

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОГО БОЛИДА ПО ЗАПИСЯМ АВТОМОБИЛЬНЫХ ВИДЕОРЕГИСТРАТОРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТА В АТМОСФЕРЕ

Производится определение траектории Челябинского болида из видеонаблюдений и приводятся результаты моделирования движения фрагмента в атмосфере с учётом её состояния на момент события. Разработаны методики компенсации дисторсии и совмещения кадров видеозаписей с калибровочными изображениями, а также методика итерационного уточнения траектории по азимутам и высотам. Эти методики позволяют повысить точность определения траектории до сотен метров в пространстве и до долей градуса по углу.

**Ключевые слова:** метеороид, болид, метеорит, фрагмент, видеозапись, траектория, абляция, коэффициент лобового сопротивления, азимут, высота, скорость.

Особенностью Челябинского болида 15 февраля 2013 г. является его регистрация из различных пунктов, расположенных на расстояниях до нескольких сотен километров от места явления. Это стало возможным благодаря ясной погоде, установившейся на большой территории 15 февраля. К тому же болид наблюдался в момент времени, когда солнце только взошло или были лёгкие сумерки. В это рабочее утро много людей находились в своих автомобилях с работающими видеорегистраторами. Фон утреннего неба был достаточно тёмным, так что подсвеченный лучами восходящего солнца болид выглядел контрастно и эффектно. Восходящее солнце попало на некоторые видеозаписи и служит дополнительным ориентиром в угловых измерениях.

Благодаря обилию данных о Челябинском болиде можно построить высокоточную модель сопровождавших его физических явлений. Такими исходными данными являются в первую очередь видеозаписи с автомобильных регистраторов. Видеозапись с камеры Мельникова о падении метеорита в оз. Чебаркуль дополняет информацию о конечном участке движения чебаркульского фрагмента. Параметры образовавшегося ледяного кратера, места находок метеоритов и их параметры могут также служить для калибровки модели ветрового сноса. Имеется большое количество фотографий аэрозольного следа, оставленного болидом. Эти фотографии показывают эволюцию следа, благодаря которой можно изучить конвективные явления и перенос в верхних слоях атмосферы, что было сделано в работе Н. Горькавого [1].

Данная работа посвящена в первую очередь определению точной траектории на всех её участках. Траектория, несомненно, определяет

характер протекания разрушения исходного метеороида, процессы абляции и торможения, которые приводят к превращению кинетической энергии метеороида в тепло и световое излучение. Изменение мощности вдоль траектории является опорной точкой для расчёта распространения ударных волн, вызвавших разрушения в Челябинске и других близлежащих населённых пунктах.

Была разработана следующая методика расчёта траектории. В первую очередь с максимальной точностью определяется положение в пространстве одной детали следа. Эта деталь должна быть выбрана так, чтобы легко идентифицировалась на большом количестве видеозаписей. Ветер, дующий в стратосфере, может достигать скорости в десятки метров в секунду, поэтому снос следа за несколько секунд может оказаться вполне заметен на сделанных с высоким разрешением видеозаписях. Следовательно, идентификация детали следа должна быть проведена в первые секунды после пролёта метеоритных тел.

При дальнейшем моделировании можно считать, что траектория проходит через найденную точку в пространстве. Остаётся найти направление, вдоль которого двигалось метеорное тело. Делается это итеративно поворотами траектории в пространстве, приближающими её к прямым линиям визирования, вдоль которых светящаяся часть болида наблюдалась из различных точек на поверхности Земли. При этом сама траектория задаётся не в виде прямой линии, а каждый раз при изменении направления производится полный пересчёт движения базового метеоритного тела в атмосфере.

Для определения скорости движения метеороида на начальном участке вхождения в атмос-

феру используются измерения на перекрёстке ул. Ломинского и Забабахина в г. Снежинске. Видеозапись с этого перекрёстка [2] содержит движение теней (пример тени на одном из кадров показан на рис. 1) от вертикальных рёбер высотного здания на моменты покрытия болида и выхода его из-за здания, что позволяет с большой точностью найти азимуты на два момента времени. При знании положения траектории это даёт возможность определить скорость с весьма малой погрешностью. Во время основной вспышки за счёт интерференции между фрагментами через ударные волны направление движения вылетевших вперёд фрагментов могло немного измениться. К тому же из-за асимметрии формы и вращения фрагменты могли испытывать некоторые боковые силы (в частности, за счёт эффекта Магнуса). Поэтому на видеозаписях видно, что фрагменты слегка разлетаются в разные стороны (рис. 2, а).

Далее внимание будет уделено базовому фрагменту, свечение которого прослеживается максимально долго и который, предположительно, упал в оз. Чебаркуль, образовав кратер во льду. Выбранная опорная деталь следа (обведена на рис. 2, б) находится в районе пос. Первомайский, сразу после основной вспышки. В связи с возможностью изменения направления движения базового фрагмента траектория в расчёте разделена на два участка: до опорной детали — вхождение в атмосферу, и после опорной детали — торможение и падение. Вращение этих двух кусков траектории в итерациях совмещения с наблюдениями производится независимо друг от друга. Отметим сразу, что полученный угол  $0,9^\circ$  между направлениями влёта и вылета из опорной точки весьма небольшой. Итак, входными данными для расчёта являются:

1) множество прямых линий визирования на опорную деталь и на светящийся болид как на начальных участках движения до основной вспышки, так и на конечных участках до полного угасания видимого свечения;

2) азимуты из Снежинска на положения болида в два точно определённых момента времени;

3) долгота падения базового фрагмента, равная долготе кратера в оз. Чебаркуль.

