

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТУНГУССКОЙ КАТАСТРОФЫ С ВЗРЫВОМ МЕТАНОВОЗДУШНОГО ОБЛАКА, ИНИЦИИРОВАННЫМ НЕБОЛЬШИМ, «МЕДЛЕННО» И ПОЛОГО ЛЕТЯЩИМ МЕТЕОРИТОМ

Ю. А. Николаев, П. А. Фомин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск 630090, pavel_fomin@mail.ru

Развита, всесторонне проанализирована и подтверждена гипотеза о Тунгусском событии как взрыве тороидального облака, образованного разовым выбросом метана в атмосферу. Взрыв инициирован небольшим, «медленно» и полого летящим метеоритом. Выяснена газогидратная природа выброса метана и указана область, откуда произошел выброс. Рассчитаны траектории метеорита, оценены его максимальный и минимальный размеры. Определено наиболее вероятное место падения метеорита. Статистически обработан проведенный модельный эксперимент по вывалу леса (взрыв детонирующего шнура в форме кольца над «лесом» из проволочек). Показано, что вывал проволочек не только внешне похож на реальную картину вывала леса, но и эквивалентен ей статистически. Дано объяснение световым, акустическим и атмосферным явлениям (серебристые облака, озонный слой, магнитная буря), связанным с Тунгусским событием. Объяснено отсутствие значительного количества метеоритного вещества в области эпицентра. Совокупность полученных результатов подтверждает рассматриваемую гипотезу, не противоречит известному фактическому материалу и физически корректно объясняет все особенности Тунгусского явления.

Ключевые слова: Тунгусский взрыв, Тунгусский метеорит.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетними усилиями ученых собран и систематизирован богатейший фактический материал, связанный с Тунгусским событием 1908 г. Наиболее полное его описание и анализ выдвигавшихся гипотез приведены в [1–3]. В основном это событие объясняли разрушением в атмосфере космического тела. Но общепринятого объяснения Тунгусского взрыва достигнуто не было, что стало причиной появления принципиально новых гипотез.

Впервые возможное объяснение Тунгусской катастрофы взрывом метановоздушного облака, инициированным метеоритом, было высказано в [4]. К сожалению, эта догадка не была подкреплена каким-либо анализом.

В нашей работе [5] выдвинута более подробная гипотеза, согласно которой Тунгусская катастрофа представляла собой взрыв метановоздушного облака, инициированный небольшим (размером порядка нескольких метров) метеоритом. Метеорит затормозился в атмосфере до скорости порядка нескольких километров в секунду и летел под небольшим углом к горизонту. Показано, что для этого достаточен не уникальнейший по мощности разо-

вый выброс метана в атмосферу в виде мощной газовой струи с образованием устойчивого тора. Метеорит пересек облако метановоздушной смеси, инициировал детонацию и упал в нескольких десятках километров от эпицентра. Эта гипотеза не противоречила физическим законам и объясняла такие характеристики события, как появление серебристых облаков, световые, акустические, магнитные явления и отсутствие значительного количества метеоритного вещества в области эпицентра.

В работе [6] мы продолжили анализ указанной гипотезы. Были проведены модельные эксперименты по вывалу и ожогу леса. Вывал леса имитировался взрывом детонирующего шнура в форме кольца над «лесом» из вертикально стоящих проволочек. Полученный вывал проволочек оказался внешне похожим на реальную картину вывала леса при Тунгусском взрыве (например, совпадение «бабочек» вывала, наличие «телеграфного» леса и «обратного» вывала). Представлены результаты численного расчета возможных траекторий метеорита, отобраны траектории, которые не противоречат свидетельствам очевидцев и объективным данным, и по ним определены максимально возможные размеры метеорита.

Предлагаемая статья окончательно подтверждает рассматриваемую гипотезу. Показано, что вывал проволочек в модельном эксперименте не только внешне похож на реальную картину вывала леса, но и эквивалентен ей статистически. Выяснена газогидратная природа выброса метана и указана область, откуда произошел выброс газа и так называемых «камней Джона». Сделан расчет наиболее вероятного места падения метеорита. Совокупность приведенных ниже и полученных нами ранее результатов позволит окончательно идентифицировать Тунгусскую катастрофу с взрывом метановоздушного облака, инициированным небольшим, «медленно» и полого летящим метеоритом. Такое рассмотрение не противоречит известному фактическому материалу и физически корректно объясняет все особенности Тунгусского явления.

ОБЩАЯ КАРТИНА ЯВЛЕНИЯ

Схема события приведена на рис. 1. Эпицентр взрыва находился над вечномёрзлотным каменноугольным бассейном [7], богатым проявлениями углеводородов и метаногидратов [8], конкретнее, над кальдерой древнего вулкана, изобилующего жерлами и тектоническими разломами [9, 10].

Хронология события представляется следующей. Начиная с 20-х чисел июня 1908 г., в связи с резким повышением тектонической активности [11], недалеко от будущего эпицентра Тунгусской катастрофы начались прорывы метана в атмосферу. Поскольку метан легче воздуха, он всплыл в верхние слои атмосферы и был перенесен ветрами в западном направлении. При подъеме на высоту выше 120 км, в

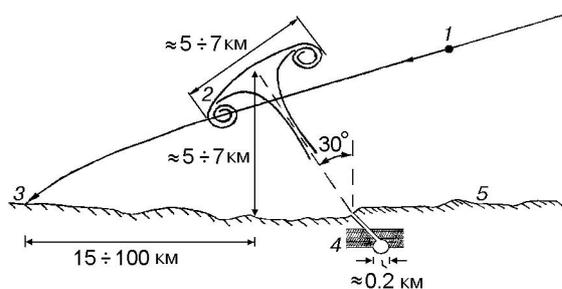


Рис. 1. Общая схема Тунгусской катастрофы: 1 — метеорит, 2 — газовый тор (метановоздушная смесь), 3 — место падения метеорита, 4 — газогидратный слой и газовая камера, 5 — поверхность Земли

начале термосферы, где температура повышается до сотен градусов [12, 13], метан сгорал с образованием углекислого газа и паров воды.

Водяной пар, диффундируя вниз, на высоте ≈ 80 км, где температура опускается до $150 \div 170$ К [12–14], сублимировался, образуя серебристые облака. Этим и объясняются аномальные оптические явления, наблюдавшиеся вплоть до Западной Европы за несколько дней до момента падения Тунгусского метеорита [1, 2, 15].

За несколько минут или десятков минут до прилета метеорита интенсивность утечки метана возросла, причем процесс носил характер разового выброса массы метана порядка 200 кт. Подземная камера, содержащая сжатый метан, имела характерный размер порядка 200 м, а диаметр жерла, через которое произошел выброс, был порядка нескольких десятков метров. После выброса жерло и камера оказались залитыми водой, образовавшей впоследствии слой вечной мерзлоты. Поэтому поиск и идентификация жерла и камеры затруднены, тем более что территория кальдеры испещрена жерлами и тектоническими разломами. Период времени, соответствующий катастрофе, характеризуется повышением тектонической активности в районе Тунгусского взрыва [11]. Наличие свободного метана в камере может быть связано с разложением газогидратов, залегающих на глубине нескольких сот метров под слоем вечной мерзлоты [8, 16, 17]. Изменение термобарических условий, например из-за образования трещин при тектонических подвижках, может вызвать бурную газификацию гидратов.

В результате выброса сформировался устойчивый тор, который за время ≈ 1 мин [18] достиг высоты тропопаузы и завис на высоте $5 \div 7$ км в зоне инверсии температуры [12, 13, 18]. Выброс произошел не вертикально, и наклон тора к поверхности земли, по-видимому, составлял $\approx 30^\circ$. Точка выброса могла отстоять от центра проекции тора на землю на расстоянии $3 \div 4$ км. Внешний диаметр сформировавшегося тора составлял $5 \div 7$ км, а поперечное сечение $1 \div 0,8$ км.

Прорыв метана, вызвавший появление тора, сопровождался выбросом вещества из глубин порядка сотен метров, например, выбросом древнего подземного углерода и редкоземельных металлов с последующим выпадением на землю [1, 2]. Ярким подтверждением наличия выброса являются «камни Джона» [1, 2,

19]. Это находящиеся на поверхности в районе эпицентра взрыва валуны, частично вросшие в землю и достигающие в размере нескольких метров. Они состоят из осадочных пород, в основном прочного песчаника. Объяснить их химический состав и появление на поверхности можно только выбросом из глубин в несколько сот метров. По порядку величины эта глубина совпадает с глубиной залегания газовых гидратов [16, 17]. Один из этих камней был распал. Определено, что скорость его полета была около 0.5 км/с [19], что совпадает со скоростью звука в метане, а приблизительно с такой скоростью должно было выбрасываться вещество из жерла (критическое истечение газа [20]). Камень и его осколок лежат практически на оси симметрии вывала леса — именно так, как должно быть, если бы вывал был порожден взрывом метана, выброшенного из того же жерла. Это способствует идентификации места выброса. Вероятнее всего, оно находится в нескольких километрах от проекции эпицентра взрыва на землю, под поверхностью Южного болота. Учитывая, что во время катастрофы дул слабый попутный ветер, а время размытия облака составляет около часа, можно предположить, что облако было несколько снесено и выброс произошел из одного из многочисленных жерл на восточно-юго-восточной части окаемки кальдеры [9, 10], находящейся на расстоянии 5 ÷ 7 км от проекции эпицентра взрыва на землю.

