



КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО НА ЗЕМЛЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ВСЕСОЮЗНОЕ АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО
И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. В. В. КУЙБЫШЕВА

КОСМИЧЕСКОЕ
ВЕЩЕСТВО
НА ЗЕМЛЕ
(проблема Тунгусского метеорита)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Новосибирск · 1976

Сборник посвящен изучению эффектов, сопровождающих столкновение крупных метеоритов с Землей. Приводятся данные о механизме возникновения взрывных и баллистических волн в атмосфере Земли при полете и разрушении крупных метеоритных тел. На примере Тунгусского метеорита обсуждается вопрос возможного обнаружения в некоторых природных объектах мелкодисперсного космического вещества. В связи с этим сделана попытка интерпретации геохимических аномалий в районе выпадения вещества.

Книга рассчитана на специалистов в области астрономии, космохимии и физики крупных взрывов.

Редакционная коллегия:

В. С. Соболев (отв. редактор), *А. П. Бояркина*, *Н. В. Васильев*,
Г. М. Иванова, *А. Ф. Ковалевский*, *С. А. Разин*.

О ПУТЯХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ТУНГУ

Проблема Тунгусского метеорита не принадлежит к числу новых. Начиная с первых поисковых экспедиций Л. А. Кулика, относящихся к 20-м годам, собран огромный материал, позволяющий воссоздать отдельные черты катастрофы 30 июня 1908 г. В то же время говорить о полной ясности в этой проблеме было бы преждевременно.

На основании результатов экспедиций Комитета по метеоритам (КМЕТ) АН СССР (1958—1962 гг.), СО АН СССР, Всесоюзного астрономо-геодезического общества (ВАГО) и Томского университета (1959—1974 гг.), Волго-Уральского филиала НИИ «Геофизика» (1959—1973 гг.), а также расчетных, теоретических и модельных работ [1, 3, 7—9 и др.] и сбора архивных наблюдательных материалов 1908 г. удастся воссоздать в общих чертах следующую картину события.

Около 7 часов утра по местному (красноярскому) времени 30 июня 1908 г. в районе, расположенном к востоку от верхнего течения р. Нижней Тунгуски (от с. Преображенки), в атмосфере Земли вторглось космическое тело, которое, двигаясь по траектории с азимутом $275-295^\circ$, вошло в плотные слои атмосферы и разрушилось над поверхностью Земли в точке, расположенной в 65 км к СЗ от фактории Ванавара на р. Подкаменной Тунгуске. Взрыв или, возможно, взрывоподобное разрушение длилось по крайней мере 0,2—0,3 с; за это время тело успело пройти путь не менее 18—20 км. Максимум выделения энергии произошел в точке, расположенной над поверхностью Земли на высоте 5 км или несколько выше. Взрыв сопровождался генерацией мощной ударной волны или, точнее, серии волн, которые вызвали повал тайги на площади 2150 км² и барические возмущения, зарегистрированные глобально, в том числе в Западном полушарии. Кроме того, они явились причиной сейсма, зарегистрированного в Иркутске, Тбилиси, Ташкенте и Потсдаме. Общая энергия Тунгусского взрыва оценивается в 10^{23} — 10^{24} эрг, тротиловый эквивалент его был не менее 20 мегатонн. Взрыв сопровождался мощной световой вспышкой, видимой на р. Ангаре и вызвавшей лесной пожар, который охватил

большую площадь (определенную роль в этом сыграл, вероятно, также мощный поток раскаленных газов, образовавшихся во время взрыва). Тунгусский взрыв сопровождался локальным геомагнитным возмущением, зарегистрированным Иркутской обсерваторией, но не отмеченным в Екатеринбурге.

Помимо повала леса, ожога растительности и пожара, Тунгусский взрыв невыясненным пока образом привел к переманичиванию верхних слоев грунта в радиусе не менее 80 км вокруг места взрыва [2]. Следствием взрыва было также образование мелкодисперсного конденсата, состоящего из мельчайших силикатных и металлических шариков диаметром от 100 мкм и ниже, повышенное содержание которых приурочено к слоям торфа, сопричастным к эпохе 1908 г. Шарикки аналогичны по своим свойствам метеорной пыли.

Существенная особенность события, резко выделяющая его из числа других падений крупных, в том числе кратерообразующих метеоритов, — практически полное отсутствие метеоритного вещества. Вышеупомянутый конденсат не может быть пока с полной гарантией отнесен к остаткам Тунгусского тела, и потребуется еще немало усилий и времени, чтобы их связь подтвердить или отвергнуть. Именно отсутствие вещества, как никакое другое обстоятельство катастрофы, толкает отдельных исследователей на поиски иных путей объяснения Тунгусской катастрофы (ядерный взрыв, «черная дыра» и некоторых других).

Тунгусский взрыв был хотя и наиболее ярким, но не единственным эпизодом в цепи аномальных геофизических явлений 1908 г. Они начались несколько ранее — по [6] с 25 июня — и закончились значительно позднее взрыва. Основным их проявлением были необычные световые феномены в атмосфере Земли — подробно об этом см. [5, 6, 9]: огромное по своим масштабам распространение мезосферных облаков, свечение сумеречного и ночного неба, яркие зори, напоминавшие вулканические сумерки, нарушения атмосферной поляризации. Эти явления достигли максимума в ночь с 30 июня на 1 июля и наблюдались потом в резко ослабленном виде вплоть до конца июля, а по некоторым данным — и до конца августа. Они наблюдались на огромной территории от р. Енисея на востоке до побережья Атлантического океана на западе и до линии Ташкент — Ставрополь — Бордо на юге.

Из комплекса явлений, связанных с падением Тунгусского метеорита, целесообразно выделить необычные, не описанные пока при падении других метеоритов черты; в основном их три (остальные являются производными от этих обстоятельств): надземный характер взрыва, отсутствие вещества (по крайней мере, в количестве, соответствующем масштабу явления) и комплекс световых атмосферных аномалий до и после взрыва. Выяснение природы и причин каждой из них подведет к решению

проблемы в целом; этим и определяется выбор основных направлений работ.

Надземный характер взрыва до настоящего времени остается важным моментом для правильного понимания Тунгусской катастрофы, в то же время механизм его разъяснен в наименьшей степени. Например, популярная в свое время модель «теплового взрыва» [10] построена без должного учета явлений теплопроводности и может быть принята в лучшем случае как рабочая гипотеза. По-видимому, существующая теория крупных взрывов пока еще не готова к тому, чтобы на основании представления о переходе кинетической энергии в тепловую дать полную картину разрушения тела массой свыше 10^5 т на высоте не менее 5 км. Поскольку условия для кардинального решения поставленного вопроса еще не созрели, следует считать весьма перспективными попытки математического и натурального моделирования различных сторон Тунгусского взрыва. Обнадеживающие результаты дали машинные модельные эксперименты В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [4] и В. П. Коробейникова с соавторами (статья в настоящем сборнике). Одна из главных трудностей, с которой встречаются исследователи — совмещение низкой теплопроводности материала, из которого по современным представлениям состоят ядра комет (кометные льды), со скоростью разрушения весьма крупного (массой от 10^5 до 10^6 т) тела. Прогресс в этой области возможен только при условии привлечения к работе специалистов в области физики высоких скоростей и в области сопротивления материалов.

Второе направление работ связано с поисками вещества Тунгусского метеорита. Все, что мы сейчас об этом знаем, говорит против того, что в районе взрыва могли выпасть крупные осколки Тунгусского тела (хотя считать это невероятным нельзя). Не подлежит сомнению, что большая часть материала Тунгусского тела так или иначе перешла в мелкодисперсное состояние, и это вещество должно было затем осесть на территории в десятки и сотни тысяч квадратных километров. Концентрация вещества, выпавшего на единицу площади, заведомо ничтожна, и обнаружение его представляет собой даже с точки зрения возможностей современной аналитической техники нелегкую задачу.

Сознавая трудность этой задачи, было бы неправильно считать ее в принципе неразрешимой. Использование методики, предложенной Ю. А. Львовым и др. (см. статью К. Н. Алексеевой в настоящем сборнике), уже позволило обнаружить в слое торфа района катастрофы, относящемся к эпохе падения, конденсат, состоящий из микроскопических капель силикатов и, возможно, магнетита. В последнее время наметились некоторые отклонения от естественного химического состава слоя торфа, одновозрастного катастрофе, выявленные с помощью спектраль-

ного анализа. Однако решающее слово в этом вопросе, коль скоро речь идет о весьма малых количествах вещества, принадлежит исследованию изотопного состава «подозрительных» элементов, ибо только изотопные аномалии (и еще, вероятно, отклонения в соотношениях элементов) могут дать в будущем гарантию того, что та или иная особенность химического состава в районе катастрофы связана с выпадением космического материала, а не с вторичным переотложением земного материала, вызванным взрывной волной. Руководящими принципами этого направления работ должны быть использование стратифицированных объектов, позволяющее более или менее уверенно выделять зону аэрозольных выпадений 1908 г., и проведение анализов на уровне самых высоких мировых стандартов, в частности, широкое использование нейтронно-активационного метода.