Для получения линий визирования использовалась система Google Earth [5] и специально разработанная программа совмещения изображений с компенсацией дисторсии и пересчётом координат пикселей в альт-азимутальные коор-

динаты. Также было сделано несколько поездок по местам записи на автомобильные видеорегистраторы. В этих поездках для всех видеозаписей, которые используются в расчётах, были сделаны видеозаписи на эталонный цифровой фотоаппарат CANON 500D с объективами EF-S 18-135 мм и EF-S 15-85 мм. Записи проводились либо из той точки, где стояла машина в момент съёмки, либо в том же режиме движения по проезжей части дороги. Выделенным местом для съёмки является перекрёсток в Снежинске, на котором видно движение теней от вертикальных рёбер дома (см. рис. 1). Поэтому здесь были выполнены снимки дома на фоне звёздного неба (рис. 3), которые позволяют определить азимуты рёбер с точностью до минуты дуги.

При моделировании использовалась уточнённая атмосфера, которая получена согласно данным звукового зондирования [6] (зависимость давления, температуры, плотности, скорости и направления ветра от высоты). Расположение станций показано на рис. 4. Важными факторами моделирования движения на конечном участке являются абляция и зависимость коэффициента лобового сопротивления от скорости и температуры поверхности фрагмента. Абляция учитывалась согласно работе [7], для расчёта торможения использовалась работа [8].

В результате самосогласованного моделирования траектории (итерации быстро сходятся) определяются:

1) положение в пространстве метеороида (до опорной точки) и базового фрагмента (после опорной точки) в зависимости от времени;

2) скорость вхождения в атмосферу и радиант — точка на небесной сфере, откуда двигался метеороид;

3) зависимости от времени модуля скорости, высоты, долготы, широты, чисел Рейнольдса, Маха и т. д.;

4) зависимость массы базового фрагмента на конечном участке траектории от времени;

5) масса, скорость, угол падения базового фрагмента на лёд оз. Чебаркуль.

Далее описывается методика расчётов линий визирования, самосогласованное определение траектории и приводятся полученные результаты.

Видеорегистраторы оснащены широкоугольными объективами, которые, как правило, обладают большими искажениями проекции. Будем считать гномоническую проекцию сферы неискажённым оптикой изображением (такое изображение

получается в камере-обскуре). Рассмотрим сферическую систему координат, в которой оптическая ось объектива совпадает с полюсом. Все ПЗС-матрицы сейчас имеют квадратные пиксели, так что, умножив координаты в пикселях на линейный размер пикселя, можно получить координаты точки изображения. Будем также считать, что плоскость ПЗС-матрицы установлена перпендикулярно к оптической оси системы (но оптическая ось не обязательно проходит через центр кадра). Тогда можно перейти в полярные координаты на плоскости изображения. В результате в случае гномонической проекции получаем простой переход от сферических координат  $\{\varphi, \theta\}$  к координатам точки кадра  $\{r, \phi\}$  в полярной системе координат:

$$\begin{cases} r = f \tan \theta; \\ \phi = \varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $f$  — это фокусное расстояние. При прохождении луча через оптическую систему объектива угол  $\varphi$  не меняется в силу осевой симметрии оптической системы и совпадает с полярным углом  $\theta$ . Полярное расстояние  $r$  на изображении может изменяться оптической системой (это и есть дисторсия), но, как правило, функция пересчёта полярного расстояния не сильно изменяет его на всём поле кадра. Так что дисторсию можно с достаточной точностью аппроксимировать полиномом вида

$$\tilde{r} = (1 + ar + br^2)r. \quad (2)$$

При этом фокусное расстояние оптической системы может быть определено из выражения

$$\tilde{f} = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\tilde{r}}{\theta}. \quad (3)$$

В разработанной программе совмещения изображений сначала производится калибровка эталонного фотоаппарата и объектива. Для этого совмещаются снимки звёздного неба, сделанного эталонным фотоаппаратом, и изображения звёздной карты с координатной сеткой, сгенерированные в программе Stellarium. В этой калибровке определяется сигнатура эталонного объектива, которая далее используется при измерениях линий визирования. Сигнатура  $\{\tilde{f}, a, b, x_0, y_0\}$  включает в себя фокусное расстояние, коэффициенты функции пересчёта полярного расстояния и положение оптической оси на кадре.

Далее производится совмещение изображения снятого эталонным фотоаппаратом и кадра с изображением болида. При совмещении задаются альт-азимутальные координаты оптических осей снимков и их позиционные углы, одновременно с этим подбирается сигнатура видеорегистратора, которая обеспечивает максимальное совпадение изображений. В результате такого совмещения на кадр с изображением болида накладывается альт-азимутальная сетка (рис. 5). Координаты оптических осей подбираются таким образом, чтобы наложенная на калибровочный кадр сетка наилучшим образом описывала линию горизонта и азимуты объектов на кадре, определённые в системе Google Earth либо по координатам светил (Солнце, Луна, звёзды) на момент съёмки калибровочного кадра.