В это время в атмосферу Земли вошел железный (или, что менее вероятно, каменный) метеорит размером порядка нескольких метров, прилетевший из пояса астероидов. Наклон плоскости орбиты метеорита к плоскости эклиптики составлял несколько градусов, и его невозмущенная притяжением Земли орбита была практически касательна к орбите Земли. Метеорит был догоняющим. Максимальная скорость его сближения с Землей составляла 12 ÷ 14 км/с. Догоняя Землю, метеорит пересек плоскость эклиптики с северной стороны, а затем под воздействием притяжения Земли вновь пересек плоскость эклиптики, вошел во взаимодействие с атмосферой и далее, двигаясь по географическому азимуту $\approx 295^\circ$ (в районе катастрофы), пересек газовый тор, состоящий из смеси метана с воздухом. При этом его траектория была наклонена под небольшим (до 25°) углом к поверхности Земли. Имея скорость 1.5 ÷ 3 км/с, метеорит пересек тор предполо-

жительно в нижней точке, вызвал детонацию газа и, пролетев 15 ÷ 100 км, упал в местности, изобилующей болотами. По-видимому, он не разрушился при падении, если метеорит был железный, и, вероятно, может быть найден. Если метеорит был каменный, он должен был развалиться на более мелкие куски, что усложняет возможные поиски.

Вследствие торможения метеорита атмосферой, его поверхность была раскалена до температуры выше температуры плавления. Поэтому имел место срыв жидкой пленки с поверхности в виде мелких капель размером порядка десятков микронов. Эти частицы после затвердевания были снесены ветром на расстояние в десятки и сотни километров и выпали длинным шлейфом на северо-запад от места катастрофы [1, 2, 21, 22].

Детонация тора вызвала появление ударной волны, что стало причиной вывала леса. Наклон тора к поверхности земли обусловил форму вывала в виде бабочки [1, 2, 21, 23, 24]. Из-за неоднородности состава газа в торе интенсивность детонационной волны могла быть различной при распространении в разных направлениях, и, по-видимому, волна, распространявшаяся по часовой стрелке (при виде сверху), была более мощной, что обусловило регулярное отклонение вывала от радиального в том же направлении приблизительно на 5° [21, 23, 24]. Максимумы давления лежали на оси симметрии проекции кольца на землю, и это вызвало дополнительное осесимметричное отклонение от радиальности вывала [21, 23, 24]. Ударные волны, возникшие при распространении детонационных волн, при их столкновении между собой и при отражении волны сжатия от земли создали звуковой эффект нескольких взрывов, а эхо породило последующие громopodobные раскаты [25, 26]. В ближней от проекции тора на землю зоне после отражения волны сжатия от земли образовалась волна разрежения, приведшая к «обратному» от эпицентра взрыва направлению вывала. Даже на больших расстояниях от эпицентра наблюдались небольшие вихревые зоны с беспорядочным вывалом деревьев [1, 2, 23, 24]. В указанной ближней от проекции тора на землю зоне хаотически направленный вывал также имел место и присутствовал стоячий («телеграфный») лес без крон [1, 2, 22].

Химический состав газа в торе перед иницированием детонации был неравномерным:

во внутренних областях тора ощущался недостаток кислорода. Поэтому при детонации образовалось много сажи, обладающей высокой светимостью при температуре ≈ 3000 К. Это вызвало ожог леса [1, 2, 27], при этом эллипсоид ожога смещен относительно проекции центра тора вследствие наклона тора к поверхности земли. После взрыва образовалось облако огня и дыма [25, 28] и происходил процесс постепенного догорания кислорода при смешении свежего воздуха с горячими продуктами химической реакции.

Образовавшийся при взрыве водяной пар, плотность которого даже после остывания существенно ниже плотности воздуха, в течение нескольких минут [18] всплыл в верхние слои атмосферы. Затем в зоне очередной инверсии температуры (начало термопаузы, высота $80 \div 100$ км [12, 13]) паровое облако расплылось, расширившись в сотни миллионов раз, и накрыло площадь, соизмеримую с площадью поверхности земного шара. Сублимация водяных паров вызвала появление серебристых облаков вплоть до Западной Европы [1, 2, 15]. Очень мелкие частицы недогоревшего углерода могли достигать за счет регулярных ветров территории Калифорнии, о чем свидетельствует зарегистрированное там помутнение атмосферы [1, 2]. При всплытии продуктов детонации тора слои ионосферы *D* и *E*, расположенные на высотах $50 \div 90$ и $90 \div 140$ км соответственно, были просто смыты. Это обусловило возникновение кратковременной магнитной бури [1, 2]. Она началась после всплытия основной массы водяных паров (за время порядка нескольких минут [18]), т. е. с задержкой относительно момента взрыва [1, 2].

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЯ

Согласно имеющимся численным оценкам, например [29, 30], взрыв произошел на высоте нескольких километров и имел эффективную энергию порядка 10^{16} Дж. Эти параметры были определены по характеру вывала и ожога леса. Такой энергии соответствует взрыв приблизительно 200 кт метана. При стехиометрическом смешении такого количества метана с воздухом на высоте нескольких километров объем взрывчатой смеси будет порядка 10 км³.

Выброс метана имел газогидратную природу. Напомним, что газовые гидраты — кристаллические соединения, образующиеся при

определенных термобарических условиях из воды и газа. При этом молекулы воды образуют каркас, полости в котором занимают молекулы газов [16, 17, 31]. Огромные количества газовых гидратов, в основном гидратов метана, залегают в земной коре в полярных районах суши и на всех географических широтах Мирового океана [17, 31].

Уравнение состояния гидрата метана таково, что он может существовать в довольно узком диапазоне температур и давлений [16, 17, 31]. С увеличением глубины температура возрастает, вследствие чего под слоем гидрата всегда есть слой свободного или растворенного метана, заполняющего поры в породе или имеющиеся в ней полости. При изменениях давления, что возможно, например, при разгерметизации мерзлотного и гидратного слоев или повышении температуры, гидраты начинают разлагаться [16, 17, 31–33]. В результате возникают высокие пластовые давления, значительно превышающие давление гидроразрыва пласта и происходит разрыв сплошности пород с образованием трещин. При этом возможны мощные выбросы метана, носящие взрывной характер. Через образовавшиеся каналы может произойти следующий выброс свободного «подгидратного» метана.

Почти повсеместно в Сибири верхняя зона стабильности газогидратов располагается на глубине $100 \div 150$ м. Нижняя граница стабильности в восточной части Сибирской платформы опускается до 2 км, причем интересующий нас район Подкаменной Тунгуски также перспективен на наличие газогидратных месторождений [8].

Важно, что эпицентр Тунгусского взрыва находился над кальдерой древнего вулкана [9]. Она образовалась при оседании вулкана в пустоты, возникшие на заключительной стадии его извержения. Часть пустот могла сохраниться и быть герметизирована слоем вечной мерзлоты. В результате разложения газогидратов подобные пустоты могут заполниться метаном. Вероятность прорыва газов увеличивается при повышении сейсмической активности и при оттаивании ледяной «пробки» летом. Характерное давление метана при разложении газовых гидратов порядка 100 атм [32, 33]. Отметим, что такой же порядок величины имеет давление в скважинах газовых месторождений. Следовательно, эквивалентный размер камеры, содержащей 200 кт метана, дол-

жен быть порядка 200 м. Такое количество газа относительно невелико, так как составляет всего трехмесячный свободный дебит мощной газовой скважины. При таком давлении скорость потока истекающего газа является звуковой [20], а поперечный размер жерла, обеспечивающего истечение указанного количества газа из камеры в течение нескольких минут, должен составлять десятки метров.

Отметим, что самопроизвольные выбросы подземных газов, в том числе и носящие взрывной характер, — явление далеко не уникальное. Диссоциацией газовых гидратов объясняют действие подводных грязевых вулканов в прибрежье Панамы, Каспийском и Охотском морях [17]. Освобождение огромных объемов газа в прибрежных районах Саргассова моря также обусловлено разложением газовых гидратов [17]. Грязевые вулканы, имеющие гидратную природу, достаточно широко распространены в средних и высоких широтах суши Северного полушария [17]. Показательными примерами самопроизвольных мощных выбросов газов, имеющих газогидратную природу, служат подобный по мощности Тунгусскому выброс углекислоты в Камеруне в 1986 г. [34] и периодические выбросы метана в окрестностях острова Беннета в Российском секторе Арктики [17].