Третьим направлением работ, которое по существу законсервировано с 1965 г., является интерпретация геофизических эффектов Тунгусского взрыва. Природа их оказалась сложной. Попытка В. Г. Фесенкова [11] объяснить свечение неба рассеиванием солнечного света на частицах кометного хвоста, задержанных в атмосфере на высоте 200 км и более, не дала желаемого эффекта, так как он сам пришел к заключению, что мелкодисперсное вещество кометного хвоста не могло проникнуть в слой атмосферы ниже 200 км. Поэтому В. Г. Фесенков считал относящимися к Тунгусскому падению только те аномалии, источники которых локализовались на большой (свыше 200 км) высоте, отнеся все остальные к случайным «наложениям». Однако световые явления 1908 г. представляют собой единый комплекс, разные виды аномалий начались и закончились примерно в одно и то же время. Любое расчленение их представляет собой некорректный прием, и нужно признать, что от понимания природы этих явлений мы стоим, видимо, еще дальше, чем от понимания механизма разрушения Тунгусского тела. Описательный уровень и здесь исчерпал себя; полный каталог световых явлений 1908 г. был опубликован в 1965 г. [6].

Вопрос этот очень сложен; есть основания думать, что даже исчезающе малые количества вещества кометного хвоста, попавшие в атмосферу Земли, вызывают необычайно сильные — сравнительно с вызывающим их фактором — последствия. Анализ литературы последнего столетия показывает, что в 1861 и 1910 гг., когда Земля вступала в соприкосновение с кометной материей, в атмосфере наблюдались яркие световые эффекты (сумеречные аномалии). Разумеется, в сопоставлении с количеством атмосферного, в том числе метеорного аэрозоля, количество пылевых частиц, вносимых кометным хвостом, исчезающе мало, и просто рассеянием лучей Солнца это явление не объяснить. Существует, видимо, какой-то иной механизм,

скорее всего связанный со способностью кометного вещества вызывать интенсивные ионизационно-рекомбинационные процессы в верхних слоях атмосферы Земли. По-видимому, решение этого вопроса должно идти не прямым путем, но через расширение наших знаний о механизме свечения ночного неба, образования мезосферных облаков и аномальных сумеречных явлений.

Природа Тунгусского метеорита, вероятно, входившего в класс космических тел, сравнительно редко падающих на Землю, может быть расшифрована в ходе длительных комплексных исследований. Решение этой задачи позволит впервые в истории науки говорить о натурном исследовании физических и химических свойств кометного вещества и, может быть, даже даст возможность изыскать новые подходы к фундаментальным проблемам происхождения и эволюции Солнечной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояркина А. П., Демин Д. В., Зотник И. Т., Фаст В. Г. Изучение ударной волны Тунгусского метеорита по вызванным им разрушениям леса.— «Метеоритика», 1964, вып. 24, с. 112—128.
2. Бояркина А. П., Сидорас С. Д. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита.— «Геол. и геофиз.», 1974, № 3, с. 79—84.
3. Бронштэн В. А. Воздушные волны Тунгусского метеорита.— «Астрон. вест.», 1969, т. 3, № 4, с. 214—221.
4. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 47—69.
5. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К. Об аномальных оптических явлениях лета 1908 г.— «Бюлл. ВАГО», 1964, т. 36, с. 60—65.
6. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К. и др. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М., «Наука», 1965, 111 с.
7. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. Минск, «Наука и техника», 1969, 202 с.
8. Зотник И. Т., Цикулин М. А. Моделирование взрыва Тунгусского метеорита.— «Докл. АН СССР», 1966, т. 167, № 1, с. 59—62.
9. Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, 214 с.; вып. 2, 1967, 238 с.
10. Станюкович К. П., Шалимов В. П. О движении метеоритных тел в атмосфере Земли.— «Метеоритика», 1961, вып. 20, с. 54—71.
11. Фесенков В. Г. Об аномальных световых явлениях, связанных с падением Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1964, вып. 24, с. 177—179.

К ОЦЕНКЕ ВЕЩЕСТВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА В РАЙОНЕ ЭПИЦЕНТРА ВЗРЫВА

Ключевым моментом в решении проблемы Тунгусского метеорита является вопрос о его материальном составе. Многократные попытки обнаружения его крупных частей, взрывных кратеров или ударных воронок неизменно приводили к отрицательному результату. В то же время эквивалент Тунгусского взрыва по современным данным оценивается в 20—50 мегатонн (см. статьи В. П. Коробейникова и др. и И. П. Пасечника в настоящем сборнике). Все это дает основание для предположения о том, что в момент взрыва большая часть вещества метеорита или даже вся его масса перешла в мелкодисперсное состояние, была выброшена на высоту 20 км и более и образовала в стратосфере облако аэрозоля, который, дрейфуя по ходу ветра, постепенно осел на поверхность Земли в виде шлейфа микрочастиц. В этом случае основные усилия, направленные на поиски вещества Тунгусского метеорита, должны быть ориентированы на обнаружение мелкодиспергированного его компонента.

Результатом работы экспедиций КМЕТ АН СССР на месте падения Тунгусского метеорита под руководством К. П. Флоренского явилось открытие к ССЗ от эпицентра взрыва повышенного содержания в почвах магнетитовых сферических микрочастиц, отождествленных с метеоритной пылью [10]. Однако в этой работе отсутствуют данные по фоновым выпадениям метеорной пыли, оценка аккумуляции в почвенном горизонте космических осадков за длительные интервалы времени, определенность в вопросе о сроках сохранения космических частиц в условиях интенсивных биогеохимических, в том числе микробиологических процессов, возможности вторичного перетложения материала. Кроме того, существующие почвенные методики ориентированы на магнетитовую составляющую космической пыли и совершенно не рассчитаны на выявление силикатных шариков, которые могут составлять основную часть выпавшего вещества.

Отсутствие в районе падения Тунгусского метеорита классических объектов космохимических исследований — высокогорных и полярных льдов, — послужило причиной поисков объекта, достаточно распространенного и хорошо стратифицируемого. В качестве такого объекта Ю. А. Львов предложил верховые болота, сложенные олиготрофным мхом *Sphagnum fuscum* [7], которые могут рассматриваться как естественный

календарь аэрозольных выпадений за длительный отрезок времени. Была разработана и апробирована стандартная методика выделения сферических микрочастиц размером 7—100 мкм и более в различных слоях торфяной залежи, в том числе в слоях, содержащих прирост мха 1908 г. [2, 8].

Начиная с 1969 г. экспедициями Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР и Томского отделения ВАГ● осуществлен большой объем работ по отбору и лабораторной обработке торфяных колонок. К настоящему времени на территории в 10 000 км² обследовано свыше 500 пробных площадей. Материалы этих работ говорят о следующем.

В районах, удаленных от места падения Тунгусского метеорита, а также в слоях торфа, не относящихся к 1908 г., встречаются лишь единичные сферические микрочастицы (сферы), имеющие силикатный или магнетитовый состав. В аналогичных торфяных колонках, отобранных вблизи промышленных центров, отмечено экспоненциальное нарастание количества сферул от нижних слоев торфяной залежи к верхним, современным [1].

В районе катастрофы в ряде пунктов слой торфа, залегающий на глубине 25—35 см, обогащен (в некоторых случаях весьма значительно) оплавленными микроскопическими частицами исследуемых размеров. Большинство точек, в которых наблюдается этот эффект, прилежит к эпицентру взрыва (окрестности горы Кларк) или расположены в северной части района, что в совокупности с данными о наиболее вероятном направлении стратосферного ветра летом 1908 г. [9] дает основание думать о наличии шлейфа рассеяния космического вещества, ориентированного в этом направлении [3, 4].

Обнаруженные в торфе сферические микрочастицы силикатного состава отличаются от известных геологических стекол, часто имеют газовые включения, в том числе газовые пузырьки, состоящие из Н₂, СО₂, СО. Их химический состав не противоречит космическому происхождению [6].

Заметим, что выводы, сделанные ранее о структуре распределения наиболее богатых сферами проб, носили в основном качественный характер. Между тем сложность выявленной картины, возможность различного рода шумов и помех, связанных, например, с фоновым выпадением космического материала, случайным заносом промышленной пыли, лесными и торфяными пожарами, а также мозаичность самого выпадения вещества могут послужить причиной субъективной интерпретации наблюдаемых эффектов и заслонить тенденции, имевшие место в действительности. В связи с этим целью настоящей работы было применение некоторых статистических методов для анализа материалов, полученных в 1970—1974 гг. Материалы 1969 г., полученные в период отработки методики, в этой статье не использованы.

Как и в предыдущих работах, нами использована следующая нумерация слоев: верхний (современный) слой толщиной в 18 см, представляющий собой «очёс», обозначается как слой 1—6: он отбирался и обрабатывался суммарно. Толщина более глубоких слоев принята по 3 см. Они обрабатывались отдельно и измерялись от 7 до 17. (Данные по слоям глубже 14 в этой статье не рассматриваются.) Одной из основных задач является определение числа лет «аккумуляированных» в каждом слое торфа (датировка слоев).

Путем измерения годовых приростов стебельков мха «очёса» торфяной залежи было установлено, что на междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок слой 1—6 содержит прирост мха за 15—17 лет [7]. Зная зольность (минеральную составляющую) этого слоя, получаем среднюю величину зольности, приходящейся на 1 год прироста торфа. Беря за основу нижний предел этой оценки (т. е. 15 лет) и имея данные о величине зольности по всем остальным слоям, получаем требуемую датировку (табл. 1). Оказалось, что число лет в слоях с глубиной постепенно нарастает. Всего колонка в 42 см из исследованного района (до 14 слоя включительно) содержит прирост мха за последние ~ 200 лет (по состоянию на 1970 г.). Как показали исследования, изложенные ниже, наиболее обогащенными сферами (вероятнее всего, вследствие выпадения вещества Тунгусского метеорита) являются слои 9 и 10, включающие прирост мха за 1908 г. (табл. 2), что подтверждает полученную датировку.

