

НОВЫЕ ПОИСКИ, НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕДИЦИЯ 1961 ГОДА

К.П.Флоренский

Кандидат геолого-минералогических наук Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского АН СССР (Москва)

И.Т.Зоткин

Комитет по метеоритам АН СССР (Москва)

«Тунгусским дивом» назвал Л.А.Кулик падение Тунгусского метеорита. Он в общем верно оценил все явления, рассматривая наземные разрушения, произведенные метеоритом, как результат действия «головной воздушной волны», пришедшей сверху¹. Образно он так рисовал эту картину: «Струю огненной из раскаленных газов и холодных тел метеорит ударил в котловину с ее холмами, тундрой и болотом и, как струя воды, ударившись в плоскую поверхность, рассеивает брызги на все четыре стороны, так точно и струя из раскаленных газов с роем тел вонзилась в землю и непосредственным воздействием, а также и взрывной отдачей произвела всю эту мощную картину разрушения»².

Однако наука того времени не имела ни теории движения и ударов тел, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, ни их энергетических аналогий в виде изученных крупных взрывов сопоставимой (порядка 10^{23} эрг) мощности. Это привело к созданию упрощенных, наивных представлений, направивших все внимание Кулика на поиски отдельных крупных кусков метеорита. Так как мерзлотоведение (геокриология) в те времена находилось еще в стадии становления, сразу не удалось расчленить два совершенно независимых явления, и поиски метеоритных глыб производились в воронках, оказавшихся термокарстовыми. Создание теории кратерообразующих метеоритов (К.П.Станюкович, В.В.Федынский) совпало с временным прекращением работ в районе падения Тунгусского метеорита и содействовало отнесению Тунгусского метеорита к группе кратерообразующих, что и допускалось до новых исследований района.

Астрономическая характеристика Тунгусского тела оставалась нечеткой вследствие отсутствия прямых данных о его траектории. К тому же взгляды на природу малых тел

¹ См. Известия Российской академии наук, 1922, стр. 391.

² Л.А.Кулик. За Тунгусским дивом. Красноярск, 1927, стр. 15.

солнечной системы (астероидов, метеоров, метеоритов и комет) существенно уточнились лишь за последние годы.

При таком положении вопроса вопреки завету Исаака Ньютона — *Hypotheses non fingo* (не изобретать гипотез) — в популярной литературе Тунгусский метеорит по существу стал объектом приложения остроумия для решения вопроса о его природе. Причины выдвигаемой гипотезы иногда не укладывались ни в рамки уже известных фактов, ни в общее состояние современной науки. Несмотря на предупреждение ученых о неправильности этого пути, как погони за лженаучными сенсациями³, такое отношение получило распространение среди молодежи, проникая иногда на страницы журналов. Это привело к тому, что, за рубежом популярная печать в ряде случаев ставила вопрос о Тунгусском метеорите наравне со знаменитыми «летающими блюдами», а все неясности относилась за счет «железного занавеса», из-за которого якобы и проскальзывают сенсационные данные, например, о ядерном характере взрыва⁴.

РАЙОН ПАДЕНИЯ

Послевоенное изучение района падения Тунгусского метеорита началось с кратковременного посещения его в 1953 г. К.П.Флоренским. Наибольшие результаты дали экспедиции Академии наук в 1958 и 1961 годах, проведенные как комплексное исследование района падения в целом. В 1959–1961 гг. там работала группа любителей-энтузиастов, поддержанная Сибирским отделением АН СССР и возглавляемая Г.Ф.Плехановым, которая вошла в комплексную экспедицию АН СССР в 1961 г., и группа А.В.Золотова.

Что же мы сейчас знаем о метеорите на основании изучения района его падения?