РАСЧЕТ ВОЗМОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЙ МЕТЕОРИТА И МЕСТА ЕГО ПАДЕНИЯ

Для определения возможных траекторий метеорита решалась обратная задача. Задавались угол и скорость встречи метеорита с поверхностью Земли. Задача решалась в два этапа. На первом этапе численно решалась двумерная задача. Учитывались притяжение метеорита к Земле и ее вращение вокруг своей оси, аэродинамическое сопротивление движению метеорита в атмосфере и зависимость ее плотности от высоты, возможность дробления метеорита. Расчеты проведены для сферического метеорита. Коэффициент сопротивления сферы рассчитан по формулам [35]. На втором этапе (при высоте полета метеорита над Землей более 180 км) численно решалась трехмерная задача, в которой в качестве начальных данных использовались результаты расчетов первого этапа и учитывалось притяжение метеорита к Солнцу и Земле, а также движение Земли вокруг Солнца. В соответствии с

рассматриваемой гипотезой явления ось симметрии вывала и ожога леса зависит только от ориентации тора (лежит в плоскости, перпендикулярной тору и проходящей через его центр) и мало зависит от места инициирования взрыва, т. е. от траектории полета метеорита. Следовательно, определение азимута полета должно основываться преимущественно на показаниях очевидцев. Поэтому мы использовали в расчетах географический азимут 295° [1, 2, 21]. Учитывались также широта и долгота эпицентра, дата и время суток падения метеорита.

Из всех возможных траекторий в качестве наиболее вероятных выбраны те, что удовлетворяют следующим условиям: (а) высота траектории в эпицентре взрыва $5 \div 7$ км; (б) высота полета на расстоянии 300 км от эпицентра не выше 100 км (чтобы метеорит был наблюдаем); (в) метеорит не подвергался распаду до соприкосновения с Землей; (г) невозмущенная плоскость орбиты метеорита имела небольшой наклон к плоскости эклиптики и перигей и апогей, характерные для метеоритов из пояса астероидов (прилет метеорита из-за пределов Солнечной системы маловероятен).

Дополнительно на характерный размер метеорита и его скорость в момент встречи с газовым тором накладывались ограничения снизу: они должны быть достаточными для инициирования детонации. При этом геометрические размеры области, занятой взрывчатой смесью, должны быть такими, чтобы детонационная волна не затухла. Поясним это более подробно.

Размер детонационной ячейки определяет минимальный размер свободной струи взрывчатого газа, по которой может распространяться самоподдерживающаяся детонация. Этот минимальный диаметр для всех смесей равен ≈ 60 размерам ячейки [36, 37]. Размер ячейки приблизительно обратно пропорционален давлению [37]. Для метановоздушной стехиометрической смеси при нормальном давлении размер ячейки примерно равен 30 см [37]. На высоте $5 \div 7$ км вследствие уменьшения давления он должен увеличиться до ≈ 1 м. Следовательно, для распространения детонации по тору его толщина должна быть не менее 60 м, что в нашем случае заведомо выполняется.

Размер ячейки определяет также минимальный размер и скорость быстро летящего

тела, способного инициировать детонацию. Если детонация инициируется у переднего торца тела, летящего приблизительно со скоростью $0.6D_0$ (D_0 — скорость детонации), то эффект быстро летящего тела эквивалентен цилиндрическому инициированию детонации. При распространении в радиальном направлении от траектории тела детонация ведет себя так же, как при выходе из плоского канала малой ширины в значительно более широкий канал. При этом, для того чтобы детонационная волна не затухла, ширина узкого канала должна превышать 6 размеров ячейки [37]. Если скорость тела больше $0.6D_0$, то из энергетических соображений следует, что минимальный размер тела уменьшается пропорционально его скорости. Скорость детонации стехиометрической метановоздушной смеси составляет ≈ 1.8 км/с, а скорость газа за фронтом волны ≈ 1 км/с [38]. Следовательно, при скорости тела ≈ 1 км/с его минимальный размер, обеспечивающий инициирование детонации в торе, должен быть не менее 6 м, а при скорости 2 км/с — не менее 3 м. Мы использовали для оценок свойства стехиометрической метановоздушной смеси, поскольку по сечению тора состав смеси меняется от очень бедного до сильно переобогащенного, а метеорит, пересекая тор, неминуемо пересечет область стехиометрии. Возникшая детонация может, распространяясь по тору, затухнуть, если в результате каких-либо неоднородностей химического состава размер легкодетонирующей области станет меньше 60 м. Это может привести к несимметричному взрыву тора и преимущественной закрутке потока продуктов детонации, чем и можно объяснить наличие регулярного отклонения вывала от радиальности.

Численные расчеты траекторий показали, что размеры металлических и каменных (с меньшей на порядок прочностью) метеоритов с «подходящими» (т. е. удовлетворяющими приведенным выше ограничениям) траекториями должны составлять $3 \div 15$ м. Для каждого размера метеорита существует область допустимых значений скорости и угла встречи с поверхностью Земли. На рис. 2 приведены указанные области для железных метеоритов различных размеров. Характерная расчетная «подходящая» орбита трехметрового железного метеорита представлена на рис. 3 (угол и скорость встречи метеорита с поверхностью Земли соответствуют точке 1 на рис. 2). Вид-

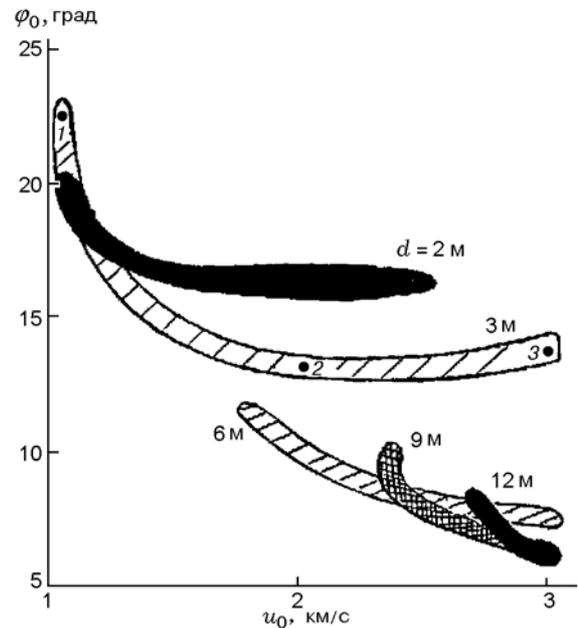


Рис. 2. Область допустимых значений скорости u_0 и угла φ_0 встречи с поверхностью Земли железного метеорита диаметром d

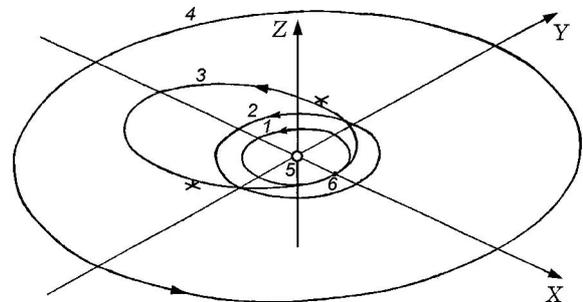


Рис. 3. Расчетное положение орбиты метеорита в Солнечной системе:

аксиометрия орбит: оси в плоскости эклиптики и перпендикулярно ей; 1 — орбита Земли, 2 — орбита Марса, 3 — характерная расчетная орбита метеорита, 4 — орбита Юпитера, 5 — Солнце, 6 — точка встречи Земли и метеорита; крестики лежат в плоскости эклиптики в районах максимального удаления от нее метеорита; размеры двух вертикальных отрезков соответствуют максимальной и минимальной высотам метеорита над плоскостью эклиптики

но, что плоскость орбиты слабо наклонена к плоскости эклиптики, а в точке встречи орбиты метеорита и Земли практически касаются друг друга. Участки трех характерных «подходящих» траекторий движения трехметрового железного метеорита, параметры орбит ко-

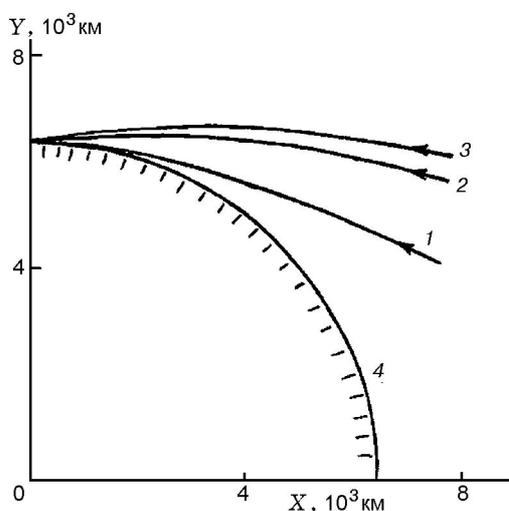


Рис. 4. Характерные «подходящие» траектории метеорита при подлете к Земле: номера траекторий метеорита 1–3 соответствуют точкам 1–3 на рис. 2; 4 — поверхность Земли

торых соответствуют точкам 1–3 на рис. 2, показаны на рис. 4–6. Из рис. 5 видно, что с точки зрения возможности наблюдения метеорита траектория 1 является более вероятной (как самая низкая), и это свидетельствует в пользу низкоскоростного метеорита. Из рис. 6 следует, что в этом случае место падения метеорита находится на расстоянии $20 \div 30$ км от проекции на Землю точки инициирования детонации. Согласно расчетам более крупные метеориты могут упасть и дальше, но не далее 100 км. Области вероятного падения железных и каменных метеоритов представлены на рис. 7.