Следует отметить, что некоторая миграция обогащения для отдельных колонок в пределах 8—13 слоев объясняется кселебаниями прироста торфа в зависимости от ландшафтных условий. Кроме того, в некоторых случаях обогащенный слой оказывается как бы размывом, что можно объяснить фильтрацией сферул, происходящей в ограниченном масштабе. Эти факторы,

Таблица 1

Приток сферул различных размеров на 1 м² по данным исследуемых слоев торфяной залежи (т/м² · 10⁻¹¹)!

№ слоя	Число лет в слое	Средний размер сферул (мм)								Σ в слое	Σ в год
		14	28	42	56	70	84	98	100		
1—6	15	0.1	1.2	2.1	1.6	1.3	0.3	0.4	1.3	8.3	0.55
7	14	0.1	1.5	2.6	2.5	2.2	1.9	0.7	0.7	12.2	0.87
8	16	—	0.8	1.8	1.4	1.6	0.9	—	—	6.5	0.40
9	17	0.1	1.3	4.1	3.0	2.7	0.9	1.0	1.5	14.6	0.85
10	19	0.1	1.0	2.3	1.6	1.6	0.3	1.3	1.6	9.8	0.52
11	24	0.1	1.2	3.6	3.1	1.8	0.9	0.9	2.7	14.3	0.59
12	32	0.1	1.2	3.6	4.5	3.1	2.0	1.5	2.2	18.2	0.57
13	34	0.1	1.1	3.1	2.4	2.4	1.9	1.9	0.4	13.2	0.39
14	36	0.1	1.2	3.9	2.2	3.7	1.6	1.0	3.7	17.4	0.48

Оценка мелкодисперсной составляющей (7—100 мкм) вещества Тунгусского метеорита, осевшей в районе эпицентра взрыва

№ слоя	Приток сферул, т/м ² ·10 ⁻¹¹	Площадь поверхности с повышенной концентрацией сферул, км ²	Превышение над фоном, n	Оценка вещества тунгусского метеорита, т
9	14,6	875	7,3	0,93
10	9,8	1025	13,6	1,36
11	14,3	1900	4,6	1,25

вносящие некоторые помехи, тем не менее на среднестатистических оценках датировки слоев существенно не сказываются, так как они действуют регулярно по всей глубине торфяных колонок в пределах исследуемой территории.

Для

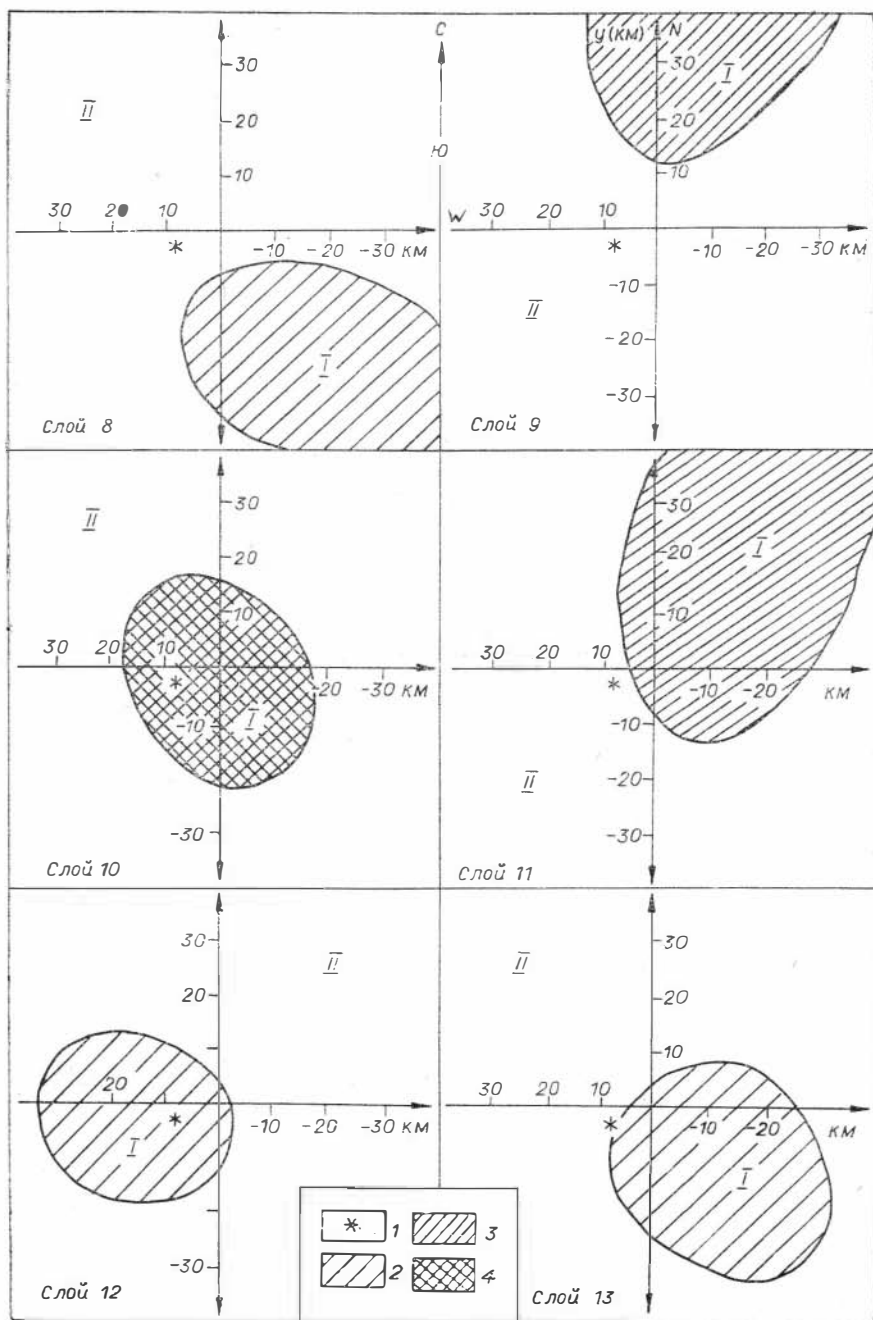
точной локализации проб, обогащенных сферулами, была проведена работа

фракции космической пыли. Статистически обрабатывалась информация по 500 пробным площадям междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок. Во избежание влияния вещества Тунгусского метеорита на полученные оценки из расчетов исключались данные по 9—13 слоям пробных площадей из района эпицентра взрыва.

Полученные результаты позволяют оценить фоновый приток сферических микрочастиц на 1 м² поверхности слоя как суммарно, так и по отдельным фракциям (см. табл. 1). В этой же таблице приведены данные о притоке сферул в год, согласно принятой датировке слоев. В среднем на 1 м² поверхности в год выпадает (0,4—0,9)·10⁻¹¹ т метеорных сферул и приток их достаточно равномерен за последние ~ 200 лет.

Для выявления аномального выпадения сферических микрочастиц в районе эпицентра и для получения структуры площадного распределения сферул в слоях торфа, относящихся и не относящихся к 1908 г., нами была применена статистическая обработка полученного материала. Исследованию подверглась область Q, представляющая собой квадрат 100 × 100 км с центром, совпадающем с горой Фаррингтон (~ 7 км ст эпицентра взрыва). Всего для расчета было взято около 250 колонок торфа, расположенных в этой области.

Так как характеристики встречаемости сферических микрочастиц в торфе каждого из слоев отличаются большой разнородностью, чаще всего связанной с мозаичностью выпадения материала и с недостоверностью (в том случае, если под микроскопом отсматривалась небольшая часть субстрата образца торфа) экстраполяции количества сферул на 1 дм², то все данные подверглись предварительному сглаживанию. Для этого



квадрат Q был разбит на квадратные участки со стороной в 10 км каждый. Поскольку количество проб, отобранных в зоне эпицентра, значительно больше, чем на периферии, то квадрат со стороной в 40 км и с центром, совпавшим с центром квадрата Q , был разбит дополнительно на квадраты, каждый со стороной в 5 км. Всего оказалось 148 участков двух размеров.

Для каждого участка была рассчитана величина $\bar{S}_{ij} = \Sigma_{ij}/\Delta_{ij}$, где Σ_{ij} — суммарное по всем пробам данного участка количество сферул, Δ — суммарная отсмотренная часть субстрата в пересчете на площадь поверхности. Для дальнейших расчетов была сделана выборка наиболее представительных значений S_{ij} , обладающих определенным весом, так, чтобы $\Delta \geq 0,25$. Каждому значению параметра S_{ij} приписывалось местоположение x_i, y_j , совпадающее с центром квадрата. В результате были получены числовые поля значений S_{ij} , зафиксированные на квадрате Q и характеризующие среднюю плотность содержания сферических микрочастиц в слое для данного участка. Такие числовые поля были получены для каждого слоя торфяной залежи отдельно.

Для обнаружения пространственной закономерности параметра S_{ij} на квадрате Q использовался метод корреляционной интерполяции Д. В. Демина [5], позволяющий получать наиболее вероятную структуру параметра в пространстве (в нашем случае на плоскости). Были выявлены территориальные структуры распределения плотности сферических микрочастиц, проходящихся на 1 дм², аккумулированных в каждом из исследуемых слоев торфяной залежи. При наличии территориальной структуры квадрат Q разбивался на две области: I — максимальной локализации параметра S_{ij} и II — все остальное. Затем для определения значимости полученной структуры усреднялись все значения S_{ij} , попавшие и не попавшие в область I. После этого рассчитывалось превышение значений \bar{S}_I (среднее значение S_{ij} для области I) над \bar{S}_{II} (то же, для области II), т. е. \bar{S}_I/\bar{S}_{II} . Все эти данные вместе с \bar{S} и превышением значения \bar{S} над фоновыми данными сведены в табл. 3. Территориальные структуры параметра S_{ij} для слоев 8—13 приведены на рисунке с соответствующими обозначениями. Анализ табл. 3 и рисунка выявил следующее.

