных в других местах. Гласстоун и Долан [30] оценивают перепад, необходимый для существенного разбития стекол примерно на уровне 3,5...5,0 кПа. Согласно Мэннену и Лизу [31], перепад давления $\Delta p \sim 0,7$ кПа способен привести к разрушению 5 % стекол, $\Delta p \sim 1,4$ кПа — к 50 %, а $\Delta p \sim 3,5$ кПа вызывает разрушение примерно 90 % оконных стекол».

Адекватность применения к рассматриваемой ситуации данных С. Мэннена и Ф. Лиза рассмотрим ниже, а сначала остановимся на выводе из процитированных данных, который иначе как парадоксальным назвать нельзя: «Это позволяет утверждать, что величина $\Delta p \sim 0,5$ кПа соответствует разрушению отдельных окон, а величина

$\Delta p \sim 1$ кПа приведет к их значительным разрушениям». Хотелось бы увидеть в процитированном ранее отрывке текста из источника [31] этот перепад давления — 0,5 кПа, но сколько автор в него ни всматривался, сделать это ему так и не удалось. Справедливости ради сто́ит указать, что в неизвестном авторам статьи [6] источнике [29], как было отмечено выше, все же говорится об уровне давления на ударной волне 0,5 кПа и несколько большем *как о крайнем нижнем пределе разбития некоторых плохо закрепленных стекол*, однако за прошедшие с тех пор 60 лет технология закрепления стекол на пространствах бывшего Советского Союза, кажется, все же несколько усовершенствовалась.

Итак, по С. Гласстоуну и П. Долану «существенные», что можно интерпретировать достаточно вольно, и даже не «массовые» разбития стекол происходят при избыточном давлении на ударной волне в 3,5...5 кПа, что, пожалуй, вполне согласуется со всеми приведенными выше источниками, кроме [31]. Однако С. Мэннен и Ф. Лиз явно выбиваются из общего ряда, и только их данные, причем без всяких объяснений, еще дополнительно уменьшенные в 1,5 раза, используются в статье [6]. При этом вопрос, почему С. Мэннен и Ф. Лиз заявляют уровни разрушающего стекла давления значительно ниже, чем в любых других источниках, решается совершенно элементарно. Эти данные приводятся в третьем, уже посмертном для Ф. Лиза издании известной на Западе книги по предотвращению катастрофических ситуаций в промышленности. И сам Ф. Лиз, да и С. Мэннен — редактор третьего издания книги, на которое ссылаются в Приложении к статье [6], были инженерами-химиками на крупных нефтехимических производствах. И у них речь идет о воздействии локальных взрывов внутри помещений, скорее всего, объемных, так как именно такие условия создаются при утечках и взрывах нефтехимических продуктов.

Это совершенно явно следует из пассажа «... $\Delta p \sim 3,5$ кПа вызывает разрушение 90 % оконных стекол». В случае внутреннего взрыва стекла вылетают на все четыре стороны более или менее одинаково, и легко представить даже стопроцентное разбитие стекол при совершенно целых стенах. Если же достаточно сильная внешняя ударная волна от удаленного источника набегает на здание с одной стороны и не разрушает его полностью, то ни о каких 90 % выбитых стекол, даже при большом значении Δp , говорить не приходится. Эта волна может выбить все стекла на фронтальной стороне здания и некоторое количество на боковых его сторонах, т. е. всего максимум 30...40 % (на тыльной стороне здания стекла должны остаться в основном целыми). Таким образом, против большого набора разнообразных источников по воздействию внешней ударной волны на стекла исполь-

зуюется один источник, относящийся к совершенно иному явлению — внутреннему объемному взрыву. И даже его данные по давлению — 90 % при 3,5 кПа (т. е. максимум 30...40 % при внешнем «одностороннем» воздействии), и 5 % при 0,7 кПа (т. е. 5/4, или ~1 %, при внешнем воздействии) сильно занижаются. И сколько тогда будет при 0,5 кПа — не получится ли при экстраполяции отрицательное значение?

Ниже приводятся реальные данные о разбитых и не разбитых низковысотными термоядерными взрывами стеклах при уровне перепада давления на ударной волне порядка 0,5...2,0 кПа. В центральном поселке ядерщиков-испытателей архипелага Новая Земля — Белушья Губа при взрыве Царь-бомбы и перепаде на ударной волне 1 кПа все стекла были совершенно целы. В аналогичном пункте «М» Семипалатинского полигона (ныне г. Курчатова) при избыточном давлении не ниже 1,5 кПа после взрыва РДС-37 также неизвестно о разбитых стеклах, хотя в окрестных казахских аулах при несколько бóльших уровнях давления подобные казусы происходили (см. далее).

Тем не менее авторы статьи [6] приняли перепад 0,5 кПа в качестве границы разбития стекол. Из него вывели, причем, как показано ниже, с очень грубой 30-кратной (!) ошибкой, уровень энергии взрыва Челябинского метеороида, чтобы получить нужное им (не вполне понятно, по каким соображениям) значение — не более 300 кт. И при этом они все равно не смогли «дотянуть» границу зоны разрушения до некоторых населенных пунктов с разбитыми стеклами. После всего, что описано выше, видимо, уже не сто́ит и упоминать о том, что при имевшей место траектории полета метеороида из 300 кт (или все же из 500 кт?) исходной кинетической энергии на сам взрыв осталось бы только около 100...150 кт.

Надо сказать, что после вполне определенных результатов, изложенных в работе [5], из которых следует, что уровень избыточного давления на ударной волне в районе Челябинского цинкового завода при взрыве метеороида составил 7...8 кПа, — по крайней мере, для этого инцидента данный вопрос значительно утратил остроту и актуальность, так как эти данные окончательно расставили все по своим местам [2, 3]. Разрушенное здание склада этого завода, рухнувшая несущая стальная балка, еще несколько погнутых стальных балок и вырванная с фасада строительная обшивка в расположенном неподалеку ледовом дворце «Уральская молния», а также выбитые ударной волной несколько ворот в городах Челябинске и Южно-Уральске [1] служат наглядной демонстрацией достоверности этих оценок из источника [5].

Расчет избыточного давления на ударной волне. Определим расчетный перепад давления на ударной волне. Есть огромные рас-

хождения в результатах вычислений [1–3, 6], и следует определить, какой из расчетов соответствует реальности. Прежде всего удостоверимся, что метод расчета [1–3] приводит к адекватным данным. Для этого проведем с его помощью вычисления давления на ударной волне в тех нескольких случаях, когда об этом параметре имеются достаточно определенные экспериментальные данные.

Верификация используемого метода путем расчетов параметров трех термоядерных взрывов. Как уже упоминалось ранее, физическая природа взрыва имеет несущественное значение в формировании и развитии вызванной им ударной волны [14]. Под взрывом здесь следует понимать любое выделение немалого количества энергии за время, существенно меньшее, чем характерное время вызванного им процесса распространения возмущений в ближней области сплошной среды, окружающей зону процесса. Если условия, при которых происходят взрывы, одинаковы, то и возмущения (ударные волны) распространяются от них в атмосфере практически одинаково, независимо от того, был ли взрыв термоядерным или он вызван входом в атмосферу небесного тела либо взрывным извержением вулкана. Этому способствует также упрощенное — «точечное» и «квазистатическое» рассмотрение взрывного распада небесных тел в программном модуле расчета воздушных взрывов таких объектов [4], которое в данной ситуации оказывается уже не недостатком, а своеобразным достоинством, позволяя оценивать с его помощью результаты воздействия на подстилающую поверхность любых «воздушных» взрывов — от термоядерных до вулканических. Необходимо только рассчитать вход в атмосферу некоего «виртуального метеороида», распад которого приводит к взрыву с заданной энергией на заданной высоте. Этот простой приближенный полуэмпирический модуль с помощью метода «виртуальных метеороидов» можно использовать для оценок влияния на подстилающую поверхность взрывов любой природы при условии, что дистанция, на которой происходит оценка, много больше размера взрывающегося объекта.

Используя результаты, ранее полученные в работах [3, 14], а также данные расчетов, специально проведенных для верификации метода, рассмотрим шесть реально случившихся событий: взрыв вулкана Кракатау, падения Челябинского и Тунгусского метеороидов и три взрыва термоядерных устройств. К последним относятся: АН602 (Царь-бомба), РС-37 (первый советский двухступенчатый термоядерный заряд, ставший прародителем всего ядерного вооружения СССР и России), а также его американский аналог (с точки зрения конструкции, но не его важности для американского ядерного вооружения) — термоядерный заряд Квеста, о взрыве которого автору стало известно несколько больше, чем о других американских взры-

вах такого же уровня мощности. При этом его энергия была близка к значениям энергии взрыва Челябинского метеороида, которые ему приписывает сейчас большинство исследователей. Два рассмотренных советских термоядерных устройства были «культовыми» для представителей советской атомной промышленности, и поэтому, несмотря на секретность первичных материалов по этим боезарядам, существует большое количество открытых источников, из которых можно получить всю информацию, необходимую для проведения верификации метода, описанного в статьях [1–3, 14].

Помимо того что имеются данные о разрушениях (или об их отсутствии) при взрывах этих трех термоядерных зарядов, позволяющие оценить уровни давления на ударной волне в некоторых точках земной поверхности, для их оценки, как и для любых крупных низковысотных взрывов, можно использовать так называемую формулу Садовского. Она является интерполяцией по параметру подобия — приведенному радиусу ξ , экспериментальным данным, полученным, в том числе и при таких взрывах, и апробированным и широко признанным способом определения избыточного давления на ударной волне от взрыва [28]:

$$\Delta p = a\xi^{-1} + b\xi^{-2} + c\xi^{-3}, \quad (1)$$

$$\xi = RE_e^{-1/3}, \quad (2)$$

где Δp — избыточное давление на ударной волне от взрыва с энергией E_e в тротиловом эквиваленте (т. е. по существу E_e — это эквивалентная масса тротила) в некоторой точке; R — расстояние от центра взрыва до этой точки; a , b и c — эмпирические коэффициенты.