Подчеркнем еще раз, что метеорит является относительно «медленным» только при подлете к облаку (например, кривая 1 на рис. 5, б). В силу своего «малого» (порядка нескольких метров) размера, метеорит тормозится при движении в атмосфере от «быстрых» (космических) скоростей, которые он имел при подлете к Земле, до «медленных» скоростей (порядка нескольких километров в секунду) при подлете к облаку.

При расчете траектории полета метеорита предполагалось отсутствие его вращения. Оценки возможного вращения метеорита и искривления его траектории за счет силы Магнуса сделаны в нашей работе [6]. Показано, что существенный маневр метеорита маловероятен.

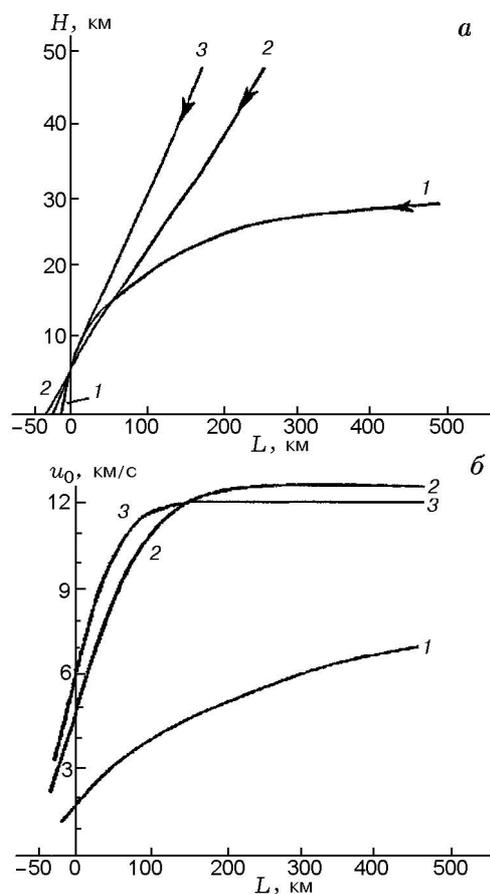


Рис. 5. Характерные зависимости высоты H (а) и скорости u_0 (б) полета метеорита от расстояния L между проекциями на Землю центра тора и метеорита:

точка инициирования детонации находится на высоте 6 км; номера траекторий метеорита 1–3 соответствуют точкам 1–3 на рис. 2

ОЦЕНКА РАЗМЕРА КАПЕЛЬ, СОРВАННЫХ С РАСПЛАВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТЕОРИТА

При полете метеорита его поверхностный слой расплавляется и с расплавленной части начинается срыв жидкости. При этом толщина срываемого слоя практически не зависит от толщины расплавленного слоя и может быть оценена из соотношения $We = \sqrt{Re}$, где $We = \rho U^2 \delta / 2\sigma$, $Re = \rho U \delta / \mu$, а ρ , U , μ — плотность, скорость и вязкость обтекающего газа, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, δ — толщина срываемого слоя [39]. Пленка сорванной жидкости из-за сил поверхностного натяжения распадается на капли размером порядка нескольких δ , которые при застывании образуют шарики.

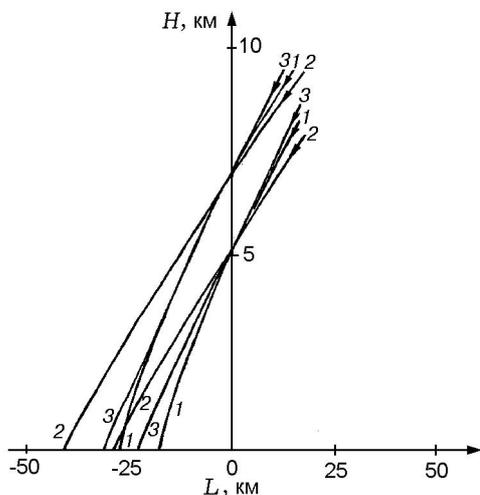


Рис. 6. Заключительные участки «подходящих» траекторий метеорита:

высота точки инициирования детонации принята равной 5 и 7 км; номера траекторий 1–3 соответствуют точкам 1–3 на рис. 2

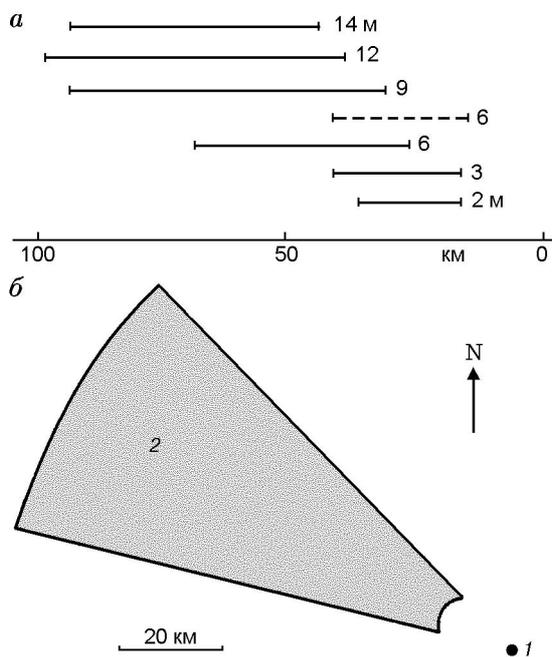


Рис. 7. Области возможного падения метеорита: а: области возможного падения железного (сплошные линии) и каменного (штриховая) метеоритов указанных размеров при азимуте 295°; отсчет ведется от проекции на Землю точки инициирования взрыва; для железного метеорита крупнее 14 м и мельче 2 м, а также при азимуте больше 320° решений нет; б: 1 — проекция эпицентра взрыва на Землю, 2 — сектор возможного падения железных и каменных метеоритов, двигавшихся по «подходящим» траекториям

Подставляя характерные значения величин: $\sigma = 1.84 \text{ Дж/м}^2$, $\mu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}$ [12], скорость метеорита в районе эпицентра 2 км/с, плотность газа на высоте 6 км $\rho = 0.7 \text{ кг/м}^3$ — и учитывая сжатие газа за ударной волной примерно в 6 раз, получаем $\delta \approx 0.1 \text{ мм}$. Отсутствие явно выраженного шлейфа шариков, выпавших до эпицентра взрыва [1, 21, 22], связано, по-видимому, с их рассеиванием с большей высоты. Подчеркнем, что само наличие шлейфа магнетитовых металлических частиц размером порядка 0.1 мм [1, 21, 22] свидетельствует в пользу того, что Тунгусский метеорит был металлическим и низкоскоростным.

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВЫВАЛУ ЛЕСА

Возможность получения при взрыве газового тора вывала в виде бабочки была проверена нами посредством модельного эксперимента (рис. 8). Тор имитировался незамкнутым кольцом из пяти детонирующих шнуров. Общая масса взрывчатки в шнурах равнялась 25 г, масса взрывчатого вещества в капсуле-детонаторе — 1.5 г. Детонатор располагался в нижней части кольца. Разрыв в связке детонирующих шнуров составлял около 2 см. Детонация «обежала» кольцо по часовой стрелке со скоростью приблизительно 7 км/с. Диаметр и средняя высота кольца над поверхностью 15 и 19 см соответственно. Наклон плоскости кольца к горизонтالي 30°. Лес имитировался вертикально стоящими медными проволочками высотой 3 см и диаметрами 2.7 и 0.5 мм, расположенными в шахматном порядке (30 × 30 ячеек) с шагом 5 см. Одна из целей эксперимента состояла в том, чтобы показать статистическую эквивалентность поля проекций на горизонтальную плоскость отклоненных взрывом проволочек и поля вывала леса при Тунгусском взрыве. Планируемая статистическая обработка результатов эксперимента требовала выставить проволочки достаточно точно. Отличие положений их нижних концов от узлов прямоугольной сетки и максимальное отклонение проволочек от вертикали не превышало 1 мм.