Для слоя 1—6 на исследуемой территории имеется превышение над фоном в 1,3 раза. Слабо выраженная структура

Территориальные структуры концентрации сферических микрочастиц в различных слоях торфяной залежи района падения Тунгусского метеорита.

1 — эпицентр взрыва; 2 — область повышенной концентрации (I) при превышении ее над концентрацией области II в 2—4 раза; 3 — то же, в 4—10 раз; 4 — то же, более чем в 10 раз. 21

Результаты исследования концентрации сферул торфяной залежи в области Q

№ слоя	\bar{S} на 1 дм ²	Превышение над фоном, n	Концентрации сферул		S_I/S_{II} , n
			S_I	S_{II}	
1—6	10,6	1,3	14,8 (Юг)	7,0 (Север)	2,1
7	8,1	Нет	Нет	Нет	Нет
8	10,4	1,7	16,0	7,8	3,3
9	30,9	2,5	74,0	10,1	7,3
10	35,8	4,5	90,0	6,6	13,6
11	18,4	1,8	41,3	9,0	4,6
12	10,8	1,0	19,6	7,8	2,5
13	11,0	1,2	22,2	9,5	2,3
14	7,4	Нет	Нет	Нет	Нет

указывает на тенденцию увеличения концентрации сферул в южной части обследованного района при $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 2,1$. Можно предположить, что этот эффект связан с наличием небольшой промышленности местного значения в пос. Ванавара, расположенном в 65 км к ЮВ от эпицентра Тунгусского взрыва.

В слое 7 какой-либо структуры или превышения над фоном ($t/m^2 \times 10^{-11}$) не обнаружено.

В слое 8 имеется превышение \bar{S} над фоном в 1,7 раза; обнаружена локальная структура этого параметра в виде шлейфа в ЮВ направлении при $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 3,3$.

В слое 9 \bar{S} превышает фон в 2,5 раза; территориальная структура \bar{S} представляет собой начало шлейфа, вытянутого на север. $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 7,3$.

В слое 10 превышение над фоном в 4,5 раза. Территориальная структура носит характер пятна в окрестности эпицентра взрыва. $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 13,6$.

В слое 11 превышение над фоном в 1,8 раза. Территориальная структура образует вытянутый на север шлейф с головной частью в эпицентре взрыва. $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 4,6$.

В слое 12 превышения над фоном нет, однако слабая территориальная структура в виде пятна в окрестности эпицентра просматривается. $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 2,5$.

В слое 13 имеется структура, аналогичная таковой в слое 12, при превышении над фоном в 1,2 раза и $\bar{S}_I/\bar{S}_{II} = 2,3$.

В слое 14 превышения над фоном нет. Какой-либо территориальной структуры также не обнаружено.

Таким образом, в слоях 8—13 имеется превышение числа сферических микрочастиц над фоновыми величинами. Этот эффект наиболее отчетлив в слоях 9—11 и в эпицентральной зоне и имеет тенденцию к распространению на СВ.

Полученные материалы дали возможность оценить суммарное количество вещества, осевшего в виде микросферул в области Q. Для этого сравнивалось количество метеорной пыли на 1 м² слоев 9—11 по фоновым районам и в зоне предполагаемого выпадения вещества Тунгусского метеорита (см. табл. 2). Масса вещества, осевшего в районе эпицентра взрыва в форме оплавленных сферических частиц размером в 7—100 мкм, оценивается в 3,5 т.

Наблюдаемая тенденция к распространению шлейфа в СВ направлении говорит о возможном выпадении основной массы вещества Тунгусского метеорита за пределами исследованной области. Очевидно, что в этом районе и следует продолжать поиски мелкодисперсного вещества Тунгусского метеорита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П. и др. К оценке выпадения космической и индустриальной пыли на больших площадях.— В кн.: *Астрономия и геодезия*. Изд-во Томского ун-та, 1973, с. 45—53.
2. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски мелкодисперсного космического вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита.— *«Метеоритика»*, 1973, вып. 32, с. 141—146.
3. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Гришин Ю. А. и др. Поиски вещества Тунгусского метеорита в торфах района междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок.— В кн.: *Проблемы космохимии*. Киев, «Наукова думка», 1974, с. 60—69.
4. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Иванова Г. М. и др. Новые данные о предполагаемом космическом веществе в районе Тунгусской катастрофы.— В кн.: *Проблемы космической физики*, вып. 9. Киев, «Наукова думка», 1974, с. 79—83.
5. Демин Д. В. Алгоритм статистической оценки параметров Тунгусского падения по данным наземных наблюдений.— В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 235—237.
6. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Вронский Б. И. и др. Химический состав сферул, найденных в районе падения Тунгусского метеорита.— *«Докл. АН СССР»*, 1971, т. 200, № 1, с. 201—204.
7. Львов Ю. А. О нахождении космического вещества в торфе.— В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 140—144.
8. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В. и др. Обнаружение космического вещества в некоторых природных объектах. Новосибирск, изд. ИГГ СО АН СССР, 1971, 8 с.
9. Фаст Н. П., Павлова Л. В. О возможном ветре на высотах 30 июня 1908 года в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: *Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита*. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 42—43.
10. Флоренский К. П. Предварительные результаты Тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г.— *«Метеоритика»*, 1963, вып. 23 с. 3—29.

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
СПЕКТРАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ
В ПРОБАХ ТОРФА РАЙОНА
ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА**

Перед авторами стояла задача апробации количественной спектральной методики определения Fe, Cr, Mn, Pb с чувствительностью $10^{-3} - 10^{-4}\%$ в зоне торфов. Для выявления столь малых количеств элементов необходим правильный подбор условий возбуждения и съемки спектра.

В процессе испарения элементов и их соединений возможно фракционирование, использование которого перспективно для повышения чувствительности анализа. Поэтому с целью правильного определения экспозиции нами были сняты кривые испарения для всех определяемых элементов. На основании анализа кривых испарения время экспозиции было определено в 60 с. Для получения достаточно интенсивного почернения спектральных линий необходимо было создать по возможности наиболее выгодные условия возбуждения в дуговом разряде. Оптимальные температуры возбуждения спектра для низкоточного дугового разряда оценены нами по формуле

$$1,03 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot e^{\xi} \cdot \xi = \frac{7/2 + \xi(1 - \alpha)}{\alpha^{\xi} - 1},$$

$$\text{где } \xi = \frac{V_{jnp}}{K \cdot T_M}; \quad \alpha = \frac{E_a}{V_{jnp}}; \quad K = \left(\frac{U_0}{U_+} \right)_{np} \cdot \frac{P}{V_{jnp}^{5/2}}.$$

Эта формула позволила найти по данным параметрам E_a , V_j оптимальные температуры для возбуждения спектральных линий искоемых элементов.

Расчет T_M с использованием этой формулы показал, что оптимальные T_M для возбуждения спектральных линий Fe, Cr, Mn, Pb лежат в пределах 5500—6000°K. С помощью добавления определенного количества буфера можно получить температуру в плазме, которая обеспечивала бы наиболее выгодные условия возбуждения линий исследуемых элементов, а также хорошее испарение последних. Поэтому нами было изучено влияние различных типов буферов на интенсивность спектральных линий. Для подбора нужного буфера в пробы в эталон, приготовленный для проведения анализа с содержанием искоемых элементов в количестве порядка 0,001%, вводилось различное количество KI, NaCl, NaN₃, NaF: 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50% каждого. Наибольшая интенсивность спектральных линий исследуемых элементов была получена при введении 10% NaCl, достаточно интенсивными оказывались линии и при введении 20% KI.

Эталоны для проведения анализа готовились на искусственной основе. Предварительная съемка спектров проб показала, что во всех пробах содержится большое количество Al и Si. Поэтому за основу эталона была взята смесь из $2/3 \text{ Al}_2\text{O}_3$ и $1/3 \text{ SiO}_2$. В нее вводились элементы-примеси в виде оксидов и солей. Эталоны с содержанием 1; 0,1; 0,01; 0,001 и 0,0001% готовились путем последовательного разбавления головного эталона. В эталоны и пробы вводилось 10% NaCl и 3% внутреннего стандарта Вi в виде соли. Вся смесь тщательно перетиралась в агатовой ступке.

Использование Вi в качестве внутреннего стандарта было удобно для анализа проб торфа, так как Вi отсутствовал в спектре проб. Кроме того, скорость его испарения при добавлении к пробе примерно такая же, как и у определяемых элементов.

Предварительно было проведено озоление проб в муфельной печи при 600°C , после чего пробы вводились в канал нижнего угольного электрода глубиной 5 мм и диаметром 3 мм. С целью уменьшения разбрызгивания пробы у нижнего электрода просверливалось боковое отверстие диаметром 1 мм, облегчавшее выход газов и способствовавшее более стабильному горению.