Уже первые указания эвенков говорили, «что-то прилетело, повалило и подожгло лес». Л.А.Кулик обнаружил большой радиальный вывал леса, в районе р. Хушма к северо-западу от пос. Ванавара, который близко совпадал с эпицентром барической и сейсмической волны, определенным А.В.Вознесенским⁵. Предпринятые самостоятельной группой попытки связать место падения метеорита с другими вывалами леса дали отрицательный ответ⁶. Обследованные вывалы оказались обычными ветровалами. Столь же безрезультатными были поиски метеоритных кратеров или других видов наземных разрушений. Часть подозрительных мест оказалась карстовыми воронками, связанными с выходами гипсов,

³ См. «Природа», 1959, №12, стр. 3–6.

⁴ См. *Max B. Miller. Flying Saucers fact or fiction?* N. 1.

⁵ См. *Е.Л.Кринов. Тунгусский метеорит.* Изд-во АН СССР, 1949.

⁶ См. «Природа», 1961, №7, стр. 98–99.

другая с термокарстовыми процессами в болотах, некоторые разрушения, описанные по слухам (например, Сухая Речка на Лакуре), вообще не обнаружены.

Представления о существовании погребенного кратера на дне Южного болота полностью опровергнуты результатами работ экспедиции 1958 г., а также Ю.А.Львова и других (1960) и группы болотоведов под руководством Н.И.Пьявченко (1961). Большой возраст образования термокарстов противоречит вероятности возникновения их под воздействием отдельных метеоритных масс, как это допускал Б.И.Вронский⁷. Таким образом, сейчас можно определенно утверждать, что наземный кратер, который мог бы соответствовать всей энергии падения (порядка 10^{23} рэ), отсутствует и распад метеорита произошел в воздухе.

Никаких явно выраженных изменений в гидрологическом режиме болот в связи с событием 1908 . обнаружено также не было. Постепенное заболачивание краевой зоны болот и образование полузатопленного сухостоя типично для многих болот этого района и к падению метеорита никакого отношения не имеет.

КАРТА ПОВАЛЕННОГО ЛЕСА

Составленная в 1961 . карта поваленного леса (рис.) достаточно подробна и охватывает весь вывал площадью около 2000 км^2 . Каждая изображенная на ней стрелка соответствует среднему направлению группы примерно из 100 поваленных стволов, причем имеются все данные для определения разброса их направления, и отражает силу ударной волны в каждой точке. Физико-математический анализ этой карты позволит восстановить направление фронта и амплитуду головной ударной волны, возникшей при взрыве метеорита. Для более детального анализа заложено около 150 лесотаксационных площадей, а крупномасштабная карта центральной части вывала позволяет уточнить влияние рельефа, расположение сохранившихся деревьев и другие особенности.

При взгляде на карту видно, что общая форма вывала напоминает треугольник, симметричный относительно юго-восточного варианта траектории метеорита, а эпицентр удара заметно смещен к северо-западу. В центре вывала находится зона стоячего, погибшего от пожара леса, впоследствии беспорядочно поваленного в разные стороны ветром. Эта картина свидетельствует о значительной высоте центра волны, пришедшей сверху. Очень характерно, что направленный вывал вблизи эпицентра возникает прежде всего на **н а р у ж н ы х** склонах холмов, т. е. там, где направление фронта волны образует наименьший угол с поверхностью земли.

⁷ См. «Природа», 1960, №3, стр. 88–91.