При выборе геометрических характеристик эксперимента мы исходили из того, что на расстояниях от эпицентра, соответствующих границам вывала, избыточное давление в модельном эксперименте и при Тунгусской ка-

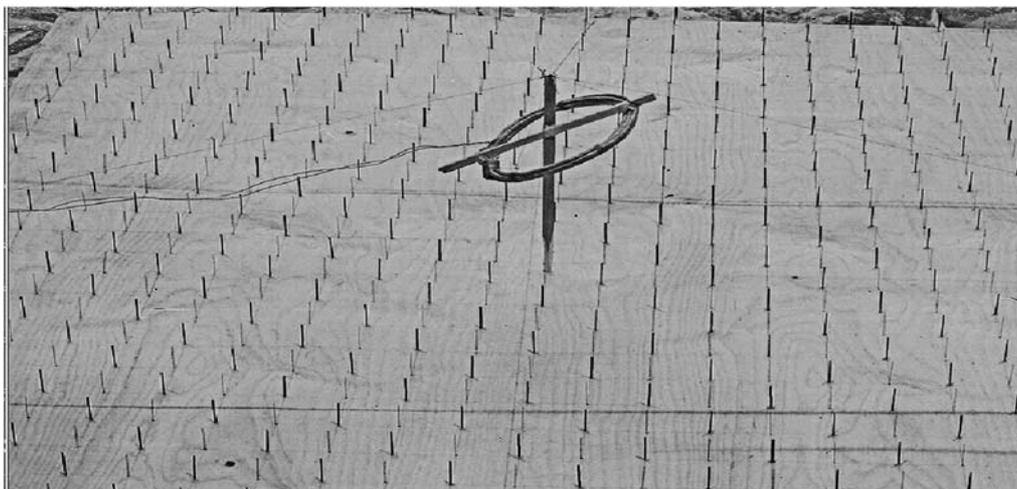


Рис. 8. Фотография общего вида модельного эксперимента по вывалу леса: толстые и тонкие проволоочки расположены в шахматном порядке

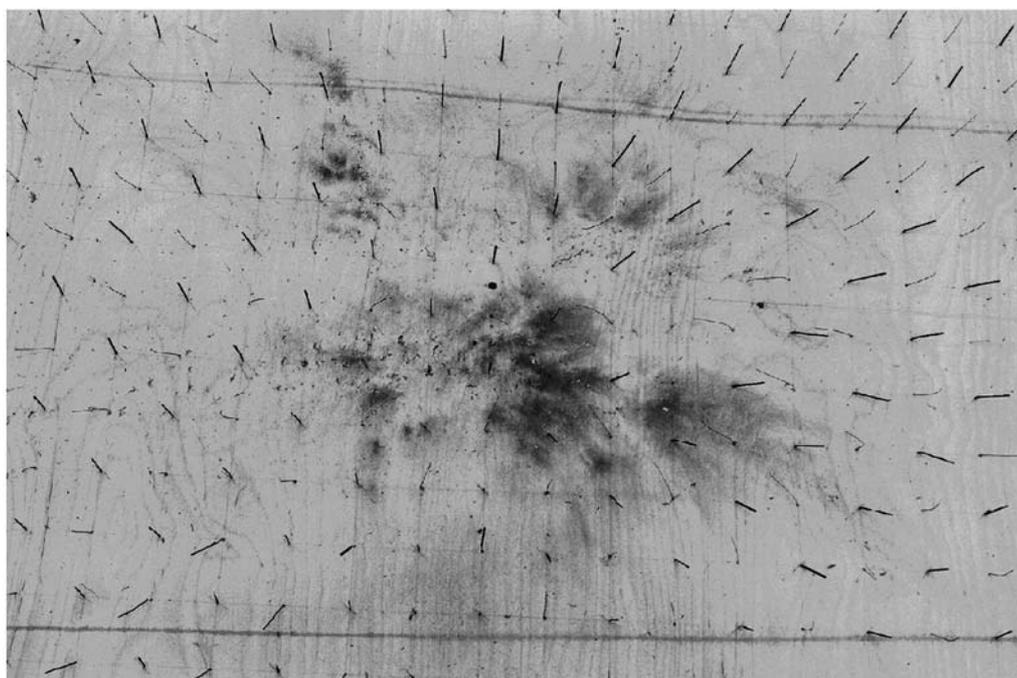


Рис. 9. Фотография общего вида вывала проволоочек в эксперименте (вид сверху): ось симметрии эксперимента проходит посередине рисунка слева направо, нижняя часть кольца располагалась слева; видны области «обратного» вывала проволоочек, где толстые и тонкие проволоочки отклонены в разные стороны

тастрофе должны быть одного порядка величины. Для увеличения точности определения направлений проекций проволоочек кроны деревьев не имитировались. Диаметр тонких проволоочек подбирался таким, чтобы отклонение на расстояниях, характерных границе вывала, было небольшим, но достаточным для измере-

ния. Диаметр толстых проволоочек подбирался таким, чтобы можно было имитировать вывал толстых деревьев и улучшить точность измерений в прилегающей к эпицентру зоне.

Фотографии результатов эксперимента приведены на рис. 9, 10. Характерные виды изгибов проволоочек после взрыва представлены

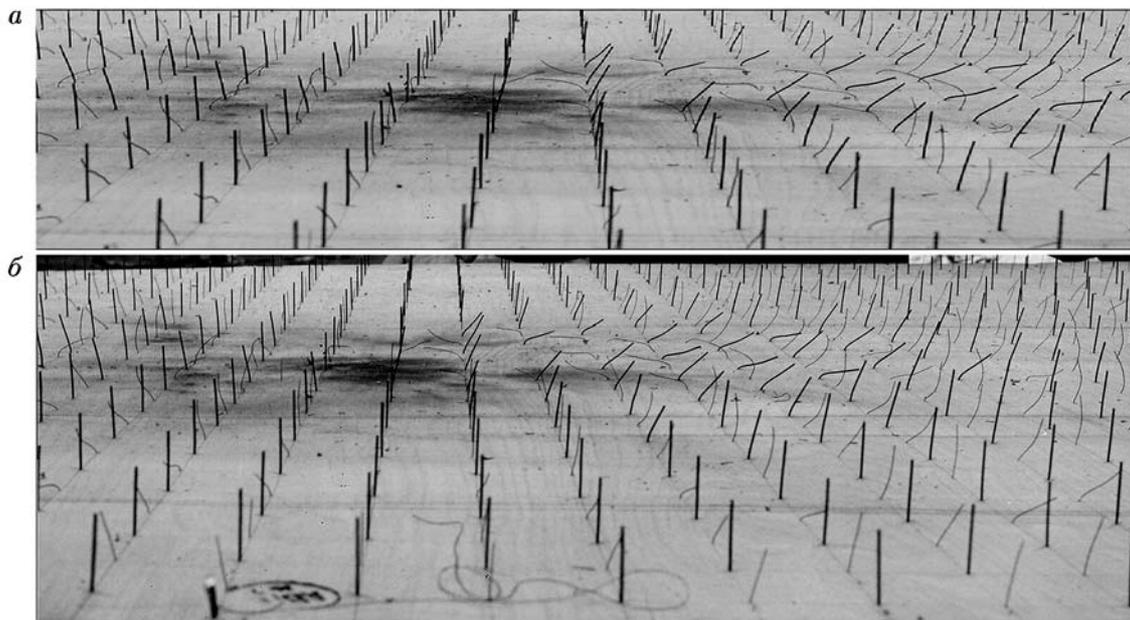


Рис. 10. Фотографии центральной части вывала в эксперименте (вид сбоку): нижняя часть кольца располагалась слева; фото «б» сделано с большего расстояния; видны области «обратного» вывала проволоочек, где толстые и тонкие проволоочки отклонены в разные стороны

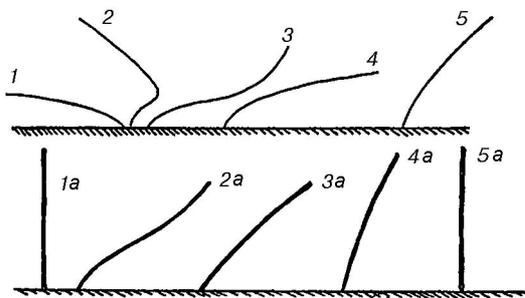


Рис. 11. Виды изгибов проволоочек: 1-5 — тонкие проволоочки, 1а-5а — толстые

на рис. 11 (взрыв за пределами рисунка слева). Общая картина результатов эксперимента показана на рис. 12, результаты статистической обработки эксперимента — на рис. 13. Геометрические размеры модельного эксперимента приведены в пересчете на масштабы Тунгусского вывала. Вблизи центральной части вывала (область внутри кривой 2 на рис. 12) толстые проволоочки практически не отклонились (вид 1а на рис. 11). Это является аналогом «телеграфного» леса Тунгусского вывала. Тонкие проволоочки внутри ограниченной кривой 3 зоны (см. рис 12), несколько превышающей область «телеграфного» леса, имеют «обратное» (т. е. направленное к центру) направ-