Формула справедлива для взрывов в однородной атмосфере. Характерный масштаб неоднородности земной атмосферы по вертикали принят порядка 8 км [28], поэтому, строго говоря, для особо мощных взрывов, таких, как, например, взрыв вулкана Кракатау (Индонезия, 26 августа 1883 г.), формулу применять, по-видимому, уже нельзя. Высота взрыва H в представленном здесь варианте формулы может влиять на результат только через увеличение радиуса R по сравнению с расстоянием от эпицентра L , что при низковысотных взрывах вполне можно учесть по теореме Пифагора, не принимая во внимание кривизну поверхности Земли. Несмотря на все эти ограничения в применимости, приближенное выражение (1) сразу позволяет выявить существенные ошибки в более сложных и изошренных расчетах, если таковые имеют место.

Значения коэффициентов a , b и c получают в результате статистической обработки экспериментальных данных и корректируют по мере накопления информации. Наиболее часто встречаются значения этих коэффициентов для воздушных (сферически симметричных)

взрывов, которые были получены самим М. А. Садовским по экспериментам с тротилом: $a = 84$, $b = 270$, $c = 700$, при этом масса заряда измерялась в килограммах, радиус — в метрах, давление — в килопаскалях (при наличии «энергии» E_e давление измерялось в мегатоннах тротилового эквивалента, радиус R — в километрах). Указанные значения коэффициентов определялись при $1 < \xi < 10$ (размерность ξ — $\text{м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$ или $\text{км} \cdot \text{Мт}^{-1/3}$), т. е. примерно, при $1 \text{ МПа} > \Delta p > \sim 10 \text{ кПа}$, что соответствует избыточному давлению в основной зоне разрушений зданий и сооружений, наиболее важной для военной теории и практики.

Однако такое давление значительно выше интересующего нас в связи с рассмотрением статистики по разбитию стекол. Поэтому целесообразно получить эмпирические коэффициенты a , b и c в диапазоне давления $8 \text{ кПа} > \Delta p > 0,3 \text{ кПа}$. Кроме того, нас интересуют термоядерные взрывы, а в них на создание ударной волны идет только около половины энергии. Следовательно, значения коэффициентов в формуле (1) должны быть уменьшены соответствующим образом, для того чтобы учесть это обстоятельство [32]. Но при таких значениях ξ взрыв становится уже фактически не воздушным, а наземным, так как его энергия распространяется только в полупространстве, ограниченном снизу земной поверхностью. Вследствие этого обстоятельства значения коэффициентов в формуле (1) должны быть увеличены, чтобы соответствовать практически удвоенной энергии взрыва [28, 32]. В итоге получается, что интересующие нас эмпирические коэффициенты, необходимые для точной аппроксимации зависимости $\Delta p(\xi)$ в рассматриваемом диапазоне, в целом могут измениться не слишком значительно.

Есть также возможность приближенно учесть высоту взрыва. Для этого можно использовать так называемую обобщенную формулу Садовского [33]:

$$\Delta p = a \left(\frac{p}{p_0} \right)^{2/3} \xi^{-1} + b \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/3} \xi^{-2} + c \xi^{-3}, \quad (3)$$

где p — давление воздуха на высоте взрыва; p_0 — давление на уровне моря.

По-видимому, применимость формулы (3) к высотным взрывам в атмосфере серьезно не проверялась, но для более точных оценок низковысотных взрывов ее вполне можно использовать.

В связи со всеми этими обстоятельствами было проведено сопоставление расчетных данных, полученных методом «виртуальных метеороидов» с аппроксимациями по формуле Садовского. Сравнение проводилось с помощью метода наименьших квадратов в девяти

точках — по три на каждый из трех указанных выше термоядерных боезарядов. Сначала использовалась формула (1) с коэффициентами для воздушного взрыва тротила, указанными выше. Было найдено, что среднеквадратичное значение отклонения давления, вычисленное этими двумя способами, составило около 12,5 % (при этом следует отметить, что формула Садовского использовалась за пределами области ее применимости).

В последующих расчетах была применена формула (3) для учета высоты взрывов и найдены эмпирические коэффициенты a , b и c , наилучшим образом аппроксимирующие результаты метода «виртуальных метеороидов». Давление на высоте взрыва определено с помощью интерактивного калькулятора стандартной атмосферы [34]. При этом среднеквадратичное отклонение результатов уменьшилось почти в 2 раза — до 6,5 %, а значения эмпирических коэффициентов в диапазоне $15 < \xi < 300$ (~ 8 кПа $> p > 0,3$ кПа) оказались следующими: $a = 86,5$, $b = 285$, $c = 4900$, т. е. параметры a и b изменились весьма незначительно, и только коэффициент c , который в этом диапазоне параметров в наименьшей степени влияет на результат, заметно увеличился. Однако значения давления изменились не более чем на несколько процентов, что видно хотя бы из сопоставления среднеквадратичных отклонений в этих двух рассмотренных вариантах вычислений.

Строки в табл. 1 с данными о давлении на скачке расположены попарно — первая из пары соответствует расчету давлений по методу «виртуальных метеороидов» на основе интерактивного программного модуля [4], вторая (выделенная курсивом) — оценке по обобщенной формуле Садовского (3) с коэффициентами, значения которых приведены в предыдущем абзаце.

Таблица 1

Значения энергии и максимального давления на ударной волне для трех термоядерных взрывов

Вариант расчета	Энергия взрыва E_v , Мг	Высота взрыва H , км	Удаление L_1 , км	Перепад давления p_1 , кПа	Удаление L_2 , км	Перепад давления p_2 , кПа	Удаление L_3 , км	Перепад давления p_3 , кПа
РДС-37-1	1,6	1,55	54,5	1,7	61,5	1,5	175	0,48
<i>РДС-37-2</i>				<i>1,8</i>		<i>1,6</i>		<i>0,52</i>
Квеста-1	0,67	1,60	24	3,5	47,5	1,6	55	1,3
<i>Квеста-2</i>				<i>3,4</i>		<i>1,5</i>		<i>1,3</i>
АН602-1	58,0	4,20	53,5	7,5	267	1,0	810	0,33
<i>АН602-2</i>				<i>7,5</i>		<i>0,95</i>		<i>0,30</i>

Из вышеизложенного следует, что любой адекватный ситуации вариант формулы Садовского в рассматриваемом диапазоне давле-

ний $0,3 \text{ кПа} < \Delta p < 8 \text{ кПа}$ приводит к рассогласованию с расчетами по методу «виртуальных метеороидов» в пределах 10 %. Наилучшее согласование, естественно, было получено тогда, когда аппроксимационные коэффициенты вычислялись по данным той же области, в которой и производилось сравнение, но различия результатов обоих вариантов невелики.

Кроме всего прочего дистанции от эпицентра взрыва, указанные в табл. 1, до почти всех рассматриваемых там точек (за исключением одной крайней точки Квесты) являются такими, что в них можно сделать оценки избыточного давления на ударной волне по имеющимся экспериментальным данным. Кратко их опишем ниже.

РДС-37 (координаты взрыва в точке П-5 опытного поля — $50,53^\circ$ с. ш., $77,75^\circ$ в. д. [35, 36]).

1. Дистанция 54,5 км — это расстояние от точки П-5 до пос. Майский, в котором получили ранения осколками стекол часть из 26 человек, пострадавших при взрыве в этом и в соседних несколько более удаленных (до 57 км) населенных пунктах [36]. В домах казахских аулов в то время, по всей видимости, были недостаточно хорошо закреплены оконные стекла, к тому же недорогие и очень тонкие, которые могли разбиться при перепаде давления на ударной волне в $1,7 \dots 1,8 \text{ кПа}$ и поранить этих людей, не знавших о случившемся.

2. Дистанция 61,5 км — расстояние от эпицентра взрыва до пункта «М» (места базирования участников испытаний, ныне г. Курчатов). Там при перепаде давления $1,5 \dots 1,6 \text{ кПа}$ не было ни одного раненого, но отмечены повреждения элементов зданий [36].

3. Дистанция 175 км — расстояние до западных окраин Семипалатинска (ныне г. Семей). Там, по сообщениям местных властей, также были разбиты стекла и 16 человек получили ранения [36]. Как следует из источника [29], при соответствующем состоянии городского хозяйства такое, видимо, все-таки возможно, даже при перепаде давления около $0,5 \text{ кПа}$.

Квеста (координаты точки взрыва — примерно $1,47^\circ$ с. ш., $157,20^\circ$ з. д. [37]).

1. Дистанция 24 км — это расстояние от эпицентра взрыва до ближайшей точки побережья о-ва Рождества (ныне о-в Киритимати). При уровне перепада давления на ударной волне $3,5 \text{ кПа}$ можно было не ожидать какого-либо заметного ущерба кустарникам и зарослям суриана во внутренних лагунах острова на этом побережье.

2. Дистанция $47,5 \dots 55 \text{ км}$ — это расстояние до места сбора участников этого эксперимента на аэродроме на северном берегу острова, состояние которых в тот момент изображено на фотографиях, представленных в источнике [38]. Оно вполне соответствовало уровню избыточного давления — около $1,3 \dots 1,6 \text{ кПа}$: все спокойно

сидят или крепко стоят на ногах и ничего необычного не испытывают, наблюдая за взрывом. Отметим, что в Челябинске при стратосферном взрыве якобы вдвое меньшей мощности и примерно аналогичном расстоянии от центра взрыва до центра города оказалось более 1600 раненых [6]. При этом если бы Квеста взорвалась на высоте 28,2 км, как Челябинский метеороид, то максимальное давление на этом расстоянии было бы близко к 0,2 кПа.

АН602 (координаты точки взрыва на площадке Д-2 Новоземельского испытательного полигона — 73,85° с. ш., 54,50° в. д. [13]).

1. Дистанция 53,5 км — это расстояние от эпицентра взрыва до пос. Лагерный (около 73,39° с. ш., 54,74° в. д.), который был построен летом 1955 г. на южном берегу пролива Маточкин Шар для переселения туда всех охотников-промысловиков архипелага Новая Земля в связи с открытием Новоземельского испытательного полигона [29]. К осени 1961 г. все жители поселка были эвакуированы, а сам поселок, застроенный стандартными щитовыми домиками, полностью разрушен при испытаниях 30 октября 1961 г. боезаряда АН602.