Такая процедура совмещения позволяет максимально точно нанести координатную альт-азимутальную сетку на исследуемый кадр с изображением болида и определить направления линий визирования. Так, направление на болид из Снежинска было определено с погрешностью порядка  $5'$  (рис. 6). Погрешность в данном случае определяется размерами пикселя на исходном изображении.

Линии визирования опорной точки с оценками погрешностей по азимуту и по высоте представлены в таблице. Как видим, координаты точки с точностью до оценённой погрешности совпадают с координатами на видеозаписях.

Широта, долгота и высота места наблюдения задаются в системе, используемой в Google Earth [5]. При расчёте координат в пространстве и моделировании движения метеороида в атмосфере используется геоцентрическая система координат с правой тройкой ортов, в которой ось  $OZ$  направлена на северный полюс вдоль оси вращения Земли, а ось  $OX$  — на нулевой меридиан.

В качестве опорной детали было выбрано небольшое вытянутое облачко, появляющееся примерно через секунду после пролёта базового фрагмента. Это характерная деталь, которую можно найти на многих записях и трудно спутать с другими деталями. К тому же она достаточно мала, чтобы можно было точно определить её координаты, с другой стороны, достаточно велика, чтобы можно было заметить на записях с низким разрешением или сделанных с большого расстояния.

Для того чтобы найти положение опорной детали, надо найти точку в пространстве, которая была бы близка ко всем линиям визирования,

**Линии визирования опорной точки (рис. 2, б) из различных пунктов**

Точка съёмки	Широта, град	Долгота, град	Высота точки съёмки, м	Измеренный азимут, град	Измеренная высота, град	Азимут в модели, град	Высота в модели, град
Еманжелинск	54,756679	61,303827	235	303,4±0,5	36,5±0,3	302,835	35,9281
Гостиница «ПаркСити»	55,149930	61,363692	258	222,3±0,7	26,4±0,3	222,72	26,5131
Улица Воровского	55,147344	61,383465	256	224,6±1,0	26,0±1,0	224,339	26,1329
Поворот М5 на Малково	54,918564	60,331521	335	94,4±0,5	26,7±0,3	94,5197	26,3242
Улица Российская	55,160832	61,417412	237	225,4±0,1	23,9±0,4	225,035	24,7447
Улица Бейвеля	55,220093	61,296243	247	210,7±0,5	25,0±0,3	211,352	24,52
Улица Кожзаводская	55,191873	61,392893	216	220,6±1,0	23,9±1,0	220,406	24,0222
Улица Первой Пятилетки	55,166315	61,444750	231	226,3±0,5	23,6±0,5	226,09	23,9127
Миасс	55,105930	60,127835	333	115,0±1,0	18,3±0,5	114,406	18,6338
Троицк	54,077058	61,531300	183	337,6±0,2	11,25±0,2	337,495	11,0386
Снежинск	56,079425	60,742707	265	174,6±0,2	7,9±0,2	174,356	7,86653
Каменск-Уральский	56,415199	61,918560	170	200,2±1,0	5,4±0,5	200,202	5,48089

**Примечание.** Если место съёмки находится в Челябинске, то указана только улица. Даны положение точки съёмки, измеренное направление на точку траектории и направление на ближайшую точку модельной траектории.

проведённым в направлении опорной детали следа. Для этого был использован простой численный алгоритм: пробная точка смещается на небольшое расстояние в направлении ближайшей точки на линии визирования. Смещение по очереди производится в направлении всех линий визирования. Перебор линий визирования многократно повторяется, пока пробная точка не перестанет дрейфовать в пространстве. Найденное положение показано на рис. 7 вместе с линиями визирования. Среднеквадратичное расстояние точки от линий визирования составляет 300 м. Высота опорной точки над поверхностью Земли 19,9 км, широта 54°8893, долгота 60°9462.

Перейдём теперь к моделированию траектории в целом. Влияние торможения атмосферы на начальном участке движения метеороида в атмосфере ничтожно мало, как это будет видно из результатов расчётов. Так что до конца основной вспышки, т. е. до появления светящегося шара из-за дома в Снежинске (см. рис. 1), по которо-

му определяется скорость, движение метеороида было ускоренным в гравитационном поле Земли без заметного торможения в атмосфере. И вследствие непродолжительности этой фазы движения и того, что сила тяжести практически перпендикулярна направлению движения, модуль скорости на начальном этапе движения можно считать постоянным с высокой точностью.

Совсем другая картина наблюдается на конечном участке движения базового фрагмента. Он уже был во много раз меньше исходного тела и двигался в плотной атмосфере. В результате фрагмент испытывал сильную абляцию и быстро увеличивающееся торможение, пока не достиг звуковой скорости на высоте около 10 км. После этого звуковая волна оторвалась от фрагмента, коэффициент лобового сопротивления резко упал и движение быстро начало переходить в свободное вертикальное падение. Из видеозаписи, представленной Н. Л. Мельниковым (рис. 8), можно получить не только момент падения метеорита

в озеро (62,4 с после максимума свечения), но и предшествующий этому момент прихода оторвавшейся звуковой волны (46,8 с). Эти моменты хорошо согласуются с результатами моделирования (63,1 с для момента падения и 49,6 с для момента прихода звука).