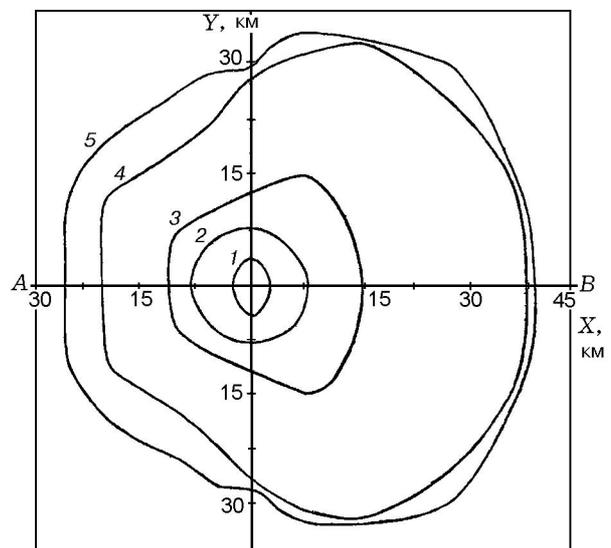


Рис. 12. Результаты эксперимента по вывалу леса:

AB — ось симметрии эксперимента, нижняя часть кольца располагалась слева; 1 — проекция кольца на землю, 2 — граница области «телеграфного» леса, 3 — граница области «обратного» вывала тонких проволоочек, 4 — граница вывала толстых проволоочек, 5 — внешняя граница области заметной волны разрежения

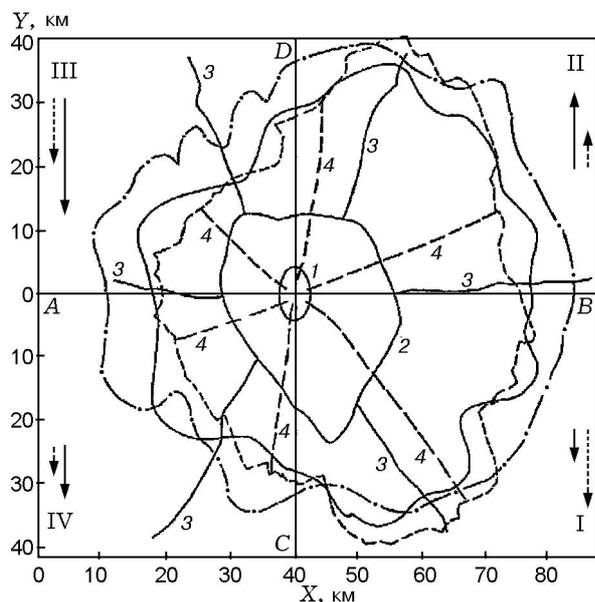


Рис. 13. Результаты статистической обработки эксперимента по вывалу леса:

AB — ось симметрии эксперимента, нижняя часть кольца располагалась слева; 1 — проекция кольца на землю, 2 — зона «хаоса», 3 — огибающие наклона проволочек, 4 — огибающие вывала леса [31]; штриховая линия — граница вывала леса [31], сплошная — граница отклонения толстых проволочек от вертикали на 5° , штрихпунктирная — граница отклонения тонких проволочек на 60° , штриховая стрелка — отклонение вывала леса от радиальности [31], сплошная стрелка — отклонение проволочек от радиальности

ление вывала (виды 1, 2 на рис. 11). В более удаленных от центра зонах направление проекции тонких проволочек на землю меняется на противоположное. При этом тонкие проволочки в зоне, ограниченной кривыми 3 и 5 на рис. 12, имеют характерный загиб на конце: верхняя часть проволочек загнута в направлении центра (форма 3 на рис. 11). Аналогичную форму имеют и толстые проволочки внутри зоны «обратного» вывала (форма 2а на рис. 11). Это связано с последовательным действием на проволочки волн сжатия и разрежения, а также с воздействием отраженной от земли волны сжатия при маховском характере отражения [20, 40]. Таким образом, область, ограниченная снаружи кривой 5 на рис. 12, является в условиях нашего эксперимента областью заметной волны разрежения. В более удаленной от центра вывала зоне (лежит вне кривой 5 на рис. 12) указанные загибы отсутствуют, причем по направлению к периферии вывала на-

клон тонких проволочек постепенно уменьшается (формы 4, 5 на рис. 11). Уменьшается и наклон толстых проволочек (формы 3а, 4а на рис. 11), причем кривая 4 на рис. 12 служит внешней границей их вывала, снаружи которой толстые проволочки не деформированы (форма 5а на рис. 11).

Проведенный эксперимент был статистически обработан. Были измерены координаты проекций всех проволочек на горизонтальную плоскость. При этом центр прямоугольной системы координат совмещен с проекцией центра тора, а координатные оси ориентированы в соответствии с рис. 13.

По известным декартовым координатам проекций и заданной длине легко рассчитать углы отклонения каждой сильно отклоненной, но слабо изогнутой проволочки от вертикали. Для определения угла отклонения сильно изогнутых проволочек использовалась их прикорневая часть. На рис. 13 нанесены внешние границы областей, внутри которых толстые проволочки отклонены от вертикали более чем на 5° , а тонкие — более чем на 60° . Здесь же в аналогичном масштабе и при соответствующей ориентации представлена внешняя граница вывала леса при Тунгусском взрыве по данным [23, 24]. При этом центр вывала леса совмещен с проекцией центра тора на горизонтальную плоскость. Видно, что указанные модельные границы вывала проволочек близки по приведенным размерам и форме и соответствуют приведенной по масштабу реальной границе вывала леса, которая по форме напоминает бабочку. Отметим, что даже на относительно больших расстояниях от центра (на границах «бабочки») имеются небольшие зоны завихренности (на рис. 12, 13 не показаны), дающие беспорядочный вывал.

Из условия минимума среднеквадратического отклонения углов проекций всех проволочек от радиальности $\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 / n = \min \right)$ были определены координаты эффективного центра вывала проволочек. Оказалось, что они практически совпадают с началом координат. Здесь и далее i — номер проволочки, n — общее число проволочек, α_i — угол отклонения проекции i -й проволочки от радиального направления относительно некоторой точки C , принимаемой за центр (рис. 14, где DF — проекция i -й проволочки на горизонтальную плоскость, D —

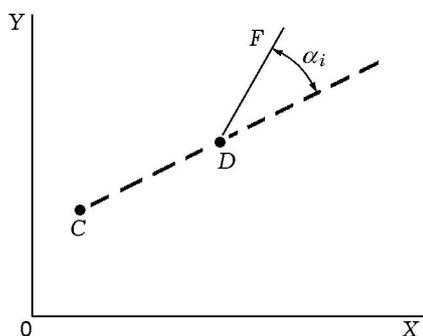


Рис. 14. Проекция проволочки на горизонтальную плоскость и угол отклонения проволочки от радиальности:

α_i — угол отклонения проекции i -й проволочки от радиального направления относительно некоторой точки C , принимаемой за центр; DF — проекция i -й проволочки на горизонтальную плоскость; D и F — нижний и верхний концы проволочки

нижний конец проволочки). В качестве положительного направления для отсчета углов принято направление против часовой стрелки. При статистической обработке эксперимента проволочки, проекции которых направлены к центру («обратный» вывал), не учитывались. Для повышения достоверности результатов проволочки с длиной проекции менее 3.5 мм из рассмотрения исключались. Неотклоненным проволочкам приписывались проекции с радиальным направлением.

Относительно найденного эффективного центра вывала были рассчитаны следующие статистические характеристики отклонения поля проекций проволочек от радиальности:

среднеквадратическое

$$\delta_{\text{кв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2} / n,$$

среднее по абсолютной величине

$$\delta_{\text{абс}} = \sum_{i=1}^n |\alpha_i| / n,$$

среднее алгебраическое

$$\delta_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i / n.$$

Осреднение проводилось как по всему полю вывала, так и для каждого квадранта в отдельности; как по всем проволочкам, так и по толстым и тонким проволочкам в отдельности. Проведены вычисления для проволочек с разными углами отклонения от вертикали. Результаты статистической обработки представлены в таблице, где приведены также соответствующие величины, рассчитанные нами по приведенным в работе [24] интерполяционным значениям поля средних направлений повала деревьев при Тунгусском взрыве.

Видно, что все приведенные в таблице характеристики поля проекций проволочек имеют тот же порядок величины и те же знаки, что и аналогичные величины, соответствующие вывалу леса. Исключение составляет лишь знак δ_{IV} , рассчитанный по толстым проволочкам с отклонением от вертикали, превышающим или равным $\varphi = 5^\circ$. Таким образом,

Результаты статистической обработки модельного эксперимента и данных [31] по вывалу леса

Вид осреднения	$\delta_{\text{кв}}$	$\delta_{\text{абс}}$	$\delta_{\text{ср}}$	δ_{I}	δ_{II}	δ_{III}	δ_{IV}
По толстым проволочкам	15.1	10.2	-0.3	-1.3	5	-10	-1.4
По тонким проволочкам	17.0	10.2	-2.6	-3.0	0.8	-2.6	-8.4
По толстым и тонким проволочкам	16.4	10.6	-2.0	-2.4	2.1	-4.1	-6.6
По толстым и тонким проволочкам без центральных 36 проволочек	16.9	10.8	-2.3	-2.8	1.8	-4.7	-6.7
По толстым проволочкам с $\varphi \geq 5^\circ$	17.3	11.7	-1.1	-2.8	4.6	-15.2	1.9
По толстым и тонким проволочкам с $\varphi \geq 5^\circ$ и $\geq 60^\circ$ соответственно	16.5	10.8	-1.6	-1.7	4.7	-9.6	-2.7
Расчет по данным [31]	6.1	4.7	-2.5	-6.6	2.1	-4.5	-1.4

Примечание. $\delta_{\text{I}} \div \delta_{\text{IV}}$ — величина $\delta_{\text{ср}}$, вычисленная в квадрантах I-IV (рис. 13) соответственно.