Рис. 3. Окрестности пос. Северный на южном берегу пролива Маточкин Шар

«Остались стоять лишь только кирпичные трубы да баня, построенная шахтерами еще в 1959 году из толстых бревен, на берегу речушки Шумилихи» [39]. Потом на этом месте был заново выстроен пос. Северный (рис. 3) [40]. Казалось бы, что расчетный перепад дав-

ления на ударной волне около 7,5 кПа совершенно не соответствует наблюдавшимся при взрыве разрушениям. И это действительно так (хотя при таком же давлении на фронте волны в Челябинске все же произошли разрушения некоторых крупных сооружений).

Ширина пролива Маточкин Шар составляет здесь несколько более 2 км. С обеих сторон он окружен горами высотой не менее 600–700 м. На запад от поселка (см. рис. 3) горный хребет прорезает узкая и длинная долина р. Шумилихи (осыпи, перекрывающей долину поперек и расположенной в центре изображения, тогда еще не существовало, она возникла позднее в результате подземного термоядерного испытания). Южный берег пролива в устье реки практически перпендикулярен направлению распространения ударной волны от взрыва заряда АН602. Прямая ударная волна от низковысотного взрыва на северном склоне берега пролива развернулась, стала косой, и тут же вынужденно отразилась от водной поверхности, снова образовав прямую маховскую ножку [41], а выше — лидирующую косую ударную волну. Эта косая волна должна была приблизительно по нормали отразиться от склонов южного берега пролива, создавая интерференцию набегающих и отраженных от его склонов ударных волн. Более того, косое отражение этих волн от западного склона долины р. Шумилихи (см. рис. 3) с переотражением от ее восточного склона должно было свести вместе ударные волны к побережью в окрестности ее устья. Поэтому реальное давление при этой мешанине падающих, отраженных и переотраженных ударных волн могло в несколько раз превышать номинальный уровень перепада давления в набегающей волне.

Можно здесь указать также на то, что даже для существенно более простого случая интерференции стационарных ударных волн, образующих так называемый мостообразный скачок уплотнения — структуру, состоящую из двух зеркально отраженных скачков уплотнения с маховскими ножками, было получено шести-семикратное увеличение давления [42]. Приблизительно треугольная в поперечном сечении долина р. Шумилихи вызывает у автора настоящей статьи определенные ассоциации с аэродинамической структурой, в которой мог быть реализован мостообразный скачок. Похоже, что на рис. 3 мы видим самое худшее место из всех возможных мест для строительства поселка на о-ве Южном архипелага Новая Земля при осуществлении воздушных термоядерных взрывов на площадке Д-2 (не считая, конечно, самой площадки), так как уровень давления в 30...40 кПа, который вполне можно было ожидать в этом месте из-за интерференции волн от очень мощных взрывов, плохо способствует сохранению там обычных жилых домов, а не капониров. Только по-

сле перехода на полигоне исключительно к подземным взрывам здесь снова можно было начать строительство нового поселка.

2. Дистанция 267 км — расстояние от эпицентра взрыва АН602 до главного населенного пункта Новоземельского испытательного полигона — пос. Белушья Губа и соседнего аэродрома Рогачёво. «В Белушье и Рогачёве все было нормально. В этих гарнизонах и на кораблях никто не пострадал (при номинальном перепаде давления около 1 кПа это было и не удивительно. — Ю. Л.), но от стрессовых состояний при взрыве несколько человек были госпитализированы» [39].

3. Дистанция 810 км — расстояние до о-ва Диксон и поселка на нем. «С Диксона ... пост доложил, что взрыв был виден, и внезапно до них дошла небольшой силы воздушная ударная волна, в нескольких домах потрескались оконные стекла. Через день восстановительная партия вставила все оконные стекла — даже те, которые были выбиты раньше, до испытаний» [39]. Расчетный перепад давления на ударной волне составил около 0,3...0,35 кПа (см. табл. 1), что ниже нижнего предела разбития стекол. Возможно, какие-то особенности местной топографии или строительного искусства способствовали увеличению давления на волне до этого нижнего предела или, по крайней мере, до того уровня, чтобы стекла могли «потрескаться». Но, скорее всего, на Диксоне просто воспользовались нештатной ситуацией для проведения внепланового ремонта окон за счет ядерного полигона.

В целом по рассмотренным данным о мощных низковысотных термоядерных взрывах можно сделать вывод о том, что используемый алгоритм [4] приводит к вполне адекватным результатам, хорошо согласующимся с оценками как по формуле Садовского, так и с наблюдавшимися в реальности эффектами.

Верификация используемого метода путем расчетов параметров трех природных инцидентов. Рассмотрим три природные катастрофы — тепловые взрывы вулкана Кракатау и Тунгусского (в табл. 2 — ТМ) и Челябинского (в табл. 2 — ЧМ) метеороидов.

Коэффициенты в обобщенной формуле Садовского (3) были получены при аппроксимации данных по низковысотным взрывам, поэтому на больших высотах погрешности при ее использовании могут быть велики, да и многие расчетные точки, рассмотренные ниже, лежат за пределами ее применимости при используемых эмпирических коэффициентах. Поэтому просто сравним полученные расчетные результаты с наблюдаемыми. Данные табл. 2 аналогичны представленным в табл. 1.

**Значения энергии и максимального давления на ударной волне
для трех природных катастроф**

Вариант расчета	Энергия взрыва E_e , Мт	Высота взрыва H , км	Удаление L_1 , км	Перепад давления p_1 , кПа	Удаление L_2 , км	Перепад давления p_2 , кПа	Удаление L_3 , км	Перепад давления p_3 , кПа
Кракатау	1090	1,50	50	30,0	130	6,5	155	5,1
ТМ	14,4	8,25	20		30	15,2	64	4,9
ЧМ	56,8	28,2	0	11,1	39,5	7,5	80	5,0

Кракатау (координаты точки взрыва — $6,10^\circ$ с. ш., $105,42^\circ$ в. д. [43]).

1. Дистанция 50 км — это расстояние от эпицентра взрыва до границы сплошного лесоповала на ровной местности в джунглях на обоих берегах Зондского пролива [14], т. е. до достижения уровня избыточного давления на ударной волне 30 кПа.

2. Дистанция 130 км — расстояние до зоны разбития почти всех стекол и повреждения крыш и дверей хижин в окрестностях Батавии — столицы Голландской Ост-Индии [14] (ныне г. Джакарта).

3. Дистанция 155 км — расстояние до европейского сэттльмента Батавии, в котором многие стекла были разбиты [14], что соответствует уровню избыточного давления около 5 кПа.

Отметим, что одновременное использование в расчетах трех дистанций до некоторых уровней перепада давления на ударной волне, которые сами по себе были получены, естественно, с определенным допуском, приводит к перекрестному контролю точности их определения. Кроме того, адекватность полученных результатов по вулкану Кракатау подтверждают и акустические оценки [14].

Тунгусский метеороид (координаты точки взрыва — $60,89^\circ$ с. ш., $101,90^\circ$ в. д. [1–3]).

1. Дистанция 20 км — это расстояние от эпицентра взрыва до границы сплошного лесоповала на равнине в тайге [1], т. е. до достижения уровня перепада давления на ударной волне 30 кПа.

2. Дистанция 30 км — примерное расстояние до стоянки двух братьев-эвенков, о которых стало известно исследователям Тунгусского феномена. По свидетельствам охотников, ударная волна разрушила чум, их повалила на землю, и заваленные остатками чума они слышали, «как леса падали» [44]. Известно, что уровень давления 15 кПа — «граница района многочисленных травм от падения» и повала «около 30 % деревьев» [26]. Как правило, охотники-таежники умеют падать, и вообще они подготовлены к подобным неожиданностям в отличие от жителей городов, поэтому даже падение одного из братьев в зажженный очаг к серьезным травмам и ожогам не могло привести, несмотря на то что «деревья вокруг горели».

3. Дистанция 63,5...64 км — расстояние до ближайшего к эпицентру взрыва населенного пункта фактории Ванавара. Очевидцы, жители Ванавары, сообщали следующее: «Потом оказалось, что многие стекла в окнах выбиты» [44]. Это свидетельствует об уровне перепада давления на ударной волне около 5 кПа, что согласуется с расчетными значениями.

Кроме того, для этого инцидента существует хорошее согласование расчетной энергии взрыва метеороида $E_e = 14,4$ Мт [2, 3] с данными, полученными по сейсмограммам и барограммам соответственно: $E_e = (12,5 \pm 2,5)$ Мт; $E_e = (12 \pm 2,5)$ Мт [45], а также по высоте взрыва — 8,25 км [2, 3] и 8,5 км [46].

Челябинский метеороид (координаты точки взрыва — 54,87° с. ш., 61,20° в. д.) отличается от ранее рассмотренных случаев большой высотой взрыва, произошедшего в стратосфере, обусловившей качественные отличия по воздействию на подстилающую поверхность до тех пор, пока отражение ударной волны от нее не станет маховским [2, 3].

1. Дистанция 0 соответствует точке на земной поверхности непосредственно под центром взрыва. Недалеко от нее расположен пос. Первомайский, подавляющее количество домов в котором, даже многоэтажных, судя по спутниковым фотографиям, имеют двух- или четырехскатные, а не плоские крыши. В этом случае реальное давление на этих крышах от взрыва почти в зените значительно уменьшается по сравнению с номинальным расчетным значением, равным примерно 11 кПа (см. табл. 2). Несколько домов поселка, у которых плоские крыши, также выдержали этот перепад давления, что неудивительно, поскольку только расчетная снеговая нагрузка на плоскую крышу для III–IV снеговых районов, характерных для Челябинской области, при типичном для строительства коэффициенте запаса, равном 3, составляет 5,4...7,2 кПа [47]. Вследствие того что ударная волна в районе эпицентра в целом двигалась сверху вниз параллельно стенам, избыточное давление на них было значительно меньше номинального, и количество разбитых стекол там не могло быть чрезмерно велико [2, 3], что и наблюдалось в реальности [6].