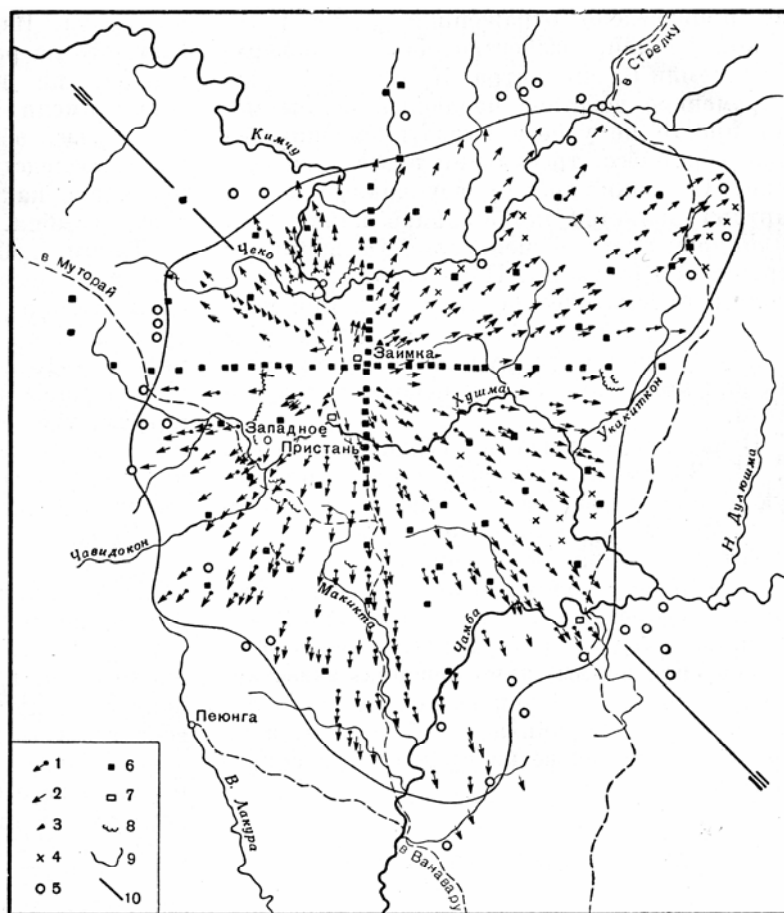


Рис. 1. Карта поваленного леса, по данным 1961 года: 1, 2, 3 — среднее направление поваленных деревьев; 4 — места, где повал деревьев замечен с трудом; 5 — места, где вывал леса отсутствует; 6 — расположение лесотаксационных площадей; 7 — избушки; 8 — границы продвижения пожара по аэровизуальным данным; 9 — общая граница площади поваленного леса; 10 — юго-восточный вариант траектории метеорита

Радиус зоны «стоячего леса», «хаотического вывала», «безразличия», как он называется в разных отчетах, определен в 3–5 км, что позволяет подойти к расчету высоты «взрыва».

Направление поваленных деревьев в зонах вывала — радиальное, и следов осевой симметрии в нем пока не обнаружено. Однако вряд ли из этого можно делать вывод об истинной сферичности взрывной волны, соответствующей центральному точечному взрыву, и игнорировать действие цилиндрической баллистической волны летящего тела.

Такой характеристикой обладает только падающая волна, в то время как разрушение произведено отраженной ударной головной волной, разбегающейся по поверхности земли от эпицентра. Кроме того, кратковременное действие падающей волны может просто не успеть вызвать падения дерева — процесс, требующий известного времени. С точки зрения аэродинамики вся картина является комбинацией наклонного цилиндрического и центрального взрыва с отражением от земли. Пока не удалось преодолеть математические трудности при полном расчете, а применение упрощенных схем и приближенных формул не имеет смысла, так как может привести к неверным результатам.

В частности, вовсе не убедителен вывод А.В.Золотова⁸, который определяет малую скорость болида на основании одного (!) произвольно выбранного среди массы сухостоя дерева, у которого неизвестно, когда и почему обломаны сучья с одной стороны. Кроме того, та предпосылка, что толщина обломанных сучьев пропорциональна силе волны, явно неверна: известно, что хвойное дерево при ветровале часто ломается или выворачивается с корнем, в то время как гибкие ветви практически сохраняются целиком.

СВЕТОВОЙ ОЖОГ ИЛИ ПОЖАР?

Не вызывает сомнения незаконность определения скорости по отождествлению температуры ударной волны и цветовой температуры болида. Энергия светового излучения Тунгусского взрыва, исчисленная А.В.Золотовым, прямо противоречит наблюдаемым фактам.