Расчёт абляции производится согласно работе [7]. Дальность полёта зависит как от начальной массы базового фрагмента, так и от характера изменения коэффициента лобового сопротивления тела сферической формы. Причём дальность полёта весьма слабо зависит от массы тела и достаточно сильно — от коэффициента лобового сопротивления при гиперзвуковых скоростях. Поэтому в моделировании движения базового фрагмента нужно использовать коэффициент лобового сопротивления, полученный с достаточной высокой точностью. Зависимости коэффициента лобового сопротивления от чисел Рейнольдса, Маха и от температуры поверхности были взяты из работы [8]. Важным фактором для моделирования конечного участка траектории также является состояние атмосферы. Был проведён анализ профилей давления, температуры и ветра, полученных на станциях акустического зондирования атмосферы в городах, указанных на рис. 4. Анализ выявил схожесть ветровых профилей в области за Уральским хребтом. Таким образом, данные из Верхнего Дуброво, полученные за 3 ч до события, можно считать наиболее точно описывающими состояние атмосферы. Данные были состыкованы с модифицированной стандартной атмосферой на высотах, больших 30 000 м. Профили давления и температуры показаны на рис. 9. Зависимость скорости ветра от высоты дана на рис. 10.

Траектория движения моделировалась методом Верле с шагом 0,0001 с. Расчёт проводится в инерциальной декартовой системе координат, движущейся со скоростью поверхности в районе Челябинска относительно геоцентрической системы координат. Масса эволюционировала за счёт абляции, фрагментация не учитывалась, поскольку для определения траектории она не важна (движение базового фрагмента отдельно или вместе с остальной массой до основной вспышки практически совпадают из-за разреженности атмосферы). В расчёте учитывается переменное гравитационное поле и сила трения.

Самосогласованный цикл расчёта траектории состоит из следующих этапов:

1. Оптимизация дальности полёта базового фрагмента за счёт изменения массы и модуля скорости в опорной точке траектории при условии совпадения скорости вхождения в атмосферу со скоростью, найденной в п. 5.

2. Нахождение точек на траектории, ближайших к линиям визирования болида на начальном и конечном участке.

3. Разворот траектории при неподвижной опорной точке, приближающий траекторию к линиям визирования.

4. Определение точек на траектории, соответствующих азимутам рёбер дома в Снежинске.

5. Нахождение скорости вхождения в атмосферу по расстоянию между найденными точками и времени пролёта между ними.

В начале итераций масса базового фрагмента в опорной точке задаётся равной 10 000 кг, направление полёта строго на восток по горизонтали со скоростью 10 км/с. Самосогласованный цикл быстро сходится и через несколько итераций траектория перестаёт изменяться. При этом вычисление траектории проводится во внутреннем оптимизационном цикле. Траектория вычисляется от опорной точки к месту падения вперёд во времени и затем производится обратный расчёт начального участка назад во времени (интегрирование движения до  $-30$  с относительно опорной точки). Входными параметрами такого расчёта траектории является масса базового фрагмента в опорной точке, модуль его скорости и два направляющих вектора скорости для начального и конечного участка траектории.

В результате моделирования получилось:

1. Тело вошло в атмосферу на скорости  $18,87 \pm 0,05$  км/с.

2. Ускорение торможения достигло 1 g на высоте 43 км. Таким образом, даже если тело было не сплошным, а представляло собой груду камней различного размера, вплоть до пылевой фракции, то распад на части этой груды произошёл бы примерно на высоте 40 км, что не противоречит наблюдаемой интенсивности свечения на различных высотах.

3. В случае отсутствия атмосферы тело бы столкнулось с поверхностью Земли под углом  $14^\circ,8$  в точке с координатами  $55^\circ,0023$  с. ш.,  $59^\circ,8229$  в. д.

4. Моделирование падения Чебаркульского фрагмента даёт массу 802 кг на расстоянии 1,17 км к югу от ледяного кратера. То есть достаточно хорошая точность в расчёте, учитывая

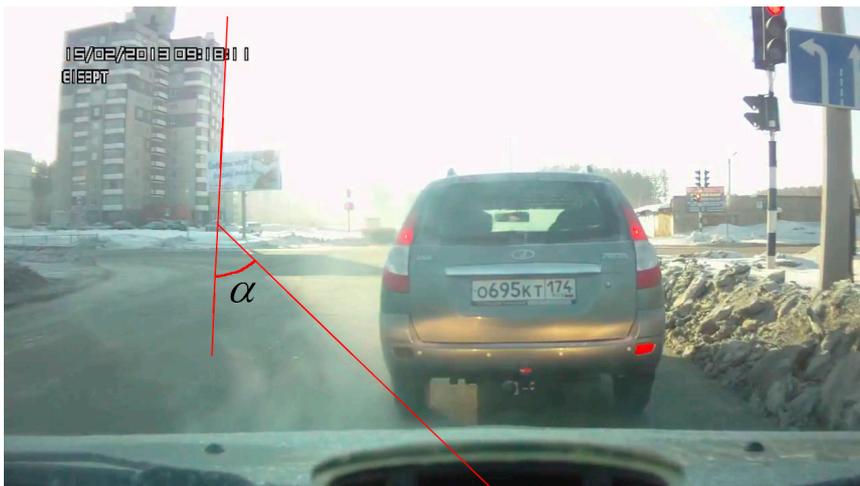


Рис. 1. Тень от ребра здания на горизонтальной поверхности дороги. Угол  $\alpha$  чувствителен к азимуту болида и принимает нулевое значение в момент совпадения азимутов болида и ребра здания