2. Дистанция 39,5 км — расстояние до Челябинского цинкового завода, в окрестностях которого перепад давления на ударной волне составил $(7,5 \pm 0,5)$ кПа [5]. На такой дистанции уже реализовалось маховское отражение, которое превратило косую волну у земли в прямую, как у низковысотных взрывов. Именно это позволяет использовать данные по разбитым стеклам из района завода для сравнения с данными от низковысотных термоядерных взрывов [2, 3].

3. Дистанция 80 км — радиус, при котором площадь эквивалентной круговой зоны приблизительно равна площади реальной зоны разбития стекол в значительных количествах [2, 3].

Акустические оценки также подтверждают значения энергий взрывов обоих рассмотренных метеороидов [14].

Итак, анализ шести катастрофических инцидентов показал, что модуль расчета воздушных взрывов [4], несмотря на упрощенность используемой в нем модели явления, описывает их вполне адекватно и с приемлемой степенью точности, поэтому он может использоваться для оценки адекватности результатов, полученных другими методами.

Демонстрация неадекватности расчета параметров взрыва Челябинского метеороида гидродинамическим кодом SOVA. Используем метод, описанный в работе [4], для того чтобы понять, насколько результаты расчетов с помощью численного гидродинамического кода SOVA [48], применяемого в работе [6], соответствуют реальности. В табл. 3 приведены расчеты варианта взрыва Челябинского метеороида в представлении авторов работы [6] — выделение энергии, равной 300 кт в тротиловом эквиваленте, в точке на высоте 31,7 км (Case 300-1). Вариант такого же взрыва, рассчитанный методом «виртуальных метеороидов», показан под аналогичным индексом, только оканчивающимся цифрой 2 — Case 300-2. Несмотря на заведомую неточность использования формулы (3) для взрыва на такой большой высоте, приведены также и результаты расчета варианта (Case 300-3) по обобщенной формуле Садовского с коэффициентами для воздушного взрыва, соответствующими двойному уменьшению номинальной энергии, вызывающей ударные волны, вследствие удвоения объема, в котором они распространяются [28]: $a = 68,5$, $b = 180$, $c = 2450$. Дистанция $L_1 = 0$ соответствует эпицентру взрыва, $L_2 = 25$ км и $L_3 = 50$ км.

Таблица 3

Сравнение результатов газодинамического кода SOVA и приближенных расчетов

Вариант расчета	Энергия взрыва E_e , Мт	Высота взрыва H , км	Перепад давления, кПа		
			p_1 при L_1	p_2 при L_2	p_3 при L_3
Case 300-1	300	31,7	2,6	2,1	0,95
Case 300-2			0,086	0,082	0,077
Case 300-3			0,10	0,070	0,042
Case 300-4		0	–	2,0	0,96
Case 500	500	29,5	0,18	0,11	0,065

Сравнение вариантов, рассчитанных для высоты взрыва 31,7 км, показывает, что перепады давления на ударной волне, полученные с помощью численного кода SOVA, приводят к завышению этого параметра в 12–30 раз. Расхождения между двумя другими приближенными методами составляют в разных точках от 15 до 45 %, что вполне ожидаемо. Тем более что на больших удалениях, по формуле Садовского, надо возвращаться к коэффициентам, вычисляемым для

распространения волны в полупространстве, тогда значение расчетной величины p_3 приблизится к 0,57 кПа, и расхождения приближенных данных уменьшатся почти до 25 %. В целом расчет по формуле (3) подтверждает уровни давления, полученные методом «виртуальных метеороидов». Значение избыточного давления на ударной волне, рассчитанное с помощью кода SOVA, можно получить по формуле Садовского только при нулевой высоте взрыва (см. вариант Case 300-4). Другие варианты взрывов метеороида, представленные в работе [6], отличаются распределением энергии по траектории, что влияет на форму пятна зоны разрушений, но не на уровень давления, который остается близким к значениям из варианта Case 300-1. А ведь не только по формулам, но и из практики известно, что при высотах взрыва уже около 40 км «ударная волна почти не образуется» [28].

Более того, существует явление, называемое прорывом атмосферы. В неоднородной атмосфере ударная волна при движении вверх, в сторону резкого снижения плотности, не тормозится, а даже ускоряется, уходя вверх на «бесконечность» за конечное время и «прорывая» атмосферу. Из огромной чашеобразной полости, образованной взрывом, воздух буквально вытекает в космос, а в самой полости давление падает почти до нуля и движение ударной волны вниз прекращается [49]. Все это происходит, когда избыточное давление на ударной волне на длине характерной неоднородности атмосферы (около 8 км для Земли) на два порядка превышает атмосферное на уровне взрыва. При этом вниз волна успевает пройти до момента прорыва атмосферы сверху на расстояние порядка двух длин характерной неоднородности [49]. Основанные на этой теории оценки свидетельствуют о том, что при энергии взрыва 57 Мт, как у Челябинского метеороида, нижняя по высоте граница прорыва атмосферы находится именно на уровне 31,5...32,0 км. Так что более изощренная теория, чем простая аппроксимация эмпирических данных, показывает, что при высоте взрыва, согласно источнику [6], даже на два порядка более мощный взрыв не смог бы создать на поверхности Земли сколько-нибудь заметное избыточное давление, а то и вообще быть услышан.

Последняя в табл. 3 оценка перепада давления на ударной волне по формуле (3) — Case-500 приведена для варианта воздушного взрыва метеороида из источника [5]. Увеличение энергии взрыва до 500 кт и снижение его высоты на 2,2 км приводит к росту давления в 1,5–1,8 раза. Однако качественно ничего не изменяется, уровень возмущений остается таким же, а до избыточного давления на ударной волне, равного 7...8 кПа на расстоянии около 40 км от эпицентра [5], не хватает двух порядков.

Таким образом, наблюдаем гигантские расхождения между результатами расчетов избыточного давления при взрыве Челябинского

метеороида, представленных в статье [6], и реальностью. И поэтому все данные по энергии Челябинского метеороида в статьях [5, 6] также абсолютно мифические. Эти завышенные как минимум на 1–1,5 порядка значения расчетного избыточного давления на ударной волне в сочетании с заниженными (только в работе [6]) на 0,5–1 порядок данными по разбитым стеклам создают совершенно искаженную картину произошедшего явления, в которой энергия взрыва ниже реальной на два с лишним порядка. И на этот раз, в отличие от оценок яркости вспышки Челябинского метеороида, уже нельзя отрицать целенаправленную подгонку результатов, проведенную в работе [6] так называемым Консорциумом Челябинского воздушного взрыва под заранее заданное значение — доказательства этому, приведенные в настоящей статье, представляются совершенно непроверяемыми. В то же время в работе [5] такой явный умысел не заметен — по-видимому, необходимые оценки не были сделаны, а сделанные не осмысливались и потому оказались ошибочными.

Масса следа Челябинского метеороида. След Челябинского метеороида — еще один ценный источник информации о нем. Самое простое, что можно сделать, рассматривая фотографии следа, это оценить его массу. Сделаем это и сравним ее с оценками массы всего объекта по данным работ [5, 6].

В однородной среде в соответствии с законом Бугера ослабление направленного излучения происходит экспоненциально с безразмерным показателем экспоненты τ , называемым оптической толщиной (толщей) среды [50]. Так как в случае ослабления излучения слоем аэрозолей оптическая толщина в первом приближении линейно связана с некоторыми основными физическими параметрами составляющих его частиц, нетрудно увязать оптические и массовые характеристики этого слоя.

Оптическая толщина слоя аэрозолей τ , как известно, определяется следующим образом:

$$\tau = n\sigma D,$$

где n — концентрация частиц; σ — сечение взаимодействия частицы аэрозолей; D — толщина слоя по линии прохождения излучения.

При рассмотрении характеристик следа метеороида в оптическом диапазоне сечение взаимодействия частицы аэрозоля с характерными размерами порядка 1 мкм равно площади поперечного сечения этой частицы.

След аэрозолей, возникший за Челябинским метеороидом, как видно на фотографии, сделанной метеоспутником DMSP F-16 [51], в первом приближении по форме является коническим (рис. 4). Легко оценить количество частиц в таком следе:

$$N = \frac{\pi D^2 L n}{3},$$

где D — средний диаметр следа; L — его длина.

Тогда его масса m будет:

$$m \approx \frac{2\pi r D L d}{9}, \quad (4)$$

где ρ — средняя плотность аэрозольных частиц; d — средний диаметр частиц при условии их сферичности.

Зная, хотя бы приближенно, средние плотность и размер аэрозолей следа и оценив его оптическую толщину, по формуле (4) легко получить массу вещества, составляющего этот след.

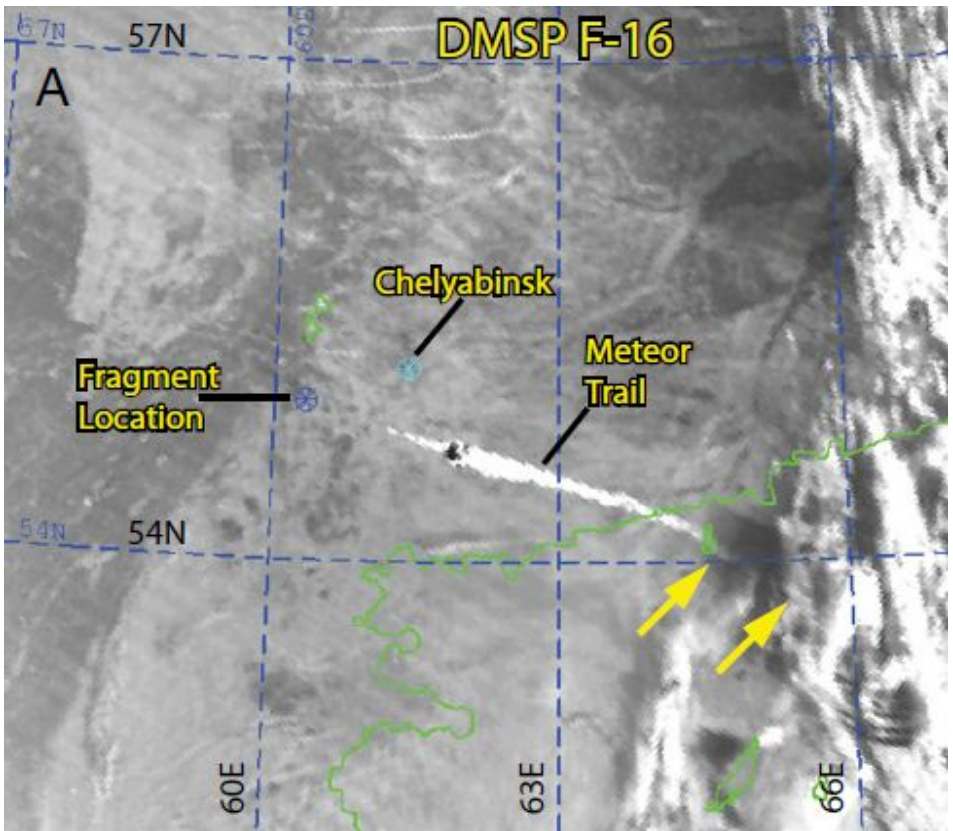


Рис. 4. След Челябинского метеороида на фотографии метеоспутника

Однако прежде чем проделать это для следа Челябинского метеороида, целесообразно верифицировать эту процедуру на следе, характеристики которого известны значительно лучше. В качестве такого объекта был выбран след, возникавший при старте многоразового космического носителя Space Shuttle (рис. 5) [52].