принятое нами определение границ вывала в эксперименте по толстым и тонким проволочкам с отклонением $\varphi \geq 5$ и 60° соответственно вполне оправданно, так как в этом случае все статистические характеристики модельного и реального вывалов близки по порядку величины и совпадают по знаку. Для наглядности на рис. 13 величины $\delta_I \div \delta_{IV}$, соответствующие Тунгусскому вывалу и осреднению по толстым и тонким проволочкам с отклонениями $\varphi \geq 5$ и 60° соответственно, представлены в виде стрелочек. Длина и направления стрелочек соответствуют модулю и знаку указанных величин.

Наличие ненулевых значений $\delta_{кв}$, $\delta_{абс}$, $\delta_{ср}$ и совпадение знаков у величин δ_{III} и δ_{IV} свидетельствуют о наличии общей «закрутки» вывала леса и проволочек и несимметрии отклонения вывала леса и проволочек от радиальности. В нашем модельном эксперименте общая закрутка потоков продуктов детонации имитировалась путем установления зазора между детонатором и одним из концов тора (детонация по кольцу шла только в одном направлении). Отметим, что общую «закрутку» вывала леса и проволочек и несимметрию отклонения вывала леса и проволочек от радиальности трудно объяснить в рамках традиционного рассмотрения Тунгусского события как точечного взрыва или разрушающегося в атмосфере космического тела.

Семейство огибающих поля направлений вывала проволочек строилось путем интегрирования уравнения $\frac{dy}{dx} = \xi(X, Y)$. Значение угла $\xi(X, Y)$ в точке с прямоугольными координатами (X, Y) определялось линейной интерполяцией значений в ближайших узлах сетки. Семейство огибающих, построенное по указанной методике, представлено на рис. 13. Видно, что вне области, ограниченной замкнутой кривой 2, поле течений имеет в целом радиальный характер. Внутри упомянутой центральной области вследствие большой степени хаотичности (наличие тонких проволочек с преимущественно «обратным» вывалом) огибающие не могут быть построены с достаточной достоверностью, поэтому на рисунке не приведены. На этом же рисунке нанесены огибающие поля вывала леса, рассчитанные в [24]. Видно, что оба семейства в целом носят радиальный характер и соответствие между ними вполне удовлетворительное. Отметим, что построение изоклин не дает каких-либо наглядных резуль-

татов, они ведут себя достаточно хаотично и не отображают каких-либо физических особенностей процесса. В отличие от изоклин, физическим смыслом обладают огибающие: их направления соответствуют направлению газового потока.

Как следует из приведенных выше результатов, вывал проволочек в модельном эксперименте похож на реальную картину вывала леса при Тунгусском взрыве [23, 24] не только чисто внешне (совпадение «бабочек» вывала, наличие «телеграфного» леса и «обратного» вывала), но и эквивалентен ей статистически (схожесть огибающих, наличие общей «закрутки» вывала и равенство порядков величин и знаков соответствующих отклонений от радиальности). Таким образом, данный эксперимент показывает, что основные характеристики вывала леса при Тунгусском взрыве вполне соответствуют взрыву газового тора.

Ставя описанный модельный эксперимент, мы не предполагали, что результаты могут иметь абсолютно доказательную силу. Цель эксперимента (и она достигнута) — показать, что в принципе вывал леса от взрыва наклонного тора качественно не противоречит реальному, включая такие тонкости, как отклонение от радиальности в целом и по квадрантам. Как показала статистическая обработка проведенного эксперимента, по-видимому, можно было подобрать параметры тора такими, чтобы совпадение было почти полным. Однако, поскольку полного моделирования реальности данный эксперимент не дает (например, отсутствие рельефа местности и градиента плотности атмосферы по высоте, непропорционально большая длина проволочек), подобная подгонка не имеет смысла.

Следует отметить, что модельный эксперимент по вывалу леса при Тунгусском взрыве, проведенный в отличной от нашего эксперимента постановке, описан в работах [41, 42]. Исследование выполнено в рамках гипотезы о Тунгусском событии как результате входа в атмосферу космического тела. Баллистическая волна от тормозящегося и разрушающегося тела имитировалась взрывом детонирующего шнура с утолщением на конце, расположенным под углом к горизонтальной плоскости с вертикально стоящими проволочками. Получено некоторое сходство формы внешней границы области изгиба проволочек с границей вывала леса при Тунгусском взрыве. Однако,

в отличие от проведенного нами эксперимента, аналогов «телеграфного» леса, «обратного» вывала и «закрутки» вывала получено не было.

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЖОГУ ЛЕСА

Для моделирования картины ожога леса был выполнен следующий эксперимент. Посредством фотодиода измерялась зависимость освещенности J горизонтальной поверхности от расстояния и направления. Источником света служил светящийся тор, изготовленный из полупрозрачного кабеля с расположенными внутри лампочками. Средняя высота над уровнем датчика и внешний диаметр тора равнялись 5 см, диаметр кабеля — 1.25 см. Угол между плоскостью тора и горизонтальной поверхностью составлял 30° . При измерениях чувствительная область фотоприемника располагалась либо горизонтально, либо под углом, обеспечивающим максимальный сигнал. На рис. 15 приведены измеренная кривая равной освещенности и граница ожога по расчетам [29, 30] (этим расчетам соответствует горизонтальная ориентация датчика). Координаты модельного эксперимента также пересчитаны на реальные. Видно, что области ожога в первом приближении представляют собой круги со смещенными центрами, что удовлетворительно соответствует реальной картине ожога

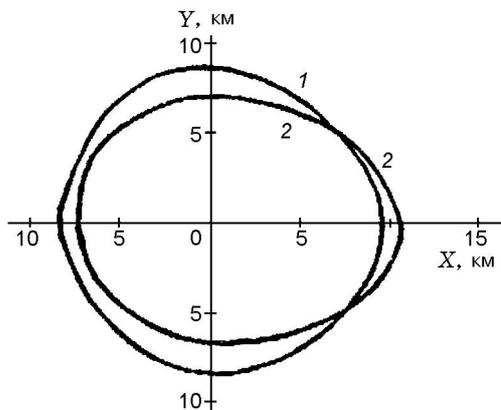


Рис. 15. Результаты модельного эксперимента по ожогу леса (кривые равной освещенности):

горизонтальная ориентация фотоприемника, $J/J_{\max} = 0.3$; нижняя часть кольца располагалась слева; 1 — эксперимент, 2 — расчет [29, 30]

при Тунгусском взрыве.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ, СВЯЗАННЫХ С ТУНГУССКИМ СОБЫТИЕМ

Продуктами полного сгорания метана являются углекислый газ и водяной пар, причем, как следует из уравнения реакции, масса водяного пара составляет $M = 2.25M_0 = 450$ кт (M_0 — масса сгоревшего метана). Если это количество водяного пара сублимируется в мезоплаузе в кристаллы льда, которые имеют размер $d \approx 1$ мкм, то число таких кристаллов будет равно $N = 6M/\pi\rho_{\text{л}}d^3$, где $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда, а их суммарная площадь поверхности равна $S_{\Sigma} = N\pi d^2/4$. Если эти кристаллы равномерно распределить над поверхностью Земли, то средняя отражающая способность серебристых облаков, образованных такими кристаллами, составит отношение половины суммарной площади S_{Σ} к площади поверхности Земли: $\eta = 0.5S_{\Sigma}/4\pi R_{\text{З}}^2 \approx 0.7 \cdot 10^{-3}$ (здесь $R_{\text{З}}$ — радиус Земли). Величина η характеризует долю отраженного солнечного света, т. е. яркость серебристых облаков, при сделанных предположениях она составляет $0.7 \cdot 10^{-3}$ яркости Солнца, что более чем на два с половиной порядка превышает яркость Луны [12]. Подобная яркость серебристых облаков имеет место при их обычном образовании, вызванном горением водорода в термосфере. Образующийся при этом пар, диффундируя вниз, на высоте мезоплаузы при флуктуационных уменьшениях температуры сублимируется, образуя серебристые облака с отражающей способностью $\eta = 4 \cdot 10^{-3}$. Такой механизм образования серебристых облаков предложен и обоснован нами ранее [14]. Наличие широкого спектра размеров указанных кристаллов уменьшает яркость серебристых облаков в видимом спектральном диапазоне, а повышенная концентрация водяного пара вдоль траектории ветров приводит к увеличению их яркости. Следовательно, наличие серебристых облаков над Евро-Азиатским материком вполне можно объяснить сгоранием метана, выброшенного во время Тунгусской катастрофы. Отметим важную роль собственно взрыва метана. Только благодаря ему продукты сгорания метана могли достигнуть мезосферы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей статье и в предыдущих работах [5, 6] нами выполнены следующие исследования: (а) предложена общая картина Тунгусского события; (б) проведены модельный эксперимент по вывалу леса и соответствующая статистическая обработка; (в) выполнен модельный эксперимент по ожогу леса; (г) объяснено отсутствие значительного количества метеоритного вещества в области эпицентра, оценен размер микрокапель, сорванных с расплавленной поверхности метеорита; (д) рассчитаны «подходящие» траектории метеорита, оценены его максимальный и минимальный размеры; (е) сделана оценка места падения метеорита; (ж) оценены возможная скорость вращения метеорита и связанное с ней изменение его траектории; (з) показана газогидратная природа выброса метана, указана область, откуда произошел выброс газа и «камней Джона»; (и) дано объяснение световым, акустическим и атмосферным явлениям (серебристые облака, озонный слой, магнитная буря), связанным с Тунгусским событием. Полученные результаты позволяют идентифицировать Тунгусскую катастрофу со взрывом метановоздушного облака, инициированным небольшим, «медленно» летящим метеоритом. Такое рассмотрение не противоречит известному фактическому материалу и объясняет все особенности явления.