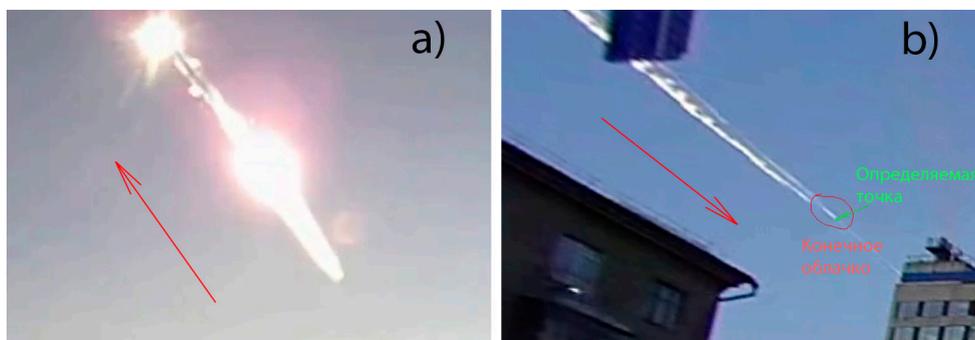


Рис. 2. Красными стрелками указано направление движения:  
 а) разброс фрагментов на видеозаписи, сделанной возле Чебаркуля на трассе М5 [3];  
 б) положение опорной точки на следе [4]



Рис. 3. Определение азимутов рёбер дома по звёздам HIP 87640 и HIP 82951A. Азимут левого ребра равен  $146,95^{\circ} \pm 0,01^{\circ}$ , азимут правого ребра равен  $161,551^{\circ} \pm 0,008^{\circ}$ . Расстояния до рёбер равны 143 и 161 м соответственно

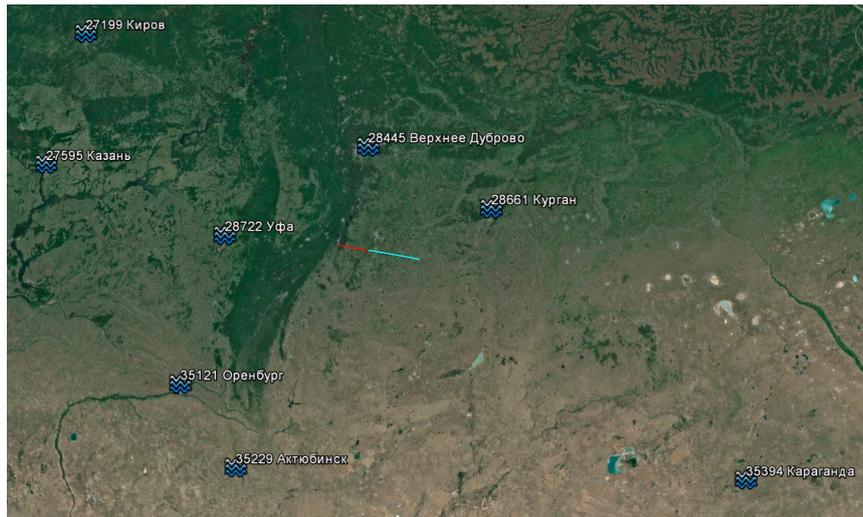


Рис. 4. Ближайшие к болиду станции зондирования верхней атмосферы, на которых на моменты времени 00:00 UTC и 12:00 UTC 15 февраля 2013 г. были определены профили температуры, давления, силы и направления ветра в зависимости от высоты до 30 км



Рис. 5. Пример наложения альт-азимутальной сетки. Сначала находятся параметры калибровочного снимка со звёздным небом, затем кадр из видеозаписи совмещается по очертаниям предметов с калибровочным кадром, после чего наносится альт-азимутальная сетка