Рис. 5. След Space Shuttle перед отсечкой твердотопливных ускорителей

Этот след почти целиком состоял из аэрозолей, выброшенных двумя твердотопливными ускорителями SRM, которые работали от старта до высоты около 45 км. По наклону следа (см. рис. 5) в верхней точке (при отделении SRM угол наклона траектории к горизонту составляет 28°) можно заключить, что здесь запечатлен момент незадолго до отсечки ускорителей, и след виден почти полностью — от начала и практически до конца. По этой фотографии можно также заключить, что оптические характеристики следа изменяются слабо —

уменьшение плотности аэрозолей из-за расширения следа компенсируется увеличением его толщины, так что формула (4), выведенная для средних значений всех распределенных величин, вполне подходит для оценок этого следа.

Полная высота следа — 45 км, его длина вдоль криволинейной траектории $L \approx 75$ км [53], средняя толщина по рис. 5 — $D \approx 0,7$ км. Масса твердого топлива, содержащегося в двух ускорителях SRM, составляет 1,0 кт [54]. Параллельно с SRM на начальном участке траектории работали и три водородно-кислородных ракетных двигателя SSME [55]. С учетом различия тяг и удельных импульсов этих двух различных силовых установок Shuttle двигателя SSME на этом участке траектории выбрасывали в атмосферу около 0,15 кт рабочего тела, которое почти полностью состоит из паров воды с небольшим количеством водорода.

В работе [56] описан химический состав двухфазной (газовой и конденсированной) среды, выбрасываемой из сопла двигателя SRM (табл. 4). Азот, который составляет около 10 % выхлопа SRM, при данной толщине слоя прозрачен и поэтому исключается из состава веществ, ответственных за образование следа. Вместо него к веществам из выхлопа ускорителя SRM добавляются пары воды основных двигателей Space Shuttle (SS в табл. 4). В итоге полная масса аэрозолей, вброшенных из всех двигателей этого носителя на участке траектории от старта до отсечки твердотопливных ускорителей, составляла 1,05 кт, а первичный химический состав этого объединенного выхлопа приведен в табл. 4.

Таблица 4

Доли основных веществ, содержащихся в следе Space Shuttle

Вещество	Массовая доля вещества, усл. ед.			Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Объемная доля веще- ства в сле- де, усл. ед.
	В выхлопе SRM	В выхлопе SS	В следе		
Корунд	0,303	0,289	0,289	4,0	0,115
Сажа	0,111	0,106	0,106	2,25	0,075
Пары воды – SRM	0,267	0,255	–	–	–
Пары воды – SSME	–	0,143	–	–	–
Хлористый ангидрид	0,217	0,207	–	–	–
Азот	0,102	–	–	–	–
Раствор соляной кислоты	–	–	0,605	1,18	0,81
Сумма	1,000	1,000	1,000	–	1,000

Хлористый ангидрид и пары воды из выхлопа двигателей тут же образуют соляную кислоту, и массовая доля трех основных веществ следа Space Shuttle — корунда (Al_2O_3), сажи (C) и раствора соляной кислоты (HCl) в воде (H_2O) с концентрацией около 35 % приведены в

табл. 4. Объемные доли компонент следа вычисляются из массовых долей с учетом плотности вещества.

Итак, след Shuttle по объему более чем на 80 % состоит из капелек соляной кислоты, загрязненных пылью корунда и углерода. Средняя плотность этих капелек составляет около 1600 кг/м^3 . Средний размер аэрозолей выхлопов ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) при пяти вариантах рецептуры был около $0,50 \text{ мкм}$ [57]. Правда, скорее всего, эти данные приведены для баллиститных (двухосновных), а не смесевых (многоосновных), как у SRM, порохов.

Поэтому определим все параметры, входящие в формулу (4), и с ее помощью оценим возможные границы их вариаций. Для этого осталось найти уровень оптической толщины (толщи) следа выхлопа системы Space Shuttle. Рассмотрим еще одну фотографию его старта на фоне облачности (рис. 6) [58].



Рис. 6. След Space Shuttle на фоне облачности

Типичная оптическая толщина облаков над сушей — 30, над морем — 20 [50]. Стартовая позиция Shuttle расположена на морском берегу (США, шт. Флорида, м. Канаверал). Видно, что след — в гуще облака, поэтому его оптическую толщину можно оценить не менее чем в 25...30. Можно сделать и другую оценку — след вполне сопо-

ставим с густым туманом, для которого средняя дальность видимости составляет около 0,1 км, что соответствует показателю рассеяния $\sigma_p = 39 \text{ км}^{-1}$ [59]. При средней толщине струи 0,7 км и таком показателе рассеяния ее оптическая толщина получается равной примерно 27,5, что практически не отличается от сделанной выше оценки. Тогда из формулы (4) следует, что средний размер d -аэрозолей составляет 0,65 мкм. Это очень неплохо согласуется с оценкой из источника [57], тогда как при $d = 0,50$ мкм средняя оптическая толщина рассматриваемой струи была бы равна примерно 35. Таким образом, можно заключить, что параметры аэрозолей ракетной струи могут быть оценены через ее оптические характеристики буквально «на глаз» с точностью не ниже 20...30 %.

Опираясь на полученную информацию, перейдем к рассмотрению следа Челябинского метеороида. Имеются фотоснимки на просвет лучами Солнца его и только что рассмотренного выше следа Shuttle (рис. 7–9).



Рис. 7. Тень от следа Space Shuttle

Известное фото на рис. 7 демонстрирует довольно густую тень от следа Shuttle, которая проецируется на заходе Солнца прямо на Луну [60]. А про след Челябинского метеороида (рис. 8 [61]) можно только сказать, что он был поистине роскошен.



Рис. 8. След Челябинского метеороида при виде с Земли

Однако аналогичное просвечивание следа Челябинского метеороида на восходе Солнца явно свидетельствует о том, что его оптическая толщина (рис. 9 [62]) на самом деле очень невелика и многократно ниже, чем у следа Space Shuttle. Правда, при этом он превосходит последний на половину порядка по длине и на порядок с лишним по поперечным размерам.



Рис. 9. Тень от следа Челябинского метеороида

Принимая во внимание участок следа, образовавшийся уже после взрыва, его длину можно оценить на 10 км больше, чем длина от начала и до точки взрыва, составившая около 210 км [51]. Средняя ширина следа (см. рис. 4) была около 10 км. Так как он был образован силикатной (хондритной) пылью, то плотность этих пылинок составляла 3300 кг/м^3 [6]. По рис. 9 профессиональный астроном-наблюдатель сделал вывод о том, что оптическая толщина следа Челябинского метеороида была несколько меньше 10. Опираясь на успешные оценки, сделанные для следа Shuttle, будем полагать, что Челябинский след сопоставим с легкой дымкой, для которой средняя дальность видимости составляет около $6,0 \dots 6,5 \text{ км}$, что соответствует показателю рассеяния $\sigma_p \approx 0,6 \text{ км}^{-1}$ [59]. Тогда при средней толщине следа 10 км его оптическая толщина получается не ниже 6, что согласуется с тем, что было определено по рис. 9. Итак, для следа Челябинского метеороида оценки позволяют утверждать, что $6 \leq \tau < 10$.

Тогда при среднем диаметре аэрозолей таком же, как в следе Shuttle, оказывается, что масса силикатного следа метеороида не может быть меньше 20 кт. Однако следует учесть, что аэрозоли следа Shuttle — это сконденсировавшиеся мельчайшие капельки соляной кислоты, образовавшейся после сгорания в основном твердого топлива его ускорителей SRM. А ведь микрочастицы размером $0,5 \dots 1,0 \text{ мкм}$ образуются именно при таких процессах конденсации и коагуляции [63]. При образовании следа каменного (силикатного) метеороида или снежно-ледяного метеороида, покрытого силикатной коркой, этот след является результатом термомеханической эрозии его поверхности. В более или менее подобных производственных процессах, как показывают исследования силикоза, типичный размер пылинок обычно не меньше $1 \dots 2 \text{ мкм}$ [64].

Тогда по формуле (4) получается, что минимальная масса следа Челябинского метеороида при $\tau = 6$ и $d = 0,65 \text{ мкм}$ составляла 20 кт. При $d = 1,0 \text{ мкм}$ она уже оказывается около 30 кт. При этом, по большинству известных оценок, масса Челябинского метеороида на входе в атмосферу была якобы не больше $10 \dots 15 \text{ кт}$ (например, согласно статье [5] — 13 кт), и большая ее часть порядка $7 \dots 10 \text{ кт}$ обязательно должна была сохраниться вплоть до точки взрыва, чтобы обеспечить его энергию хотя бы на уровне $300 \dots 400 \text{ кт}$ в тротиловом эквиваленте. Рассеянное, «сожженное» и преобразованное в результате взрыва вещество в след метеороида уже не вошло. Таким образом, в следе было в 5–10 раз больше вещества, чем его мог бы дать объект такого типа, который описан в большинстве работ по Челябинскому метеороиду, в том числе и в работах [5, 6]. Поэтому данные по энергии взрыва метеороида входят в неразрешимое противоречие с данными по массе его следа. Но если масса Челябинского метеоро-

ида была равна 1,8...1,85 Мт, след массой 20...30 кт составлял только около 1,0...1,5 % исходной массы объекта, и противоречий между этими его характеристиками быть не могло.