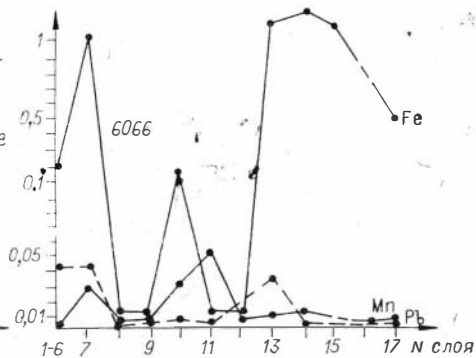
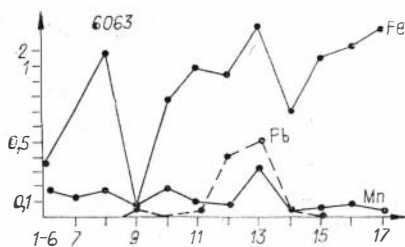
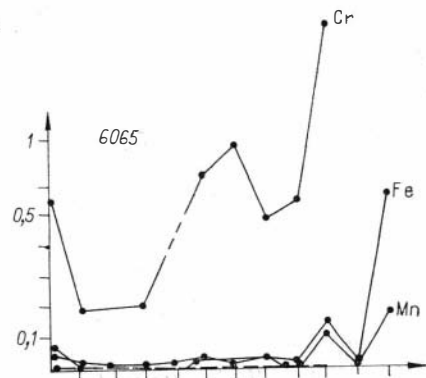
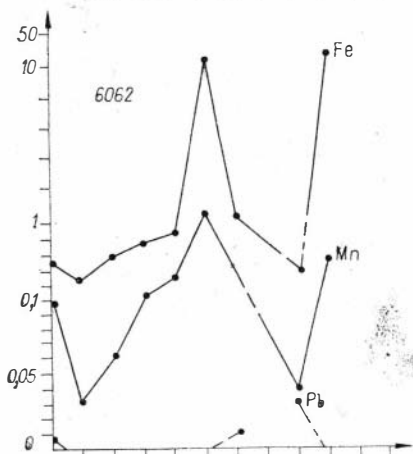
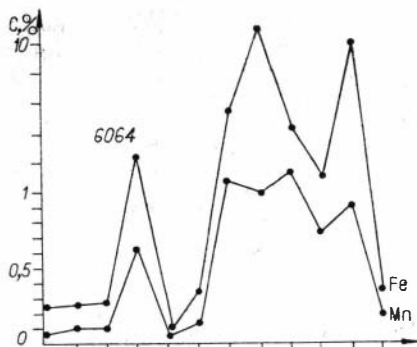
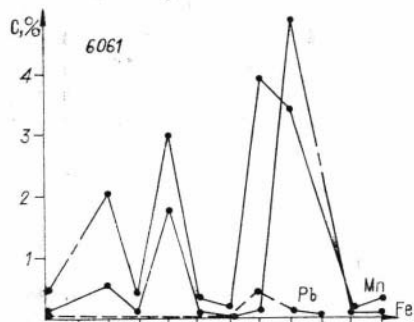
Спектры снимались на спектральные пластины типа II с экспозицией 60 с на спектрографе ИСП-28 с трехлинзовой системой освещения. В качестве источника возбуждения использовалась низкочастотная дуга переменного тока при $I=8\text{A}$.

Для количественного определения примесей был использован метод трех эталонов. Градуировочные графики строились в координатах $\Delta s = \lg c$ по следующим аналитическим линиям: $\lambda_{\text{Вi}} = 2993,3\text{\AA}$; $\lambda_{\text{Рb}} = 2833\text{\AA}$; $\lambda_{\text{Сг}} = 2843,2\text{\AA}$; $\lambda_{\text{Fe}} = 3047\text{\AA}$; $\lambda_{\text{Mn}} = 2801\text{\AA}$. Ошибка анализа составила 15%.

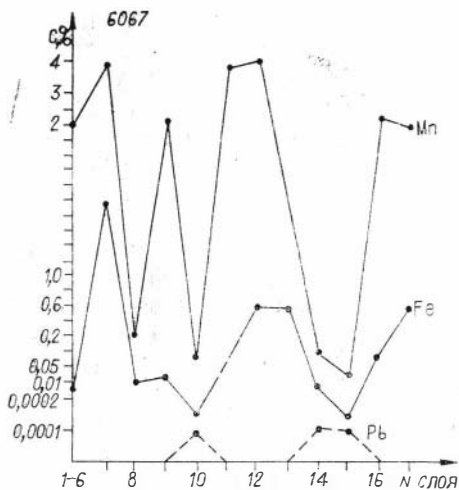
На рисунке приведены данные спектрального анализа семи колонок торфа, отобранных в различных точках района, примыкающего к эпицентру Тунгусского взрыва, а также близ пос. Ванавара. Из него видно, что содержание исследованных элементов в разных слоях торфяной залежи неодинаково. Количество Fe и Mn в нижних слоях торфа, как правило, выше, чем в верхних. Это, скорее всего, связано с минерализацией торфа и влиянием подстилающих пород. Наблюдается прямая корреляция между содержанием Fe и Mn.

Необходимо отметить, что в пробах, взятых в непосредственной близости от эпицентра катастрофы (район оз. Чеко, южный берег Южного болота, западный берег Северного торфяника) и, кроме того, близ Ванавары (Цветковский торфяник) имеет место контрастный «пик» по Mn и Fe в слое торфа, относящемся ко времени катастрофы.

Своеобразно ведет себя Рb. Почти во всех исследованных нами колонках динамика его характеризуется низкими цифрами, как в предкатастрофных, так и послекатастрофных слоях;



● отчетливым превышением фоновых величин в слоях, сопричастных к эпохе падения Тунгусского метеорита. Кроме того, в некоторых колонках имеет место тенденция к увеличению содержания Pb в современных слоях, что, возможно, связано с глобальными техногенными загрязнениями авиацией. В не-



Распределение элементов в пробах торфа.

Колонка 6061 — Цветковский торфяник в 4,5 км к С от Ванавары; 6062 — западный берег Северного торфяника в 2,5 км к З от Займки Кулика; 6063 — торфяник в 3,5 км к Ю от нее; 6064 — торфяник в 2 км к СЗ от горы Снядецкой (Острой); 6065 — в 3 км к З от нее; 6066 — южный берег Южного болота в 4 км к ЮВ от займки Кулика; 6067 — торфяник у оз. Чеко в 10 км к СЗ от Займки Кулика.

которых колонках «пиковые» концентрации Pb, Fe и Mn совпадают.

Таким образом, апробированная методика пригодна для выявления Mn, Fe, Cr, Pb в золе сфагновых торфов.

**К. Н. АЛЕКСЕЕВА, А. В. СМИРНОВА, Н. В. ВАСИЛЬЕВ,
С. А. РАЗИН, Т. И. САРЫЧЕВА, Л. Б. ТЕМИРШАЕВА,
В. Э. ШНИТКЕ**

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОРФА ИЗ РАЙОНА ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Современное представление о физике Тунгусского взрыва делает поиски крупных его осколков малоперспективными. Очевидно, что большая часть вещества Тунгусского метеорита, перейдя в жидкое и, возможно, газообразное состояние, должна была сконденсироваться или застыть в виде мелких капель, которые, постепенно оседая, рассеялись на большой территории. Именно такая концепция и была положена в основу поисков вещества взорвавшегося тела, начавшихся в 1960 г.

В 1961—1962 гг. комплексная экспедиция КМЕТ АН СССР под руководством К. П. Флоренского провела космохимическую съемку на большой (десятки тысяч квадратных километров) территории. Объектом исследования явилась почва. На расстоянии 70—100 км к ССЗ от эпицентра взрыва была прослежена

зона обогащения почв метеорной пылью, уходящая далеко на ССЗ, контуры которой остались неочерченными. Хотя космическое происхождение найденных частиц сомнений и не вызвало (оно было подтверждено микрохимическими анализами на Ni), твердой уверенности в их принадлежности именно Тунгусскому метеориту не было, ибо почва не относится к числу стратифицированных объектов, а длительность сохранения в ней космических частиц до настоящего времени никем не исследована.

В связи с этим начиная с 1968 г. были проведены работы, также ориентированные на поиски мелкодисперсного космического вещества, но в стратифицированном объекте, коим применительно к условиям данного района является сфагновый торф верховых болот. Мох *Sphagnum fuscum*, широко распространенный в районе падения, имеет ряд интересных с точки зрения специалиста по атмосферным аэрозолям свойств: он получает минеральное питание почти исключительно из воздуха, и поэтому его минеральный состав отражает состав аэрозолей в ту или иную эпоху; скорость его прироста применительно к определенной зоне довольно стабильна и может быть в каждом отдельном случае достаточно точно установлена. Сфагновый торф на междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок встречается очень часто, и это дает возможность составления хорошей сетки отбора представительных образцов; адсорбционная способность сфагнового торфа очень велика, и, как показали модельные эксперименты, в определенной мере гарантирует от вторичного переотложения частиц.

На основании всего этого Ю. А. Львовым с соавторами в 1968—1970 гг. была предложена и апробирована методика [3], позволившая в дальнейшем перейти к систематической космохимической съемке на междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок, включая район падения Тунгусского метеорита. Было показано, что во всех слоях торфа в небольшом количестве встречаются сферулы, хотя бы частично представляющие собой метеорный конденсат, и что в слое торфа, отвечающем событиям 1908 г., имеет место отчетливое превышение фоновых величин. Вместе с тем было отмечено, что общее количество найденного материала очень мало и что на всей площади повала леса, вызванного Тунгусским взрывом, по самым оптимистическим оценкам оно не превышает нескольких тонн. В то же время общая масса Тунгусского метеорита (тугоплавкой его составляющей) оценивается в тысячи, десятки тысяч и даже [4] 1 млн. т. Возникает очевидное противоречие, причина которого до настоящего времени неясна.