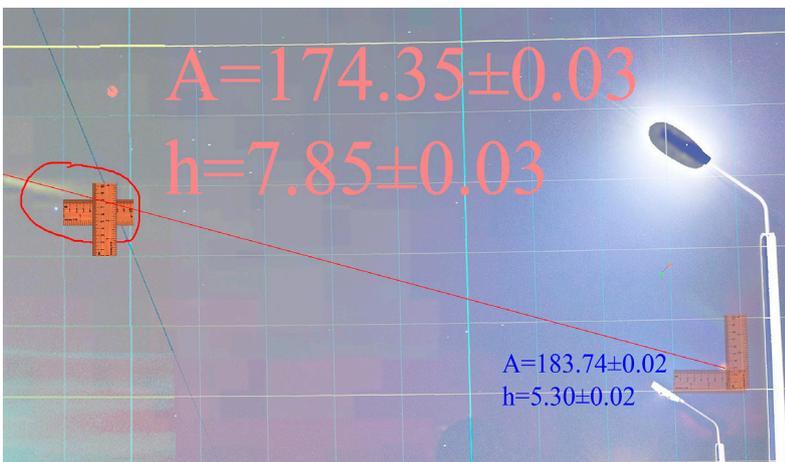


Рис. 6. Определение координат опорной точки и светящегося фрагмента перед угасанием. Наличие рядом расположенных фонарных столбов позволяет с высокой точностью определить положения. Красным текстом указаны координаты опорной точки, синим — координаты угасающего фрагмента. Погрешности указаны для калибровочного снимка. Итоговая погрешность определения положения фрагмента составляет около 5'. Координатная сетка нанесена согласно снимку звёздного неба, сделанного из точки расположения видеорегистратора с погрешностью около 5 км

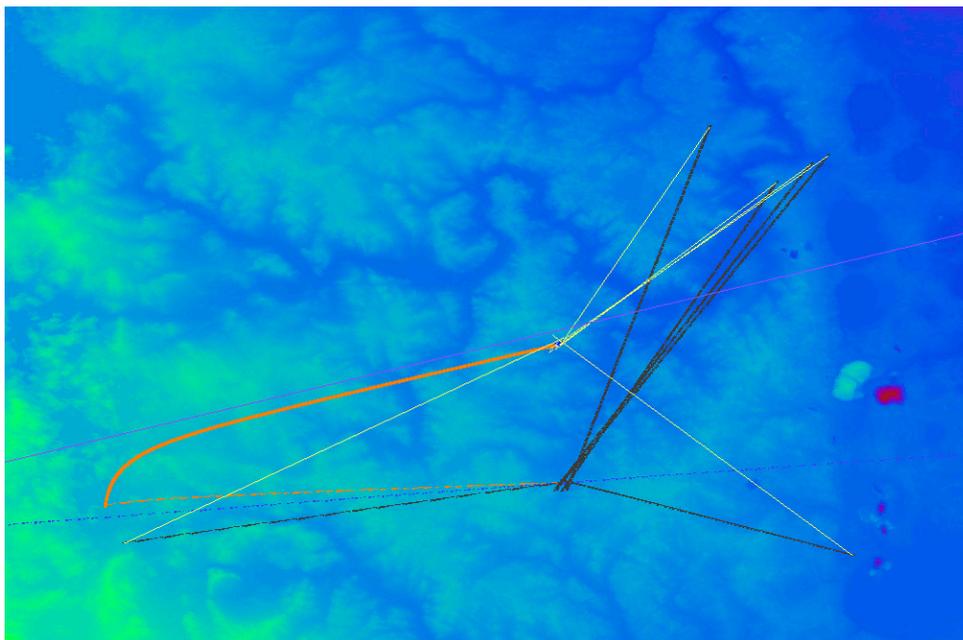


Рис. 7. Трёхмерная модель траектории. Цвет точки на поверхности Земли определяется её высотой над геоидом согласно спутниковым радиолокационным данным [9]. Коржинский угольный разрез виден как малиновое пятно справа. Оранжевая кривая показывает траекторию Чебаркульского метеорита, видны очертания оз. Чебаркуль, куда он упал. Линии визирования опорной точки показаны жёлтым цветом, их проекции на поверхность Земли — чёрным цветом

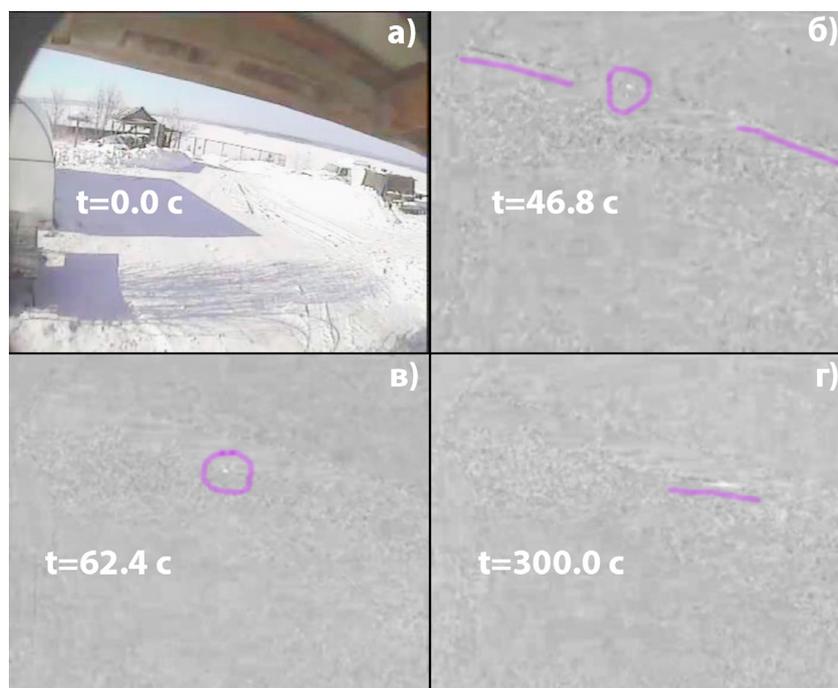


Рис. 8. Падение Чебаркульского метеорита согласно видеозаписи Н. Мельникова:

- а) кадр из видеозаписи; б–г) обработанные разности между текущим кадром и средним от 100 предыдущих кадров;
- а) момент наибольшей яркости снега, освещённого Челябинским болидом; б) приход звуковой волны приводит к колебаниям края клеёнки, свисающей с козырька крыши. В этот момент от клеёнки отваливается комочек снега; в) падение метеорита с образованием снежно-ледяного султана; г) дрейф шлейфа снежной пыли под действием юго-восточного ветра

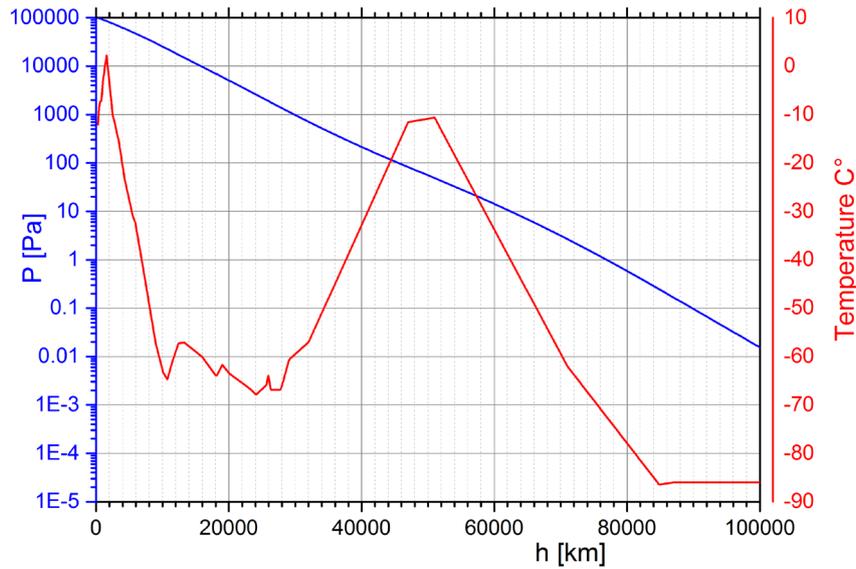


Рис. 9. Зависимость давления и температуры от высоты. До 30 км использованы данные из Верхнего Дуброво (см. рис. 4). Для верхней части атмосферы использована стандартная атмосфера, модифицированная по температуре для сшивки с наблюдаемыми данными

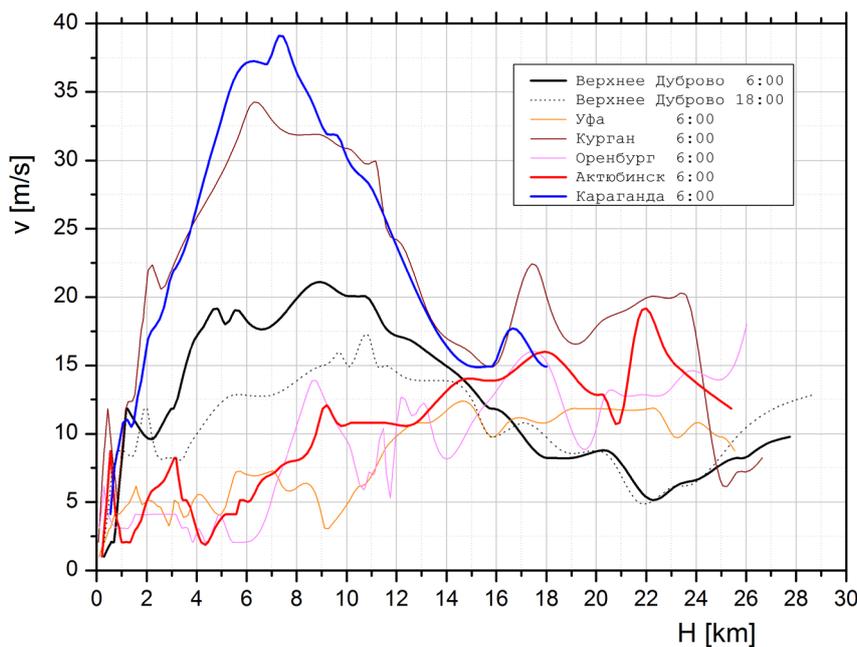


Рис. 10. Зависимость скорости ветра от высоты в различных точках наблюдения (см. рис. 4). На востоке (Курган, Караганда) ветер существенно сильнее, чем за Уральским хребтом. Верхнее Дуброво занимает промежуточное положение, причём ветер ослабевает к вечеру 15 февраля 2013 г. Для расчёта использовался профиль из Верхнего Дуброво на 6 ч утра. Направление ветра практически постоянно ( $330^\circ$ , т. е. северо-западный ветер) кроме нижнего слоя толщиной около 1 км