Как известно, после падения метеорита возник лесной пожар, который далее распространялся естественным путем. Изучение особенностей этого пожара (Н.П.Курбатский, Г.М.Зенкин и др.) показало, что пожар возник в некоторых местах, а деревья горели уже после того, как были повалены в течение нескольких (не менее 5) дней. В центральной части вывала сохранилось достаточное количество живых деревьев, на сучках которых были обнаружены ориентированные повреждения 1908 г., позволяющие оценить величину светового импульса метеорита. Изучение сотен сучков показывает, что на расстоянии до 7–9 км от эпицентра, на верхней стороне веток, которые имели в 1908 г. толщину не более 8–15 мм, обычно встречаются повреждения (впоследствии заросшие), которые можно расценить как физиологический ожог (прогрев) камбия.

Таким образом, нижний предел светового импульса определяется возгоранием лесной подстилки, гнилушек, сухой травы и т. д., вызвавшим лесной пожар (порядка 5–10 кал/см²), а верхний — толщиной коры на сучках в 10–15 мм диаметром, уже достаточно надежно защитивший живой камбий от теплового повреждения (нагрев до 60–70 °С), что, по предварительным данным, можно оценивать в порядке 15 кал/см².

Чрезвычайно любопытно, что по ориентировке таких повреждений удастся определить центр лучеиспускания, который, по данным Г.М.Зенкина, находится на высоте около 5 км, в 1,5 км к юго-востоку от эпицентра воздушной волны. В то же время, если принять данные А.В.Золотова (полученные опять-таки по одному дереву), обнаружившего «следы возгорания» сырого дерева вблизи от вероятной траектории метеорита, в 17–18 км от эпицентра — 65–100 кал/см², то световой импульс вблизи эпицентра должен быть на два

⁸ См. ДАН СССР, т. 140, 1961, №1, стр. 103–106.

порядка (!) больше фактически определенного при тщательном исследовании. А на основании столь проблематичных данных приходят к утверждению, что световой импульс составлял до 30% от полной энергии Тунгусского метеорита, что сближает его действие с ядерным взрывом! На самом же деле, анализируя характер ударной волны и светового импульса, мы видим, что все явление происходило с малыми плотностями энергии и не носит следов больших концентраций ее в одной точке.

ИНТЕНСИВНОСТЬ РОСТА ЛЕСА

Большой интерес среди лесоводов вызвал установленный в 1958 г. факт ускорения роста леса в этом районе после 1908 г. Впоследствии этим вопросом занимались В.И.Некрасов, Ю.М.Емельянов⁹ и другие. В составе экспедиций 1961 г. работала группа лесоводов (В.И.Некрасов, В.Г.Бережной, Г.И.Драпкина и др.), которая проводила лесотаксацию и изучение лесов этого района.

Как известно, выделение биологически активного фактора всегда представляет трудную задачу. Однако эта чисто биологическая задача в составе метеоритной экспедиции должна ставиться иначе, а именно: повлияло ли падение Тунгусского метеорита на рост леса прямым образом — например, внесением остатков метеорита, сыгравшим роль микроудобрений, или только косвенно, вызвав изменение природных условий роста (вследствие пожара и корчевки леса и т. д.). Иначе: что дает изучение роста леса для понимания природы Тунгусского метеорита?

Проведенные исследования показывают, что в этом районе лесные пожары с вывалом леса, произошедшие от других причин, в другие годы (1896, 1937 и т. д.), действуют аналогичным образом. Кроме того, рост болотных сообществ, в том числе и деревьев, не показывает изменений; характер почвенной микрофлоры, отсутствие стимуляции прорастания овса на почвах этого района, область общего распространения ускоренного роста, близко совпадающего с границами разрушений, полное несовпадение их с распределением метеоритного вещества, установленного другими методами, — все это говорит о том, что здесь мы имеем не прямое воздействие метеорита, а влияние его падения на общее изменение экологических условий леса. Таким образом, сейчас есть все основания полагать, что это явление представляет интерес для лесоводов и, возможно, послужит основой для ряда практических рекомендаций по ведению лесного хозяйства, но не имеет значения для выявления природы и состава Тунгусского метеорита.