В числе предположений, выдвинутых в этой связи, фигурирует представление о том, что значительная часть вещества метеорита могла выпасть в форме остроугольной мелкодисперсной фракции или даже в виде растворимых соединений, которые

в последующем были ассимилированы растительностью района выпадения. Этот взгляд опирался на результаты некоторых геохимических работ, проведенных в районе катастрофы в 1959—1960 гг. В ходе этих исследований было установлено, что вблизи эпицентра взрыва имеет место отчетливое увеличение содержания в почвах ряда элементов, в том числе таких, которые на уровне знаний середины 60-х годов не считались перспективными в метеоритике и космохимии: Yb, Pb [1, 2]. В связи с тем, что в то время космический материал, содержащий значительные количества этих элементов, известен не был, указанные результаты получили весьма сдержанную оценку и работы по их уточнению развернуты не были.

Положение изменилось после Мадридской сессии КОСПАР, на которой были доложены материалы, полученные в ходе исследования с помощью микрозонда частиц, собранных в ловушки во время ракетного зондирования мезосферных облаков [5]. Оказалось, что в них в большом количестве представлены Pb, Yb, Ag и платиноиды. Было высказано предположение, что эти частицы возникли в солнечных протуберанцах, однако нам кажется не менее вероятным возникновение их за счет дезинтеграции кометных ядер. Опубликование этих работ послужило причиной пересмотра установившегося отношения к данным геохимической съемки района эпицентра взрыва, в результате чего в 1972 г. возобновились работы в указанном направлении.

В качестве объекта исследований был снова выбран торф сфагновых верховых болот. В связи с тем, что основным методом поисков вещества в торфе был принят количественный и полуколичественный спектральные анализы, особо важным явилось то обстоятельство, что химический состав минеральной компоненты сфагнового торфа в большой степени отражает состав выпадающих в ту или иную эпоху аэрозолей, а не геохимические особенности подстилающих пород.

Рекогносцировочные исследования, предпринятые в 1972 г. (статья М. А. Левченко и А. А. Терентьевой в настоящем сборнике), дали обнадеживающий результат. Оказалось, что в слое, включающем прирост за 1908 г., имеет место «пиковая» концентрация некоторых элементов, в том числе Pb. Это послужило основанием для постановки более широких работ летом 1974 г. в рамках Комплексной метеоритной экспедиции ТГУ, Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР, ВАГО и Института геохимии и физики минералов АН УССР.

Отбор проб проводился по методике, описанной в статье М. А. Левченко и А. А. Терентьевой. Всего было взято 26 проб, расположенных на расстоянии 25 км от эпицентра взрыва, в пределах района разрушений, вызванных взрывной волной Тунгусского метеорита. Предварительная их обработка (отжиг) проведена на полевом стационаре, развернутом под руководст-

вом В. Э. Шнитке в 40 км к югу от места подения, в устье руч. Карель, в районе, во избежание индустриальных помех, удаленном от ближайшего населенного пункта (пос. Ванавара) на 40 км. Спектральный полуколичественный анализ выполнен К. Н. Алексеевой и А. В. Смирновой в спектральной лаборатории Института геохимии и физики минералов АН УССР. Отжиг проб торфа проводился при температуре 800°C в муфельных печах. Спектральный анализ был сделан в соответствии с методикой, принятой в том же институте. Определялось содержание свыше 20 химических элементов, в том числе Ni, Co, Bi, Cu, Ag, La, Yb, Y, Ce, V, Mn, Ti, P, Pb, Mo, Ba, Nb, Cr, Cs.

В отличие от М. А. Левченко и А. А. Терентьевой, использовавших количественный спектральный анализ, мы считали возможным на первом этапе работы применить полуколичественное определение, так как оно давало возможность расширить круг исследуемых элементов и проанализировать больше проб, что было важно для дальнейшей статистической обработки материала. Изучение цифровых данных показало следующее.

В подавляющем большинстве случаев колебания элементарного состава торфа в зоне катастрофных слоев (9—12) не выходят существенно за пределы флуктуаций в выше- и нижележащих слоях. В то же время сравнение содержания некоторых элементов в этих слоях, а также данных по отдельным колонкам между собой позволило говорить, что в ряде случаев содержание Pb, Ni, Ti, Zn, V, Ag отчетливо повышается в слое, отвечающем эпохе Тунгусского взрыва. Характерные кривые такого рода приведены на рис. 1.

Анализом размещения на местности колонок торфа, имеющих эффект такого рода, установлена определенная закономерность. Как правило, такие пробы группируются в районе, расположенном не далее 18 км к З или ЗСЗ от места Тунгусского взрыва. При этом наиболее насыщен район примерно в

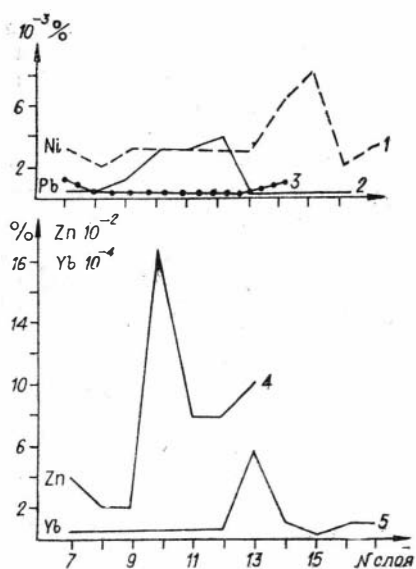


Рис. 1. Послойное распределение содержания Ni, Pb, Zn, Yb.

1 — торфяник в 2,5 км к ЮЗ от горы Острой (расчетный центр падения Тунгусского метеорита); 2 — то же, в 5 км к ЮВ; 3 — контрольная торфяная колонка (2 км от места падения метеорита); 4 и 5 — колонка торфа, взятая в южной части района разрушений, вызванных взрывной волной.

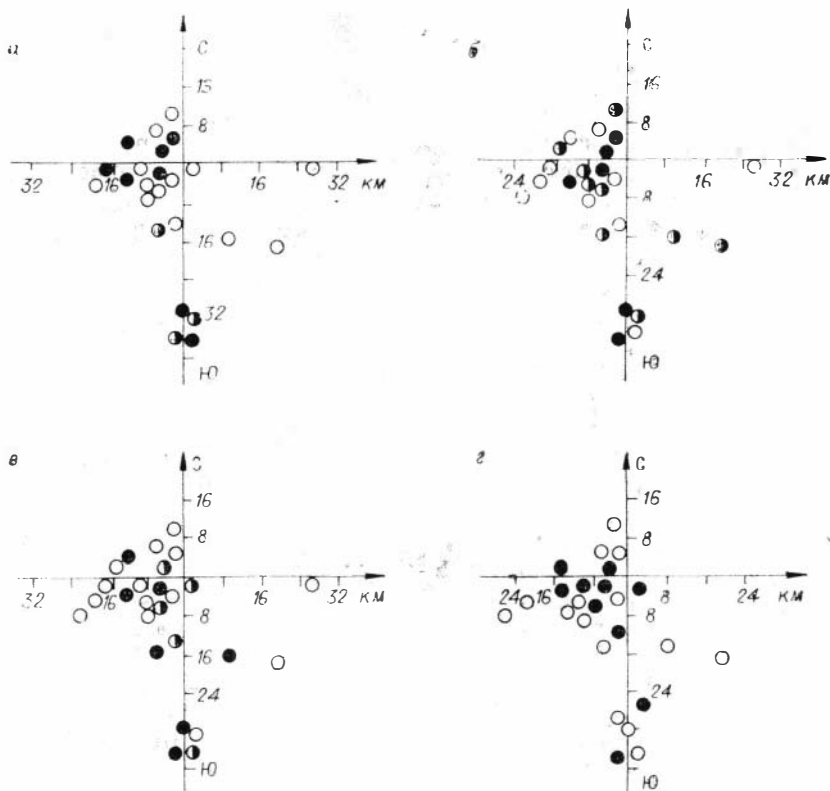


Рис. 2. Площадное распределение проб торфа с повышенным содержанием Ni (а), Yb (б), V (в), Ti (г) в слое, возникшем в 1908 г.

Начало осей координат расположено на вершине горы Фаррингтон в 2,5 км к С от Займки Кулика. ● — отчетливый эффект; ◐ — слабый; ○ — отсутствие эффекта.

5 км к ЗСЗ от Займки Кулика, который совпадает с местом соприкосновения траектории Тунгусского метеорита с поверхностью Земли — при условии наклона траектории под углом $35-40^\circ$ (рис. 2).

Своеобразно ведет себя Yb. Он обнаружен в двух группах проб — одна из них приурочена к эпицентру катастрофы, вторая находится примерно в 30—40 км южнее. В верхних слоях торфа Yb, как правило, нет. Следы его появляются в зоне, тяготеющей к месту взрыва (см. рис. 2, б) и обнаруживаются в нижележащих слоях. В некоторых колонках самые нижние слои (16 и 17) также лишены Yb. Колонки с повышенным содержанием Yb в катастрофных слоях по своему распределению на местности полностью совпадают с колонками, в которых имеет место «пиковое» содержание Ni.

Можно считать установленным, что в слое торфа, отвечающем времени разрушения Тунгусского метеорита, наблюдается заметное изменение микроэлементарного состава. В то же время делать из этого выводы относительно принадлежности «аномальных» элементов к Тунгусскому телу было бы преждевременно. Они могут быть связаны с выпадением на поверхность Земли пыли, поднятой взрывной волной, либо с изменением микроэлементарного состава в результате торфяного пожара, последовавшего за взрывом. Не исключено изменение биогеохимической обстановки в районе в последующие годы, которое могло вызвать изменения в скорости усвоения микроэлементов растениями. Не исключено также и выпадение мелкодисперсной фракции вещества Тунгусского метеорита.