Заключение. Итак, рассмотрение концепции, описывающей вход в атмосферу и взрыв Челябинского метеороида, которая была начата в ажиотаже и спешке [7–9] и продолжена большинством исследователей в том же ключе, очевидно и однозначно демонстрирует, что эта концепция — хондритный метеороид размером порядка 15...20 м, массой 10...15 кт и энергией взрыва 300...500 кт в тротиловом эквиваленте [5, 6] — совершенно не согласуется с явлениями, наблюдавшимися в атмосфере и на подстилающей поверхности. Это вполне элементарно доказано по инфразвуковым данным, уровням перепада давления на ударной волне в Челябинске и окрестностях, по разбитым стеклам, а также по массе следа Челябинского метеороида. При этом некоторые ключевые для вычислений данные были взяты из самих же этих источников [5, 6]. Показано также, что оценки яркости его вспышки проведены таким образом, что не могут служить основанием для каких-либо определенных выводов.

При этом работы [5, 6], выполненные большими коллективами, безусловно, ценные источники первичной информации, еще не искаженной ошибочной концепцией. И правильная интерпретация собранных в них данных — одна из основ, на которых можно строить адекватное теоретическое описание этого неординарного явления.

Таким образом, мифотворчество значимого количества представителей официальной науки «о метеороидах» и выявленное автором их стремление избегать любых дискуссий по принципиальным вопросам, препятствуя критике поддерживаемой ими мифологии, превращает их в адептов своеобразной «церкви», использующей для достижения своих целей методы, выходящие далеко за пределы научных. При этом реальность оказывается гораздо более интересной и волнующей, чем их убогие мифы. Более того, если бы они были способны здраво и непредвзято размышлять, то пришли бы к выводу, что развенчание этих мифов соответствует их истинным, а не ложным интересам.

Выводы. 1. Близость максимальных длин пробега инфразвуковых волн от стратосферного взрыва Челябинского метеороида и крупнейшего в истории термоядерного взрыва Царь-бомбы — боезаряда АН602, произведенного в тропосфере, однозначно указывает на близость энергий этих явлений (как известно, энергия взрыва боезаряда АН602 составила около 58 Мт в тротиловом эквиваленте).

2. Оценки яркости вспышки Челябинского метеороида проведены таким образом, что не могут служить основанием для каких-либо определенных выводов об энергии его взрыва.

3. Разбитые стекла в Челябинске и его окрестностях, выбитые ворота и деформированные стальные несущие балки соответствуют уровню избыточного давления на ударной волне как минимум в несколько килопаскалей (7...8 кПа на расстоянии около 40 км от эпицентра взрыва по данным источника [5]).

4. Как показали расчеты, проведенные различными способами, подобный уровень давления при наблюдавшейся во время инцидента высоте взрыва может обеспечить только взрыв, энергия которого была бы около 50...60 Мт, что на два порядка больше исходной не растраченной при торможении в атмосфере кинетической энергии хондритного метеороида размером 15–20 м и массой 10–15 кт.

5. Оценки массы следа Челябинского метеороида приводят к уровню не меньше 20–30 кт, что также абсолютно противоречит представлению о нем как объекте массой 10–15 кт, особенно с учетом того, что на его взрыв, даже с заявленной сторонниками этой концепции энергией, не могло быть истрачено менее 2/3 исходной массы метеороида.

6. Всем наблюдавшимся явлениям соответствует разрушение в атмосфере загрязненного хондритами снежно-ледяного обломка кометы плотностью около 570 кг/м^3 , диаметром 180–185 м, массой около 1,8 Мт и с энергией взрыва 57 Мт в тротиловом эквиваленте.

7. Найденные на земле хондритные метеориты представляют собой осколки поверхностной корки этого кометного обломка, разбросанной, размолотой и в основном испаренной мощнейшим взрывом. Корка образовалась при абляции вещества метеороида под воздействием солнечного излучения во время его многократных облетов Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lobanovsky Yu.I. Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes. *arXiv: 1307.1967 [astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
- [2] Lobanovsky Yu.I. Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes. *arXiv: 1403.7282 [astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1403.7282>
- [3] Лобановский Ю.И. Параметры Челябинского и Тунгусского метеороидов и переоценка степени метеоритной угрозы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 6. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1503>
- [4] Marcus R., Melosh H.J., Collins G. *Earth Impact Effects Program*. Imperial College (London), Purdue University, 2010. URL: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>
- [5] Brown P.G., Assink J.D., Astiz L. et al. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, 503, no. 7475, 14.11.2013, pp. 238–241. URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>

- [6] Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. *Science*, 342, no 6162, 29.11.2013, pp. 1069–1073. URL: <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
- [7] Russia Meteor Not Linked to Asteroid Flyby. JPL, Caltech, *Latest News*, 15.02.2013. URL: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-061>
- [8] Cooke W. Why wasn't the Russian Meteor detected before it entered the Atmosphere? *NASA News, Watch the Skies*, 20.02.2013. URL: https://blogs.nasa.gov/Watch_the_Skies/2013/02/19/post_1361308690869/
- [9] Allen K. Chelyabinsk fireball: Canadian scientists still sizing it up. *Thestar.com, World*, 12.04.2013. URL: http://www.thestar.com/news/world/2013/04/12/chelyabinsk_fireball_canadian_scientists_still_sizing_it_up.html
- [10] Добровидова О. Из Челябинска с любовью: как в Америке обсуждали метеорит. *РИА-Новости, Наука*, 15.04.2013. URL: <http://ria.ru/science/20130415/932637522.html>
- [11] IMS Infrasound Network. *DTRA Verification Database*. URL: <http://www.rdss.info/infrastat/network/map.html>
- [12] Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., et al. The 2013 Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophysical Research Letters*, 40, issue 14, 28.07.2013, pp. 3732–3737. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50619/abstract>
- [13] *Царь-бомба*. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
- [14] Lobanovsky Yu.I. Acoustic Methods for Evaluation of High Energy Explosions. *arXiv: 1311.6565[astro-ph.EP]*. URL: <http://arxiv.org/abs/1311.6565>
- [15] Лобановский Ю.И. Каким был Челябинский метеороид на самом деле? *Synerjetics Group*, 10.07.2014, с. 1–8. URL: http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm
- [16] Yeomans D., Chodas P. Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013. *Near Earth Object Program, NASA*, 01.03.2013. URL: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html
- [17] Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O. et al. The Flux of Small Near-Earth Objects Colliding with the Earth. *Letters to Nature*, 420, 2002, pp. 294–296. URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v420/n6913/full/nature01238.html>
- [18] Литовка В. Странный диск отражается в Днепре. *Украина аномальная*. URL: http://ufodos.org.ua/photo/ufoinukraine/strannyj_disk_otrazhaetsja_v_dnepre/2-0-509
- [19] Williams D.R. Sun Fact Sheet. *NASA Goddard Space Flight Center*, 2013. URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- [20] *Херсон, Малый Потемкинский остров*. URL: <http://khersonphoto.blogspot.ru/2013/07/Herson-Malyj-Potemkinskij-ostrov.html>
- [21] Ottaviani M., Starnes K., Koskulics J. et al. Light Reflection from Water Waves: Suitable Setup for a Polarimetric Investigation under Controlled Laboratory Conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25 (5), 2008, 715–728.
- [22] Житель Троицка обнаружил сенсационное видео со взрывом метеорита спустя год. *ОТВ, Первый областной*. URL: http://www.1obl.ru/news/eto-interesno/sensatsionnoe-video-so-vzryvom-meteorita-spustya-god/?sphrase_id=3112063
- [23] Багирова К. *Метеорит в Троицке*. URL: http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=3yEei1bDNeo
- [24] Стекло и стеклопакеты для пластиковых окон. *Экоокна*. URL: <http://ecookna.com.ua/articles/steklo/>

- [25] Васильев М.С., Комова М.А., Прытков Г.А. *О пожарной безопасности: учеб. пособие*. МЧС РФ, 2003, 181 с. URL: <http://www.pandia.ru/text/77/168/15165.php>
- [26] *Атмосферный ядерный взрыв*. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв (дата обращения 20.01.2016).
- [27] Миргородский В.Р. *Безопасность жизнедеятельности*. Московский государственный университет печати, курс лекций. URL: <http://www.hi-edu.ru/e-books/xbook074/01/index.html?part-001.htm>
- [28] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. Т. 1. Москва, Физматлит, 2002, 832 с. URL: <http://padabum.com/d.php?id=20818>
- [29] Шитиков Е.А. Создание полигона на Новой Земле. *Ядерные испытания СССР*, т. 1, РФЯЦ ВНИИЭФ, 1997. URL: http://atomas.ru/isp/artika/a1_49.htm
- [30] Glasstone S., Dolan P. J. *The Effects of Nuclear Weapons*. U.S. Department of Defense, U.S. Department of Energy, Washington, 1977, 657 p. URL: <http://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2013/01/Effects-of-Nuclear-Weapons-1977-3rd-edition-complete.pdf>
- [31] Mannan S., Lees F.P. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*, 3rd edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2005, 3642 p.
- [32] Биненко В.И., Храмов Г.Н., Яковлев В.В. *Чрезвычайные ситуации в современном мире и проблемы безопасности жизнедеятельности*. СПб, ИВТОБ СПбГПУ, 2004, 400 с.
- [33] Покровский Г.И. *Взрыв*. Москва, Недра, 1980, 190 с. URL: <http://bookre.org/reader?file=475855>
- [34] *1976 Standard Atmosphere Calculator*. URL: <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
- [35] *Семипалатинский ядерный полигон*. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Семипалатинский_ядерный_полигон (дата обращения 02.02.2016)
- [36] Испытания первых термоядерных зарядов РДС-6с и РДС-37. *Ядерные испытания СССР*. Т. 1. РФЯЦ ВНИИЭФ, 1997. URL: http://atomas.ru/isp/5_13.htm
- [37] Operation Dominic 1962. *Janes's Oceania Home Page*. URL: http://www.janeresture.com/christmas_bombs/operation_dominic_1962.htm
- [38] Christmas Island Bomb Tests. *Picture Gallery 1. Operation Dominic 1962*. URL: http://www.janeresture.com/christmas_bombs/picture_gallery1.htm
- [39] Кудрявцев Г.Г. Воспоминания о Новой Земле. *Ядерные испытания в Арктике, том 1, Арктический ядерный полигон, ч. 2, Воспоминания новоземельцев*. Институт стратегической стабильности, 2004. URL: http://bourabai.ru/adushkin/ch1_20.htm
- [40] Google-Earth. URL: <https://maps.google.ru/maps?hl=en&tab=wl>
- [41] *Основы газовой динамики*, под ред. Г. Эммонса. Москва, Издательство иностранной литературы, 1963, 704 с.
- [42] Келдыш В.В., Лобановский Ю.И. Некоторые особенности пространственных течений с мостообразными скачками уплотнения. *Ученые записки ЦАГИ*, 1976, 7, № 5, с. 1–8. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-osobennosti-prostranstvennyh-techeniy-s-mostooobraznymi-skachkami-uplotneniya>
- [43] Кракатау. *Вулканы*. URL: <http://vulkaninfo.ru/po-stranah-3/indonezia/7-krakatao.html>
- [44] Бронштэн В.А. *Метеоры, метеориты, метеороиды*. Глава 4. Тунгусский метеорит. Москва, Наука, 1987, 173 с. URL: <http://tunguska.tsc.ru/ru/science/1/BronstenMMM/Glava4/>