Остается открытым вопрос о вероятности встречи метеорита с метановоздушным облаком. Такая вероятность может быть оценена как произведение вероятностей двух независимых событий: выброса метана и пролета в нескольких километрах от поверхности Земли метеорита, имеющего достаточный для инициирования детонации размер. Такая оценка, по-видимому, может быть проведена, хотя и с весьма низкой точностью. Например, нет исчерпывающих данных по количеству мощных выбросов метана в год в обширных, но малонаселенных районах Сибири, Северного Ледовитого океана и Канады. С другой стороны, следует иметь в виду, что рассматриваемые события могут и не быть независимыми. Выброс метана мог быть спровоцирован ударной волной от летящего метеорита, которая в грунте распространялась быстрее, чем в воздухе. Скорость сейсмических волн в районе Тунгусского феномена достигает 8.5 км/с [11], что может быть существенно выше скорости полета метеорита уже за сотни километров от эпицентра

(кривая 1 на рис. 5,б). В этом случае вероятность встречи метеорита с облаком многократно возрастает по сравнению с оценкой, базирующейся на предположении о независимости двух рассматриваемых событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев В. К., Зигель Ф. Ю. Тунгусское диво. — Екатеринбург: Баско, 1998.
2. Васильев Н. В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. — М.: Русская панорама, 2004.
3. Зигель Ф. Ю. К вопросу о природе Тунгусского тела. Метеоритные и метеорные исследования. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 151–161.
4. Nistor I. Tunguska — the «gas pouch» hypothesis // Intern. Workshop Tunguska 96: Program. Abstracts. Participants. Bologna (Italy), July 14–17, 1996.
5. Николаев Ю. А. Гипотеза о природе Тунгусского метеорита // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 1. — С. 120–122.
6. Николаев Ю. А., Фомин П. А. Тунгусская катастрофа как взрыв метановоздушного облака, инициированного небольшим медленно летящим металлическим метеоритом // Тунгусский вестн. КСЭ. — Томск, 1998. — № 9. — С. 8–18.
7. Тунгусский угольный бассейн // Большая советская энциклопедия. — 1977. — Т. 26. — С. 897–898.
8. Кузнецов Ф. А., Конторович А. Э. Газовые гидраты Сибири. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — С. 222–230.
9. Сапронов Н. Л., Соболенко В. М. Некоторые черты геологического строения Куликовского палеовулкана нижнетрастового возраста // Проблемы метеоритики. — Новосибирск: Наука, 1975. — С. 13–19.
10. Сапронов Н. Л. Древние вулканические структуры на юге Тунгусской синеклизы. — Новосибирск: Наука, 1986.
11. Ольховатов А. Ю. Что мы знаем о Тунгусском событии? // Наука в России. — 1998. — № 3. — С. 46–49.
12. Таблицы физических величин: справочник / ред. И. К. Кикоин. — М.: Атомиздат, 1976.
13. Атмосфера: справочник (справочные данные, модели) / ред. Ю. С. Седунов и др. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991.
14. Николаев Ю. А., Фомин П. А. О природе серебристых облаков и озонного слоя Земли // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 4. — С. 3–13.
15. Васильев Н. В., Журавлев В. К. и др. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. — М.: Наука, 1965.

16. **Истомин В. А., Якушев В. С.** Газовые гидраты в природных условиях. — М.: Недра, 1992.
17. **Родионова Т. В., Солдатов Д. В., Дядин Ю. А.** Газовые гидраты в экосистеме Земли // Химия в интересах устойчивого развития. — 1998. — № 6. — С. 51–74.
18. **Действие ядерного оружия.** — М.: Воен. изд-во Минобороны, 1963.
19. **Анфиногенов Д. Ф., Будаева Л. И.** Камень-загадка в эпицентральной зоне Тунгусской катастрофы // Тунгусский вестн. КСЕ. — 1998. — № 9. — С. 35–43.
20. **Станюкович К. П.** Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971.
21. **Васильев Н. В., Журавлев В. К. и др.** Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита // Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. / ред. М. В. Тронов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1967. — С. 5–20.
22. **Флоренский К. П.** Предварительные результаты Тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г. // Метеоритика: сб. статей / ред. В. Г. Фесенков. — 1963. — Вып. 23. — С. 3–29.
23. **Фаст В. Г.** Статистический анализ параметров Тунгусского вывала // Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2 / ред. М. В. Тронов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1967. — С. 40–61.
24. **Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А.** О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита // Вопросы метеоритики. Проблема Тунгусского метеорита: сб. статей / ред. Н. В. Васильев. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. — С. 39–52.
25. **Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф. и др.** Показания очевидцев Тунгусского падения. — Томск, 1981. — Деп. в ВИНТИ 24.11.81, № 5350-81.
26. **Суслов И. М.** Опрос очевидцев Тунгусской катастрофы в 1926 г. // Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2 / ред. М. В. Тронов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1967. — С. 21–30.
27. **Львов Ю. А., Васильев Н. В.** Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита // Вопросы метеоритики. Проблема Тунгусского метеорита: сб. статей / ред. Н. В. Васильев. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1976. — С. 53–57.
28. **Коненкин В. Г.** Сообщения очевидцев о Тунгусском метеорите 1908 года // Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2 / ред. М. В. Тронов. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1967. — С. 31–35.
29. **Коробейников В. П., Путятин Б. В. и др.** Об эффектах излучения в условиях неоднородной атмосферы при Тунгусском явлении // Метеоритные и метеорные исследования / отв. ред. Ю. А. Долгов. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 5–24.
30. **Коробейников В. П., Чушкин П. И. и др.** Тунгусский феномен: газодинамическое моделирование // Следы космических воздействий на Землю / отв. ред. А. Н. Дмитриев. — Новосибирск: Наука, 1990. — С. 59–79.
31. **Кузнецов Ф. А., Дядин Ю. А., Родионова Т. В.** Газовые гидраты — неисчерпаемый источник углеводородного сырья // Рос. хим. журн. — 1997. — Т. XLI, № 6. — С. 28–34.
32. **Максимов, А. М., Якушев В. С., Чувиллин Е. М.** Оценки возможности выброса газа при разложении газовых гидратов в пласте // Докл. АН. — 1997. — Т. 352, № 4. — С. 532–534.
33. **Нигматулин Р. И., Шагапов В. Ш., Насырова Л. А.** «Тепловой удар» в пористой среде, насыщенной газогидратом // Докл. АН. — 1999. — Т. 366, № 3. — С. 337–340.
34. **Эттингер И., Боярский В.** Две катастрофы — одна гипотеза // Наука и жизнь. — 1988. — № 2. — С. 94–95.
35. **Henderson С. В.** Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows // AIAA Journal. — 1976. — V. 14, N 6. — P. 707–708.
36. **Васильев А. А., Зак Д. В.** Детонация газовых струй // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 82–88.
37. **Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 109–131.
38. **Николаев Ю. А., Топчиян М. Е.** Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 3. — С. 393–404.
39. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Шерпанев С. М., Тимофеев Е. И.** О механизме смесеобразования за ударной волной, скользящей по поверхности жидкости // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 5. — С. 86–93.
40. **Баженова Г. В., Гвоздева Л. Г. и др.** Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн в газах. — М.: Наука, 1976.
41. **Зоткин И. Т., Цикулин М. А.** Моделирование взрыва Тунгусского метеорита // Докл. АН СССР. — 1966. — Т. 167, № 1. — С. 59–62.
42. **Зоткин И. Т., Цикулин М. А.** Моделирование Тунгусского взрыва // Природа. — 1966. — № 6. — С. 81–89.

*Поступила в редакцию 12/III 2010 г.,
в окончательном варианте — 11/V 2010 г.*