Окончательная ясность в этом вопросе может быть получена только путем изотопного анализа «подозрительных» элементов и определения их соотношений с другими элементами, в частности Fe/Ni.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильина Л. П., Сливина Л. М., Демин Д. В. и др. Результаты спектрального анализа проб почвы из района Тунгусского падения.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 25—27.
2. Ковалевский А. Ф., Резников И. В., Снопов Н. Г. и др. Некоторые данные о распределении химических элементов в почвах и растениях в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 125—133.
3. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В. и др. Методы обнаружения космического вещества в некоторых природных объектах. Новосибирск, изд. ИГГ СО АН СССР, 1971, 9 с.
4. Фесенков В. Г. Помутнение атмосферы, произведенное падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.— «Метеоритика», 1949, вып. 6, с. 7—18.
5. COSPAR Space Research XIII, v. 2. Berlin, Akademie Verlag, 1973, p. 1099—1125.

И. П. ПАСЕЧНИК

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ И МИКРОБАРОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Геофизические явления, сопровождавшие Тунгусский воздушный взрыв тела космической природы, по характеру и интенсивности были необычными. Столь интенсивные ударные воздушные волны, вызвавшие близкий к радиальному вывал

леса на площади 2150 км², сейсмические волны, зарегистрированные малочувствительными сейсмографами на расстоянии свыше 5 000 км, инфразвуковые воздушные волны, зарегистрированные на расстоянии более 40 000 км, и другие явления могли быть порождены взрывом в тропосфере только с тротиловым эквивалентом в несколько десятков мегатонн. Однако до сих пор остается загадкой природа и механизм выделения столь значительной энергии при взрыве космического тела относительно небольших размеров за счет внутренней его энергии.

Установлению природы Тунгусского взрыва может способствовать более точная оценка его параметров. Под параметрами взрыва в настоящей работе понимаются координаты эпицентра взрыва (географическая широта φ и долгота λ); время взрыва; время прихода ударной воздушной волны в эпицентр, т. е. время в очаге землетрясения $O_{\text{эп}}$, вызванного взрывом; тротиловый эквивалент Q , абсолютная h и приведенная \bar{h} высоты взрыва, где $h = \frac{\bar{h}}{\sqrt[3]{Q}}$.

Оценка параметров Тунгусского взрыва производилась многими исследователями на основе данных о характере и размерах площади радиального вывала леса, по интенсивности геофизических явлений, сопровождавших взрыв, в том числе по интенсивности воздушных и сейсмических волн, зарегистрированных микробарографами, барографами, сейсмографами, по тепловому и световому излучению, вызвавшему пожары, и другим явлениям [1—5, 10—18, 22, 26, 30—35, 42—49, 51, 52 и др.].

Прежние оценки параметров по сейсмическим, микробарографическим и барографическим записям в ряде случаев недостаточно обоснованы, что связано с неполнотой и несовершенством исходных данных и недостаточной разработанностью применявшихся методов. Наиболее точные оценки φ и λ эпицентра, Q и h взрыва были сделаны на основе данных о характере и размерах площади вывала леса. Дальнейшее изучение сохранившихся разрушений в районе эпицентра комплексом геофизических методов и методами аэрофотосъемки и спутниковой съемки, очевидно, позволит получить более полные данные о последствиях и природе Тунгусского взрыва.

Оценку $O_{\text{взр}}$ и $O_{\text{эп}}$ наиболее точно можно сделать по записям сейсмических и воздушных волн. По-видимому, по ним же можно более обоснованно, чем это делалось ранее, дать оценку Q и h , используя представления о возбуждении воздушных и сейсмических волн воздушными источниками [19, 34, 35, 37 и др.].

По просьбе КМЕТ АН СССР автор провел изучение сохранившихся записей сейсмических и воздушных волн, зарегистрированных сейсмографами и микробарографами, возникших

при Тунгусском взрыве 30 июня 1908 г., и соответствующих опубликованных материалов. Ниже приводятся и обсуждаются полученные автором по сейсмическим и микрсбарографическим данным оценки параметров Тунгусского взрыва.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сейсмические данные. Записи сейсмических волн Тунгусского взрыва были получены только на четырех станциях: в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Йене [3, 33]. К настоящему времени сохранились записи только первой и четвертой станций. Их фотокопии воспроизводятся на рис. 1.

Наиболее интенсивные сейсмические записи получены на станции Иркутск на горизонтальных сейсмографах Цёльнера — Репсольда, снабженных оптической регистрацией, с периодом собственных колебаний маятника T_0 20—25 с. Сейсмографы практически не имели затухания. Логарифмический декремент затухания маятника, вычисленный по сейсмограмме, имел величину около 0,001. Более интенсивная запись получена на радиальной составляющей, ориентированной с севера на юг, практически вдоль азимута на эпицентр. На оригинале половинная амплитуда максимального колебания равнялась 2 мм. На составляющей восток — запад двойная амплитуда колебаний не превышала 0,1—0,2 мм. Правильность разметки направления вступления волн на сейсмограмме, указанная в [3—5, 30; см. также сопроводительное письмо и. о. заведующего сейсмостанцией Иркутск, сообщающее о высылке фотокопии сейсмограммы в метеоритный отдел Минералогического музея АН СССР, от 7 мая 1929 г.; фонды КМЕТ АН СССР], не вызывает сомнений. (В [3] указана ориентация по странам света маятников горизонтальных сейсмографов. Маятник с плечом,

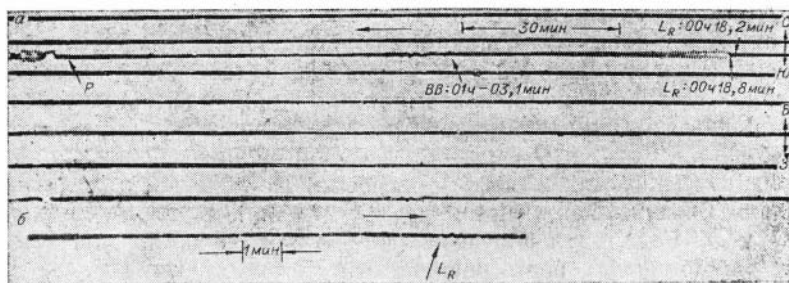


Рис. 1. Сейсмические записи землетрясения Тунгусского взрыва. а — записи на станции Иркутск: L_R — вступления фаз M_1 , релейских волн, BB — вступление воздушных волн, P — вступление продольных волн местного землетрясения; б — на станции Йена (01 ч 40 мин по среднеевропейскому времени).

ориентированным по азимуту восток — запад, регистрирует составляющие почвы в сейсмической волне (R_{ν}) в направлении север — юг, а ориентированный по азимуту север — юг (R_m) — по азимуту восток — запад.)

Ориентация сейсмографов может быть установлена также по соотношению амплитуд колебаний A (мкм) на записях землетрясений с направлениями на эпицентры, располагавшимися в различных азимутах, данные о которых приведены в сейсмических бюллетенях. Для Иркутска правильность разметки ориентации составляющих подтверждается также сравнением формы и амплитуды колебаний воздушных волн, зарегистрированных сейсмографами во время Тунгусского взрыва и при аналогичной ориентации сейсмографов на ряде станций, зарегистрировавших воздушные волны от воздушных источников в более позднее время.

Отсутствием затухания в сейсмографе объясняется значительная (1 ч 46 мин) длительность записи сейсмических колебаний с неизменным периодом T (20—25 с), равным T_0 на станции Иркутск (составляющая север — юг).

На станции Ташкент записи получены на горизонтальных сейсмографах Цёльнера — Репсольда, также не имевших затухания. Амплитуда максимального колебания на записи составляющей восток — запад равнялась 0,8 мм, север — юг — 0,5 мм. О длительности записи в сейсмическом бюллетене не сообщается.

На станции Тифлис на записи составляющей восток — запад сейсмографа Мильна отмечено вступление сейсмических колебаний с максимальной амплитудой 0,1 мм и продолжительностью около 10 мин. Эту запись некоторые авторы предположительно относят к землетрясению, вызванному Тунгусским взрывом [4, 5, 30, 38, 44, 51, 52].

На станции Йена запись получена на вертикальном сейсмографе конструкции Штраубеля [40], имевшем достаточное затухание и сравнительно большое увеличение (V) порядка 400 на периодах зарегистрированных колебаний $T=19$ с [44]. Запись состоит из трех сравнительно хорошо различимых колебаний (см. рис. 1).

В табл. 1 приведены данные о времени вступления фаз сейсмических волн, вероятных значениях максимальных A и T зарегистрированных колебаний в сейсмических волнах. Параметры сейсмографов (все они — с оптической регистрацией), на которых получены записи, приведены в табл. 2, а их амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) — на рис. 2. Для сравнения на этом же рисунке показаны амплитудно-частотные характеристики длиннопериодных сейсмографов типа СВКД, СГКД и ГСГ [6, 8, 28], на которых позднее были получены многочисленные записи сейсмических и воздушных волн от воздушных источников.