⁹ См. «Природа», 1962, №2, стр. 102–105.

Поиски рассеянного вещества метеорита геохимическими методами, путем непосредственного анализа почв и золы деревьев, результатов не дают. Это же относится и к определению радиоактивности в почвах, растениях и золе деревьев из этого района. Несмотря на то, что в популярной литературе и в газетах не раз отмечалась якобы повышенная активность образцов, тщательная радиохимическая проверка, произведенная под руководством проф. В.И.Баранова, этого не подтверждает. Послойный анализ деревьев на соотношение изотопов Sr^{90} и Ce^{144} показывает, что все наблюдаемые изменения связаны с временным заражением радиоактивными осадками и ничего необычного не представляют, содержание радиоуглерода C^{14} — нормальное, а суммарное определение радиоактивности не имеет никакого научного интереса, что признают и авторы упомянутых работ.

Определенный биологический интерес представляет работа, проведенная по динамометрии повала деревьев. Оказывается, что в этих условиях и «ветровальные» и «ветроустойчивые» породы деревьев одного диаметра требуют примерно одинакового усилия для выворота с корнем. По-видимому, это связано с тем, что в условиях мерзлых или холодных почв корневая система всех пород развивается однотипно («тарелкой» вдоль поверхности земли) и не дает развития центрального корня «редькой», характерного для некоторых пород в теплых почвах.

ХАРАКТЕР РАССЕЙННОГО ВЕЩЕСТВА

При полете и разрушении Тунгусского метеорного тела в атмосфере должны были образоваться разные формы дисперсности вещества, имевшие совершенно различный характер рассеивания по поверхности земли. Можно считать вероятным по крайней мере наличие следующих типов:

1. Пылевой и газовый хвост, оторвавшийся в самых верхних слоях атмосферы, вызвавший светлые ночи и рассеянный по поверхности земли.
2. Рассеявшийся без следа ионизированный газ по следу метеорита.
3. Жидкие и парообразные конденсирующиеся продукты, сдуваемые с раскаленной поверхности и образующие след летящего тела. Крупные фракции следа, имеющие форму расплавленных капелек, застывающих в метеорные шарики, могут достигать поверхности земли более или менее выраженной полосой.
4. Продукты «взрыва» метеорита. Их состояние зависит прежде всего от состава метеорного тела. Они могут дать крупные осколки, выпадающие вдоль траектории метеорита; мелкую метеоритную пыль; продукты застывания расплавленной части в виде шариков; газообразные продукты, легко рассеивающиеся. Места выпадения продуктов разного типа могут принципиально не совпадать между собою.

Из всех этих возможных форм метеоритного вещества ранее были обнаружены лишь магнетитовые и силикатные шарики в ничтожных концентрациях, которые не позволяли их отнести однозначно к остаткам Тунгусского метеорита, так как они неотличимы от метеорной пыли, имеющей повсеместное распространение. Вопрос об изучении метеорной (космической) пыли имеет важное значение и неоднократно поднимался в литературе. Однако до последнего времени достаточно серьезно ее изучение не производилось и вопрос о количественной характеристике метеорной пыли носит запутанный характер. Крайние значения в оценке метеорной пыли, выпадающей на Землю, расходятся на много порядков. Изучение свойств такой пыли обычно производится астрономическими методами, а непосредственно из земных отложений выделяется лишь магнитная составляющая. Некоторую ясность в вопрос вносят наблюдения на ракетах и искусственных спутниках Земли. Таким образом, проблема изучения рассеянного вещества Тунгусского метеорита неразрывно сплетается с проблемой общего изучения метеорной пыли.