- [45] Ben-Menahem A. Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1975, 11, no. 1, pp. 1–35. URL: <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
- [46] Svetsov V., Shuvalov V. Tunguska Catastrophe of 30 June 1908. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*, Springer, 2008, 361 p. URL: <http://jdsweb.jinr.ru/record/51782/files/Catastrophic%20Events%20Caused%20by%20Cosmic%20Objects.pdf>
- [47] Нагрузки и воздействия. *СНиП 2.01.07–85*, 88 с. URL: <http://www.alientechologies.ru/docs/snip-2-01-07-85.pdf>
- [48] Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to thermal layer effect. *Shock Waves*, 9, 1999, pp. 381–390.
- [49] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. Москва, Наука, 1966, 688 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/46551/>
- [50] Шифрин К.С. Оптическая толщина. *Физическая энциклопедия*, с. 443. URL: http://www.physicum.narod.ru/vol_3/443.pdf
- [51] Miller S.D., Straka W.C. III, Bachmeier A.S. et al. Earth-viewing satellite perspectives on the Chelyabinsk meteor event. *PNAS*, 110, no. 45, 19.09.2013, pp. 1–6. URL: <http://www.pnas.org/content/early/2013/10/15/1307965110.full.pdf+html>
- [52] Student Balloon Photographs Shuttle Endeavour's Launch into Orbit. *SPACE.com Staff*, 16.05.2011. URL: <http://www.space.com/11683-shuttle-endeavour-launch-balloon-photos.html>
- [53] Space Shuttle Launch Trajectory — I. *Space Math*, pp. 1–2. URL: <http://spacemath.gsfc.nasa.gov/Calculus/5Page40.pdf>
- [54] *Двигатель SRM*. URL: <http://wmpt.narod.ru/tt8.htm>
- [55] Jenkins D. R. Space Shuttle: The History of the National Space Transportation System. *The First 100 Missions*, 3rd edition. Cape Canaveral, Fla., Specialty Press, 2001, 513 p.
- [56] Лобановский Ю.И. Законы сохранения и феноменология ракетных двигателей. *Synergetic Group*, 30.06.2008, с. 1–21. URL: http://www.synergetics.ru/article/rocket_engines.htm
- [57] Мусьяков М.П., Миценко И.Д., Ванеев Г.Г. *Проблемы ближней лазерной локации*. Москва, Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000, 296 с. URL: <http://www.ozon.ru/context/detail/id/113012/>
- [58] Our Strange Sky: The Many Views of Endeavour's Last Launch. *APOD's Space Shuttle Rising Tribute*. URL: <http://www.groonk.net/blog/2011/05/our-strange-sky-the-many-views-of-endeavours-last-launch/>
- [59] Зубарев Д.Н. Прозрачность земной атмосферы. *Физическая энциклопедия*, с. 135–137. URL: http://www.physicum.narod.ru/vol_4/135.pdf
- [60] *Images of STS-98*. URL: <http://japaneseclass.jp/img/STS-98?page=2>
- [61] Взрыв метеорита в небе над Челябинском (Метеорит «Челябинск»). *Полный фотоотчет с комментариями*. URL: <http://marateaman.livejournal.com/27910.html>
- [62] След метеороида. *Чудеса и приключения*. URL: <http://chudesamag.ru/wp-content/uploads/2013/04/Meteorit-Miass-32.jpg>
- [63] Чекман И.С., Сыровая А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. *Аэрозоли — дисперсные системы*. Киев; Харьков, Цифрова друкарня № 1, 2013, 100 с. URL: http://repo.knmu.edu.ua/bitstream/123456789/4018/1/aero_zolli.pdf

- [64] Макшанова Е.И., Зиматкина Т.И. *Лекции по общей гигиене и экологии в схемах и таблицах*. Гродно, ГрГМУ, 2010.
URL: http://www.grsmu.by/files/file/university/cafedry/obshei-gigienу-ekologii/files/ychebnue_materialu/cgiirbis_64.pdf

Статья поступила в редакцию 05.05.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лобановский Ю.И. Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1497>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Лобановский Юрий Иоасафович — канд. физ.-мат. наук, ПАО «Корпорация «Иркут». Область научных интересов — механика, термодинамика.
e-mail: streamphlow@gmail.com

Chelyabinsk meteoroid: review of sources and substantiation of conclusions

© Yu. I. Lobanovsky

Irkut Corporation Joint-Stock Company, Moscow, 125315, Russia

The study shows that the idea of an aerial explosion of a chondritic meteoroid with the density of 3300 kg/m³, diameter of about 15...20 m, mass of 10...15 kt and explosion energy of 0,3...0,5 Mt TNT, which took place on Feb 15th, 2013, in the sky to the south-south-west of Chelyabinsk, is completely out of agreement with the phenomena actually observed at the moment in the atmosphere and on the underlying terrain. This is proven by infrasound investigation results, excess shockwave pressure levels in Chelyabinsk and its surroundings, and data on broken glass, demolished gates and deformed bearing beams of steel. The mass of the Chelyabinsk meteoroid trail also supports this. The study analyses available data and explains the reasons why there appeared incorrect yet widely published estimations of meteoroid parameters and explosion characteristics.

Keywords: Chelyabinsk meteoroid, meteoroid, nuclear blast, infrasound, flash, shock wave, pressure.

REFERENCES

- [1] Lobanovsky Yu.I. *Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Objects and their Explosion Modes*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1307.1967>
- [2] Lobanovsky Yu.I. *Refined Parameters of Chelyabinsk and Tunguska Meteoroids and their Explosion Modes*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1403.7282>
- [3] Lobanovsky Yu.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 6. Available at: [dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1503](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2016-06-1503)
- [4] Marcus R., Melosh H.J., Collins G. *Earth Impact Effects Program. Imperial College (London), Purdue University, 2010*. Available at: <http://impact.ese.ic.ac.uk/ImpactEffects/>
- [5] Brown P.G., Assink J. D., Astiz L. et al. *Nature*, vol. 503, no. 7475, 2013, pp. 238–241. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
- [6] Popova O.P., Jenniskens P., Emeliyanenko V. et al. *Science*, vol. 342, no. 6162, 2013, pp. 1069–1073. Available at: <https://www.sciencemag.org/content/342/6162/1069>
- [7] *Russia Meteor Not Linked to Asteroid Flyby. JPL, Caltech, Latest News, February 15, 2013*. Available at: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2013-061>
- [8] Cooke W. *Why wasn't the Russian Meteor detected before it entered the Atmosphere? NASA News, Watch the Skies, February 20, 2013*. Available at: https://blogs.nasa.gov/Watch_the_Skies/2013/02/19/post_1361308690869/
- [9] Allen K. *Chelyabinsk fireball: Canadian scientists still sizing it up. Thestar.com, World, April 12, 2013*. Available at: http://www.thestar.com/news/world/2013/04/12/chelyabinsk_fireball_canadian_scientists_still_sizing_it_up.html
- [10] Dobrovidova O. *Iz Chelyabinska s lyubovyu: kak v Amerike obsuzhdali meteorit. RIA-Novosti, Nauka, April 15, 2013* [From Chelyabinsk with Love: How the Meteorite was Discussed in America. RIA News, Science, Apr. 15th, 2013]. Available at: <http://ria.ru/science/20130415/932637522.html>
- [11] *IMS Infrasound Network. DTRA Verification Database*. Available at: <http://www.rdss.info/infrastat/network/map.html>