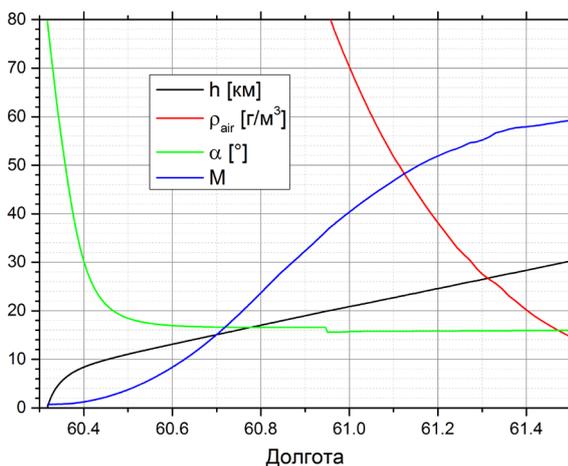
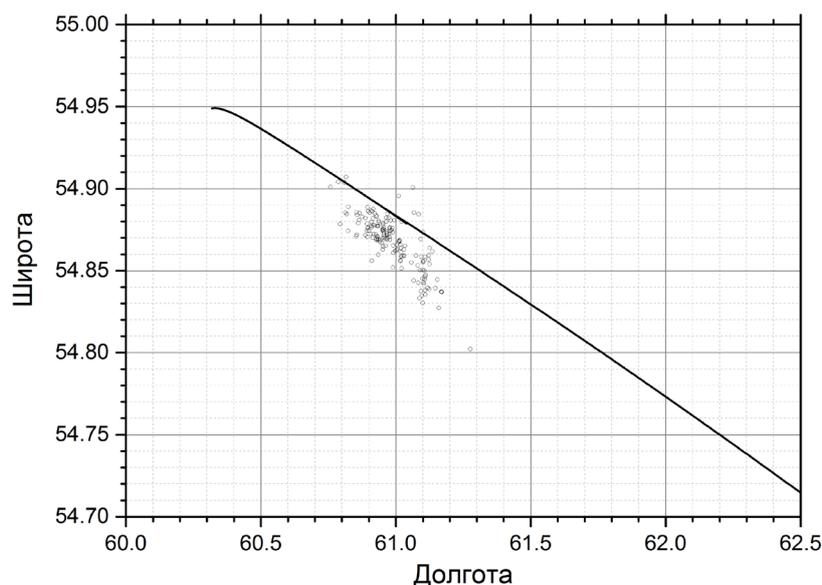


Рис. 12. Зависимости высоты, угла наклона, числа Маха и плотности воздуха от долготы вдоль траектории движения Чебаркульского метеорита. Ступенька на графике угла наклона связана с переходом от начального участка траектории к конечному, которые моделировались независимо



*Рис. 11. Проекция на поверхность Земли рассчитанной траектории движения Чебаркульского метеорита. Кружочками обозначены известные места находок метеоритов. Выпадение метеоритов к югу от траектории произошло из-за их сноса ветром во время установившегося падения*

случайные неопределённости в разлёте фрагментов и порывы ветра. Падение произошло под углом  $80^\circ$  к горизонту (почти вертикально) на скорости 214 м/с. При таком вхождении в поверхность замёрзшего озера отклонение положения метеорита на дне от центра кратера должно составлять около 1,5 м.

5. Проекция траектории на земную поверхность лежит севернее основной части найденных метеоритов (рис. 11), что подтверждает снос ветром метеоритов во время падения на юго-запад. Чем меньшую массу имеет метеорит, тем раньше он затормозился, тем с большей высоты и меньшей скоростью он падает. В результате снос ветром возрастает с увеличением долготы.

6. Была рассчитана траектория движения метеорита, упавшего в оз. Чебаркуль. Зависимости высоты, числа Маха, угла наклона и плотности воздуха вдоль траектории показаны на рис. 12.

#### Список литературы и источников

1. Gorkavyi, N. D. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide / N. D. Gorkavyi, F. Rault, P. A. Newman, A. M. da Silva, A. E. Dudorov // *Geoph. Res. Letters*. 2013. Vol. 40, is. 17. P. 4728–4733.
2. Видеозапись из Снежинска [Электронный ресурс]. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=2NSOpj8ynWs>

3. Видеозапись возле Чебаркуля на трассе М5 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=VjtM5GUjmSY>
4. Видеозапись в Челябинске на улице Российская [Электронный ресурс]. URL: [http://www.youtube.com/watch?v=K5J\\_xEWIGPo](http://www.youtube.com/watch?v=K5J_xEWIGPo)
5. Система картографирования Google Earth.
6. Архив зондирования верхней части атмосферы [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=naconf&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=2013&MONTH=02&FROM=1500&TO=1600&STNM=28445>
7. Голубь, А. П. Излучение и абляция крупного метеороида при его движении сквозь атмосферу Земли / А. П. Голубь, И. Б. Косарев, И. В. Немчинов, В. В. Шувалов // *Астрон. вестн.* 1996. Т. 30, № 3. С. 213–228.
8. Bailey, A. B. Sphere Drag Coefficients for a Broad Range of Mach and Reynolds Numbers / A. B. Bailey, J. Hiatt // *AIAA J.* 1972. Vol. 10, № 11. P. 1436–1440.
9. Компьютерный планетарий Stellarium [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stellarium.org/ru>
10. CGIAR-CSI [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ambiotek.com/topoview>