Рис. 2. Обоганительная установка экспедиции

Несмотря на одновременное присутствие и магнетитовых, и силикатных шариков в пробах (при нашем методе обогащения (рис.2) в проверенных случаях их отношение около 3:1) изучению пока подверглась лишь концентрация магнетитовых шариков, по которым и делаются выводы. Совершенно не исключено, что в пробах присутствуют и остроугольные метеоритные частицы, но пока не разработана методика их распознавания. Находка крупных осколков метеорита, хотя принципиально не исключена, но маловероятна. Магнетитовые шарики — наиболее удобные «индикаторы» вещества, ориентируясь на которые можно вести непрерывный поиск шлейфа рассеивания метеорита.

ПРОБЫ ПОЧВЫ

Все предыдущие пробы, взятые вблизи эпицентра, показали, как упоминалось, ничтожную концентрацию здесь шариков. В то же время нам совершенно ясно представлялась общая картина физического процесса их рассеивания при взрыве. При большом выделении тепловой энергии должен был образоваться поднимающийся вверх мощный поток горячего воздуха, соответствующий подъему радиоактивного облака при ядерном взрыве. В отличие от чисто воздушного ядерного взрыва, практически не содержащего пылевых частиц, облако Тунгусского взрыва, происходившего на меньшем энергетическом уровне, могло содержать значительное количество пылевых и жидких частиц, температура которых не достигла температуры парообразования.

С этой точки зрения Тунгусское облако ближе подходит к строению облака при наземном или низком воздушном взрыве, когда в состав облака вовлекается значительное количество пылевых частиц. Высота подъема нижней части грибовидного облака при атомном взрыве составляет 8–16 км, в то время как высота подъема верхней части зависит от мощности взрыва и доходит до 20–40 км. Высота подъема облака при взрыве вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. ($\sim 10^{23}$ эрг) достигала 36 км.

Захваченные тепловым потоком пылевидные частицы оседают сравнительно медленно и могут быть на многие десятки и сотни километров отнесены ветром. По закону Стокса, скорость падения частиц в воздухе определяется как $v = 0,11 d^2 \rho / \text{час}$, где ρ — плотность частиц в г/см^3 , d — диаметр частиц в микронах. Это соответствует времени падения кварцевых частиц с высоты 24 км.

Диаметр частиц (в микронах)	Время падения (в часах)
250	1,4
150	3,9
75	16
33	80

Кроме того, важно установить, как по мере отдаления от эпицентра возрастает концентрация метеоритной пыли. На рис. 3 и 4 видно, что эта концентрация действительно возрастает по мере отдаления от эпицентра. Наибольшее возрастание происходит в направлении ветра, который был определен уже в настоящее время Центральным институтом прогнозов на основании анализа общей синоптической обстановки 30 июня 1908 г. Содержание частиц в наиболее богатой (хотя и единственной) пробе, взятой в 80 км к северо-северо-западу от эпицентра, составляет 90 шариков на единицу поверхности, в то время как среднее содержание в эпицентре равно 1,5.

Статистическая обработка материалов показывает, что бедные (центральные и юго-западные) пробы можно отнести к фону. Тогда колебания числа шариков в пробе должны подчиняться закону Пуассона. Этот закон устанавливает вероятность появления на фиксированном участке данного числа случайных событий. Такой закономерности, например, очень точно соответствует число метеоров, замеченных в течение некоторого интервала времени на любом определенном участке неба.

В нашем случае можно считать, что космические шарики, падавшие в течение большого времени на Землю (без учета Тунгусского падения), в общем равномерно и случайно распределяются по площади. Действительно, для бедных (до 7 шариков) проб получается следующее распределение:

Число шариков	x	0	1	2	3	4	5	6	7
Число проб	n	4	13	5	3	0	2	0	1

Вычисления показывают, что число шариков в пробах соответствует закону Пуассона. Взятые богатые пробы (рис. 3) не могут объясняться колебаниями фона и свидетельствуют о дополнительном внесении материала в те места, где они были взяты. А так как химический анализ, проведенный П.Н.Палеем, подтверждает их метеоритное происхождение и принадлежность их к остаткам Тунгусского метеорита становится наиболее вероятной.