- [12] Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C. et al. *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, no. 14, pp. 3732–3737. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/grl.50619/abstract>
- [13] *Tsar-bomba* [Tsar-Bomb]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>.
- [14] Lobanovsky Yu.I. *Acoustic Methods for Evaluation of High Energy Explosions*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1311.6565>
- [15] Lobanovsky Yu.I. *Kakim byl Chelyabinskiy meteoroid na samom dele?* [What was Chelyabinsk meteoroid like?] Available at: http://www.synerjetics.ru/article/two_arguments.htm
- [16] Yeomans D., Chodas P. *Additional Details on the Large Fireball Event over Russia on Feb. 15, 2013. Near Earth Object Program, NASA, March 1, 2013*. Available at: http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html
- [17] Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O. et al. *Nature*, vol. 420, no. 6913, 2002, pp. 294–296. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v420/n6913/full/nature01238.html>
- [18] Litovka V. *Strannyi disk otrazhaetsya v Dnepre. Ukraina anomalnaya* [A weird disk is reflected in Dnieper. Anomalous Ukraine]. Available at: http://ufodos.org.ua/photo/ufoinukraine/strannyi_disk_otrazhaetsja_v_dnepre/2-0-509
- [19] Williams D.R. *Sun Fact Sheet. NASA Goddard Space Flight Center, 2013*. Available at: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>
- [20] *Kherson, Malyy Potemkinskiy ostrov* [Kherson, Small Potemkinsky Island]. Available at: <http://khersonphoto.blogspot.ru/2013/07/Herson-Malyj-Potemkinskiy-ostrov.html>
- [21] Ottaviani M., Stamnes K., Koskulics J. et al. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, no. 25 (5), 2008, pp. 715–728.
- [22] *Zhitel Troitska obnarodoval sensatsionnoe video so vzryvom meteorita spustya god. OTV, Pervyy oblastnoy* [An Inhabitant of Troitsk Published a Sensational Video of the Meteorite Explosion a Year Later. OTV, First Regional Channel]. Available at: http://www.lobl.ru/news/eto-interesno/sensatsionnoe-video-so-vzryvom-meteorita-spustya-god/?sphrase_id=3112063
- [23] Bagirova K. *Meteorit v Troitske* [A meteorite in Troitsk]. Available at: http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=3yEei1bDNeo
- [24] *Steklo i steklopakety dlya plastikovykh okon. Ekookna* [Glass and insulated glazing for plastic windows. Eco-windows]. Available at: <http://ecookna.com.ua/articles/steklo/>
- [25] Vasilev M.S., Komova M.A., Prytkov G.A. *Pedagogam i roditelyam o pozharной bezopasnosti: ucheb.posobie* [Fire safety for teachers and parents: a teaching aid]. Ministry of Emergency Situations of Russia Publ., 2003, 181 p.
- [26] *Atmosfernyy yadernyy vzryv* [High-altitude nuclear explosion]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв (accessed January 20, 2016).
- [27] Mirgorodskiy V.R. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti. Kurs lektsiy* [Civil safety. Lecture course.] Moscow, Moscow State University of Printing Arts Publ., 2001. Available at: <http://www.hi-edu.ru/e-books/xbook074/01/index.html?part-001.htm>
- [28] Orlenko L. P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. Vol. 1, Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 832 p.
- [29] Mikhailov V.N., et al, ed. *Yadernye ispytaniya SSSR* [Nuclear tests in the USSR]. Vol. 1, Sarov, Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ., 1997, 298 p.
- [30] Glasstone S., Dolan P.J. *The Effects of Nuclear Weapons*. Washington, US Department of Defense and Energy Research and Development Administration, 1977, 657 p.

- [31] Mannan S., Lees F.P. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*, 3rd edition. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2005, 3642 p.
- [32] Binenko V.I., Khramov G.N., Yakovlev V.V. *Chrezvychaynye situatsii v sovremennom mire i problemy bezopasnosti zhiznedeyatelnosti* [Emergency Situations in Today's World and the Problems of Civil Safety]. St. Petersburg, Institute for Military Engineering and Safety Research — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2004, 400 p.
- [33] Pokrovskiy G.I. *Vzryv* [Explosion]. Moscow, Nedra Publ., 1980, 190 p.
- [34] *1976 Standard Atmosphere Calculator*. Available at: <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
- [35] *Semipalatinskiy yadernyy poligon* [Semipalatinsk Test Site]. Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Семипалатинский_ядерный_полигон (accessed February 2, 2016).
- [36] *Ispytaniya pervykh termoyadernykh zaryadov RDS-6s i RDS-37* [Testing of the first thermonuclear charges RDS-6s and RDS-37]. *Yadernye ispytaniya SSSR* [Nuclear tests in the USSR], vol. 1. Sarov, Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ., 1997.
- [37] *Operation Dominic 1962. Janes's Oceania Home Page*. Available at: http://www.janeresture.com/christmas_bombs/operation_dominic_1962.htm
- [38] *Christmas Island Bomb Tests. Picture Gallery 1. Operation Dominic 1962*. Available at: http://www.janeresture.com/christmas_bombs/picture_gallery1.htm
- [39] Kudryavtsev G.G. *Vospominaniya o Novoy Zemle* [Remembering Novaya Zemlya]. *Yadernye ispytaniya v Arktike* [Nuclear testing in the Arctic]. Vol. 1. Institute of Strategic Stability Publ., 2004.
- [40] *Google-Earth*. Available at: <https://maps.google.ru/maps?hl=en&tab=wl>
- [41] Emmons H.W. *Fundamentals of gas dynamics*. Princeton, Princeton University Press, 1958, 749 p. [In Russ.: Emmons G., ed. *Osnovy gazovoy dinamiki*. Moscow, Izdatelstvo Inostrannoy Literatury Publ., 1963, 704 p.]
- [42] Keldysh V.V., Lobanovskiy Yu.I. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, vol. 7, no. 5, 1976, pp. 1–8. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-osobennosti-prostranstvennyh-techeniy-s-mostoobraznyimi-skachkami-uplotneniya>
- [43] *Krakatau. Vulkany* [Krakatoa. Volcanoes.]. Available at: <http://vulkaninfo.ru/po-stranah-3/indonezia/7-krakatau.html>
- [44] Bronshten V.A. *Meteory, meteority, meteoroidy* [Meteors, meteorites, meteoroids]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 173 p.
- [45] Ben-Menahem A. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, vol. 11, no. 1, 1975, pp. 1–35. Available at: <http://65.54.113.26/Publication/40382391/source-parameters-of-the-siberian-explosion-of-june-30-1908-from-analysis-and-synthesis-of>
- [46] Adushkin V., Nemchinov I., ed. *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer Netherlands, 2008, 361 p. Available at: <http://jdsweb.jinr.ru/record/51782/files/Catastrophic%20Events%20Caused%20by%20Cosmic%20Objects.pdf>
- [47] *SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeystviya* [Building Codes and Regulations 2.01.07-85. Loads and forces]. Moscow, JSC Centre of Project Documentation Publ., 2010, 88 p. Available at: <http://www.alientechnologies.ru/docs/snip-2-01-07-85.pdf>
- [48] Shuvalov V.V. *ShockWaves*, no. 9, 1999, pp. 381–390.
- [49] Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 688 p.

- [50] Shifrin K.S. Opticheskaya tolshchina [Optical depth]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Encyclopedia of Physics]. Vol. 3, Prokhorov A.M., ed. Moscow, Sovetskaya Entsiklopedia Publ., 1994, 672 p.
- [51] Miller S.D., Straka W.C. III, Bachmeier A.S. et al. Earth-viewing satellite perspectives on the Chelyabinsk meteor event. *Proc. of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, vol. 110, no. 45, pp. 1–6. Available at:
<http://www.pnas.org/content/early/2013/10/15/1307965110.full.pdf+html>
- [52] *Student Balloon Photographs Shuttle Endeavour's Launch into Orbit. SPACE.com Staff, May 16, 2011.* Available at: <http://www.space.com/11683-shuttle-endeavour-launch-balloon-photos.html>
- [53] *Space Shuttle Launch Trajectory — I. Space Math*, pp. 1–2. Available at: <http://spacemath.gsfc.nasa.gov/Calculus/5Page40.pdf>
- [54] *Dvigatel SRM [Solid Rocket Motor Engine]*. Available at: <http://wmpn.narod.ru/tt8.htm>
- [55] Jenkins D. R. *Space Shuttle: The History of the National Space Transportation System. The First 100 Missions*, 3rd edition. Cape Canaveral, Specialty Press, 2001, 513 p.
- [56] Lobanovskiy Yu.I. *Zakony sokhraneniya i fenomenologiya raketnykh dvigateley* [Conservation laws and phenomenology of rocket engines]. Available at: http://www.synerjetics.ru/article/rocket_engines.htm
- [57] Musyakov M.P., Mitsenko I.D., Vaneev G.G. *Problemy blizhney lazernoy lokatsii* [Problems of Short-Range Laser Location]. Moscow, BMSTU Publ., 2000, 296 p.
- [58] *ur Strange Sky: The Many Views of Endeavour's Last Launch. APOD's Space Shuttle Rising Tribute.* Available at: <http://www.groonk.net/blog/2011/05/our-strange-sky-the-many-views-of-endeavours-last-launch/>
- [59] Zubarev D.N. Prozrachnost zemnoy atmosfery [Transparency of the Earth atmosphere]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Encyclopedia of Physics]. Vol. 4, Prokhorov A.M., ed. Moscow, Sovetskaya Entsiklopedia Publ., 1994, 704 p.
- [60] *Images of STS-98.* Available at: <http://japaneseclass.jp/img/STS-98?page=2>
- [61] *Vzryv meteorita v nebe nad Chelyabinskom (Meteorit «Chelyabinsk»)*. *Polnyy fotootchet s kommentariyami* [Meteorite explosion in the Chelyabinsk sky ("Chelyabinsk" Meteorite). Complete photo report with comments]. Available at: <http://marateaman.livejournal.com/27910.html>
- [62] *Sled meteoroida. Chudesa i priklyucheniya* [Meteoroid Trail. Wonders and Adventures]. Available at:
<http://chudesamag.ru/wp-content/uploads/2013/04/Meteorit-Miass-32.jpg>
- [63] Chekman I.S., Syrovaya A.O., Andreeva S.V., Makarov V.A. *Aerzoli — dispersnye sistemy* [Aerosols - dispersion systems]. Kharkov, Tsifrova Drukarnya no. 1 Publ., 2013, 100 p. Available at:
http://repo.knmu.edu.ua/bitstream/123456789/4018/1/aero_zolli.pdf
- [64] Makshanova E.I., Zimatkina T.I. *Lektsii po obshchey gigiene i ekologii v skhemakh i tablitsakh. Posobie dlya studentov pediatricheskogo fakulteta* [Lectures in general hygiene and ecology, in charts and tables. Manual for pediatrics department students]. Grodno, Grodno State Medical University Publ., 2010. Available at:
http://www.grsmu.by/files/file/university/cafedry/obshei-gigienuekologii/files/ychebnue_materialu/cgiirbis_64.pdf

Lobanovsky Y.I., Cand. Sci. (Phys.-Math.). Specialises in mechanics, thermodynamics. Irkut Corporation Joint-Stock Company, a UAC member, Russian Federation. e-mail: streamphlow@gmail.com