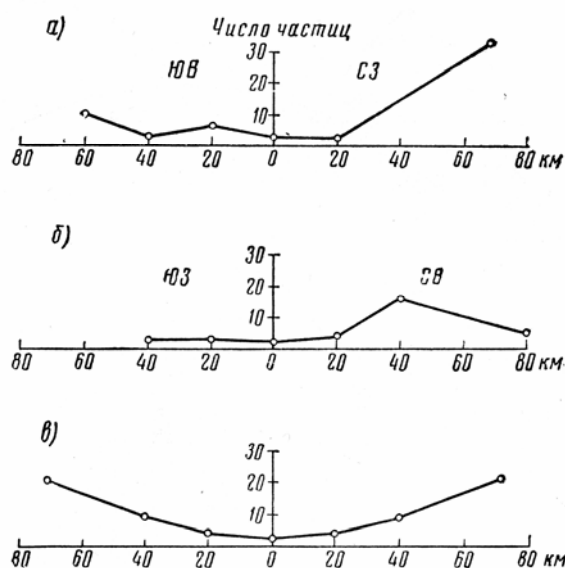


Рис. 3. Концентрация магнетитовых шариков в почве в зависимости от направлений и расстояний от эпицентра: а) усреднение по квадрантам с юго-востока на северо-запад; б) то же с юго-запада на северо-восток; в) общее усреднение концентрации частиц

Уже обнаруженное количество рассеянного вещества пока не может быть охарактеризовано с достаточной точностью вследствие неясности степени обогащения.

Ориентировочно его можно было оценить в несколько тонн, что составляет только небольшую часть окончательной массы тела.

ВЗРЫВ ЯДРА КОМЕТЫ

Из совокупности указанных данных (симметрия вывала, положение центра ожога, распределение вещества) с гораздо большей долей вероятности можно склониться в пользу юго-восточного варианта траектории метеорита, определенной Е.Л.Криновым по свидетельским показаниям. Расчет показывает, что такая траектория соответствует долгопериодическим орбитам кометного типа, наблюдение такой кометы на дневной стороне неба было затруднено.

Таким образом, полевое изучение района падения никак не противоречит, а, наоборот, стройно укладывается в гипотезу, о кометной природе Тунгусского метеорита, выдвинутой в свое время И.С.Астаповичем и Ф.Уипплом¹⁰ и поддержанную сейчас акад. В.Г.Фесенковым.

Сам механизм взрыва хорошо укладывается в представление о рыхлой, непрочной структуре тела (ядра кометы), обогащенного легко летучими веществами (замерзшими газами). Полагая, что орбита кометы была типичной, т. е. долгопериодической и сильно наклонной, можно подсчитать, что скорость встречи составила около 45 км/сек. Вероятно, ядро кометы имело диаметр около 150 м, тогда при плотности в 1 г/см³ масса его составила 10⁶ т, а кинетическая энергия — 10²⁵ эрг. С высоты около 100 км вокруг болида возникла мощная баллистическая волна, проявившая себя в виде взрыва, ударов и сотрясений.

В нижних слоях атмосферы произошло бурное разрушение метеорного тела за счет интенсивного испарения и дробления. При этом резко усилилась воздушная волна, давление на ее фронте достигло разрушительной величины — 3000 кг/м². Одновременно световой поток достиг нескольких кал/см². Вокруг эпицентра вспыхнули очаги пожаров. Льды, входившие в ядро, испарились, а капельки переплавленных твердых частиц застыли. Поток нагретого воздуха поднял облако шариков на высоту 15–20 км, откуда шарики размером 30–100 м спускались несколько часов и далеко сносились ветром.

Тончайшая пыль головы кометы задержалась, по расчету В.Г.Фесенкова, на высоте 400–500 км. Хвост кометы направлен от Солнца, поэтому большая часть пыли оказалась к западу от ядра — над Европой, где и вызвала эффект белых ночей.

¹⁰ См. «Природа», 1935, №9, стр. 71-72.

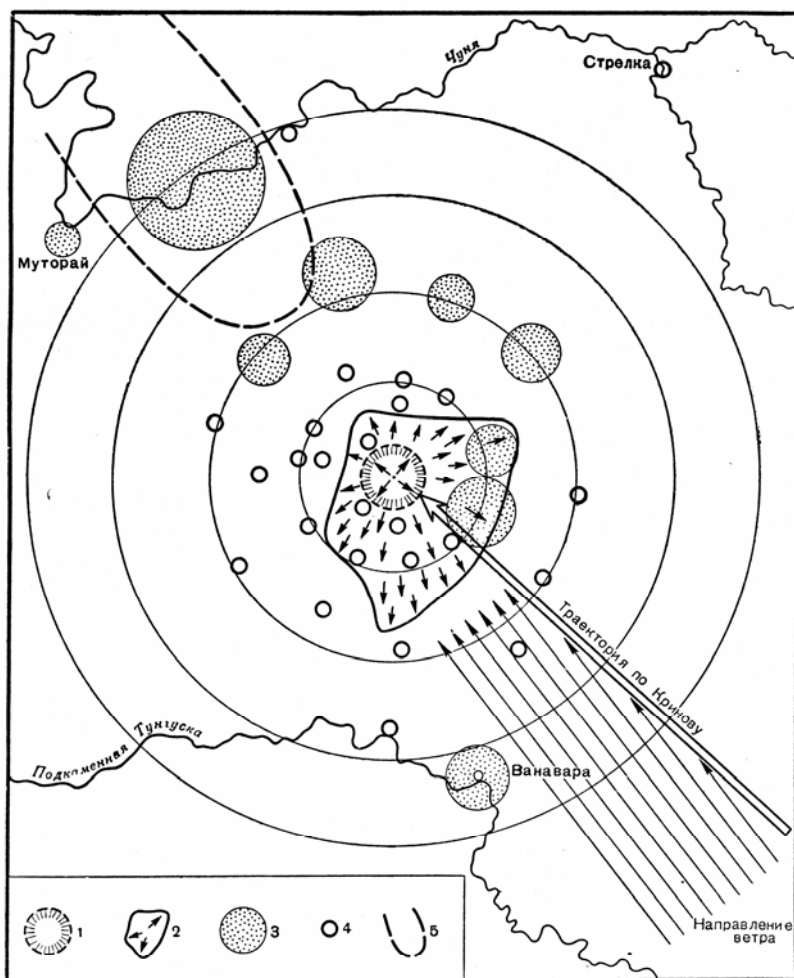


Рис. 4. Общая схема действия Тунгусского метеорита: 1 — вероятный радиус физиологического ожога (прогрева) камбия деревьев; 2 — общая граница поваленного леса и направление падения деревьев; 3 — расположение богатых проб с $n > 8$; площадь кружков пропорциональна концентрации магнетитовых шариков; 4 — места взятия бедных проб; 5 — местоположение предполагаемого шлейфа рассеяния основной части вещества метеорита

Мы не считаем работу по изучению Тунгусского падения законченной. Еще предстоит оконтурить шлейф рассеивания вещества, обеспечить статистику наблюдений, установить время выпадения вещества и связать его с общим фоном космической пыли.

Как мы надеемся, разработанные при этом методы лягут в основу планомерного изучения метеорной пыли на поверхности Земли и установления ее геохимической роли. Сбор вещества Тунгусского метеорита в достаточном количестве также приобретает особый интерес, так как есть много данных о том, что в этом случае мы имеем остатки кометного вещества, впервые попавшие в руки ученых. Дальнейшему уточнению затронутых вопросов и будет посвящена экспедиция 1962 года, которая в настоящее время работает в районе Тунгусского падения.