Т а б л и ц а 2

Параметры сейсмической аппаратуры, с которой были зарегистрированы сейсмические и воздушные волны Тунгусского взрыва [9]

Станция	Тип сейсмографа (с оптической регистрацией)	Т ₀ , с	Затухание маятника	V на T	Скорость раз- вертки, мм/мин	Составляющие			Увеличение на максимуме АЧХ, умнож
						верт.	С—Ю	В—З	
Иркутск	Легкий маятник Цёльнера — Ренсольда (R)	22	Без затухания	15 при T=40 с; 100—150 при T=25	2,8	Нет	Есть	Есть	300—500
	Маятник Мильна (M)	>10—20	То же	10—15	1,0	»	»	Нет	50
Ташкент	Цёльнера—Ренсольда (R)	22	»	100	3,0	»	»	Есть	300—500
Тифлис	Мильна	10—20	»	20	1,0	»	—	»	40
Йена	Штраубеля (S)	6,6	0,44	400 при T=19 с	15,0	Есть	Нет	Нет	2040

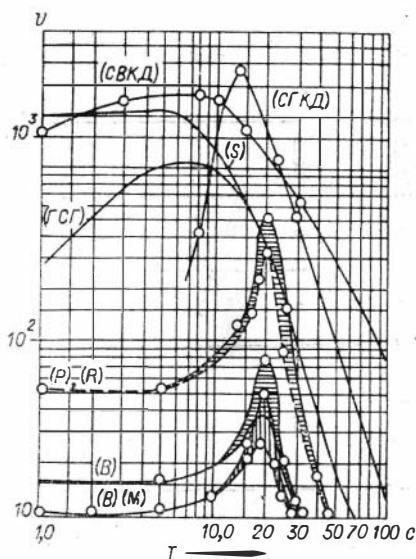


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики сейсмографов сейсмических станций России и Иены, действовавших в 1908 г.

Р — Цельнера — Репсольда, М — Мильна, В — ●Мори — Боша, ГСГ — Голицына, S — Штраубеля, Р — Ребер-Пашвица. СВКД и СГКД — длиннопериодные вертикальные и горизонтальные сейсмографы современных станций, на которых получены записи сейсмических и воздушных волн (см. рис. 5).

ций, удаленных от эпицентра Тунгусского землетрясения на расстояния Δ от 733 до 4550 км. Для выяснения вопроса, почему землетрясение было записано только на трех из них, были проанализированы возможности аппаратуры по регистрации объемных и поверхностных волн землетрясений от воздушного источника с магнитудой $M_s = 5$ (примерно такую магнитуду имело Тунгусское землетрясение). Данные об этой аппаратуре приведены в табл. 3. Как видно из нее, аппаратура была очень несовершенной, малочувствительной и не имела затухания. Скорость движения фотобумаги, на которой проводилась запись, как правило, не превышала 3 мм/мин. Пулковская станция, оборудованная сейсмографами Б. Б. Голицына с гальванометрической регистрацией, по своим параметрам, близким к параметрам аппаратуры современных станций, в июне 1908 г. находилась в регулировке, и 30 июня на ней регистрация не производилась [7]. На наиболее близкой станции Красноярск регистрация сейсмических колебаний в этот день также не производилась [4, 5].

Отсутствие затухания в сейсмографах станций Иркутск, Ташкент и Тифлис затрудняет определение типов и динамических характеристик, в том числе A и T зарегистрированных сейсмических волн, особенно когда периоды их колебаний совпадают или близки к T_0 . Записи в таких случаях сильно искажены; вступление наиболее интенсивных колебаний на сейсмограмме может отмечаться не в моменты вступления волн и не при $A_{\text{макс}}$, а в тех случаях, когда T в сейсмических волнах становится близким или совпадает с T_0 . Данные сейсмических бюллетеней о волнах, относящихся к Тунгусскому землетрясению, очень неполные. Это вместе с несовершенством сейсмических записей затрудняет определение параметров Тунгусского взрыва.

В 1908 г. в России действовало 18 сейсмических стан-

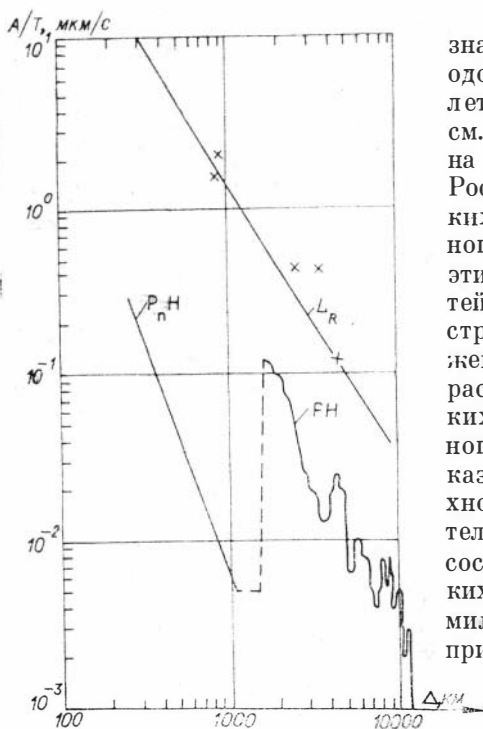


Рис. 3. Зависимость A/T в продольных (P_n , P) и релеевских (L_R) волнах от Δ для воздушного взрыва с $M_s = 5$; $h \approx 10$ км. Крестиками нанесены экспериментальные значения A/T , определенные по записям Тунгусского взрыва на станциях Иркутск, Ташкент, Тифлис и Пена.

объемных волн [в 5—10 раз больше, чем при землетрясениях с нормальной глубиной очага [24, 37, 45, 46]. Представление о примерном соотношении интенсивностей полных горизонтальных составляющих, характеризуемых отношением A максимального колебания к T в P_n , P и в поверхностных релеевских (L_R) волнах для Тунгусского землетрясения с $M_s = 5,0$ от воздушного взрыва, дают графики зависимости A/T от Δ .

Из рассмотрения графиков рис. 3, а также табл. 1 и 3 видно, что на имевшихся в 1908 г. горизонтальных сейсмографах P_n и P и соответствующие поперечные волны от Тунгусского взрыва, периоды которых не превышали 5—10 с, не могли быть зарегистрированы при $\Delta > 900$ км, так как их амплитуды не превышали нескольких десятых и сотых долей микрометра и, следовательно, на сейсмограммах составляли десятые и сотые доли миллиметра.

Расчет максимальных значений амплитуд и периодов колебаний в L_R для землетрясения с $M_s = 5$ (рис. 3; см. табл. 3) для различных Δ на записях действовавших в России в 1908 г. сейсмических станций, анализ вероятного ослабления амплитуд этих волн из-за особенностей сейсмогеологического строения в районах расположения станций и на пути распространения сейсмических волн, а также возможного уровня микросейсм, показал, что амплитуды поверхностных волн были сравнительно малыми и на записях составляли порядка нескольких десятых или сотых долей миллиметра. По указанным причинам записи поверхностных волн Тунгусского землетрясения на 15 станциях России не были получены.

Еще меньшие амплитуды имели объемные волны. При воздушных источниках соотношения между амплитудами поверхностных и

Таблица 3

Расчетные значения вероятных амплитуд полных горизонтальных составляющих и периодов поверхностных релеевских волн в главной фазе M_2 на записях сейсмографов сейсмических станций России для Тунгусского землетрясения

Станция]	Δ , км	Типы сейсмографов. Обозначения по [9, 27]	T_0 , с	Увеличение (V)		Ожидаемые значения			Возможная причина отсутствия записи
				вне резонанса	на резонансе	T , с	A/T , мкм/с	амплитуды колебаний на записи, мм	
Красноярск Иркутск	733	$2 B_{v,m}$	30	10—15	25—40	7—8	2,5	3—5	Не было регистрации
	970	$2 B_{v,m}, M_m, 2R_{v,m}$	30, 15, 22	10, 10, 40	30, 30, 100, 150	8—9	1,4	2	
Кабанск	988	$2B_{v,m}$	30	10—15	25—40	8—11	1,4	1	Мало V
Чита	1445	B_v	30	10—15	25—40	8—12	1,3	0,6	»
Екатеринбург	2360	R	70	5—15	10—15	9—13	0,30	0,1	»
Верный	2550	B				10—13	0,28	0,3	»
Ташкент	3090	$2R_{v,m}, M_m, B$	22, 20, 30	50, 10, 15	100—300, 25, 40	10—14	0,21	1,5—2,2	
Пулково	3730	$2 ГСГ$	12(25)		800	11—14	0,15	1,0—2,0	Не было регистрации
Юрьев	4005	$2R_{m,v}$	22, 70	50, 50	100—300	12—13	0,135	1,0—3,0	Береговая станция с повышенным фоном MS . Мало V
Дербент	4090	$2 B_{v,m}$	30		25—40	12—14	0,13	0,1	»
Баку	4140	R (большой)	20	50	300	12—14	0,13	1,0	Береговая станция с повышенным фоном MS . Ослабление сигнала

Балаханы	4160	R	20	50	300	13—15	0,12	0,5— 0,1	То же
Шемаха	4190	B	30	40—15	25—40	13—15	0,52	0,1	Мало V, ослабление сигнала
Тифлис	4310	3 E, M _ш , C, 2, 2B	70, 20, 20, 30, 70	50, 20 . .	40—15, 5—15, 40—15, 25—40	14—56	0,12	0,1	»
Боржом	4340	B	30	40—15	25—40	14—16	0,12	0,1	Мало V
Ахалкалаки	4400	2B	20	40—15	25—40	14—16	0,12	0,1	Береговая станция.
Батуми	4470	B	30	40—15	25—40	14—18	0,41	0,1	Мало V
Николаев	4550	1P	20	5,0	100	14—18	0,10	0,1	То же

П р и м е ч а н и я: Значение амплитуд смещений почвы для данного периода определяется умножением амплитуды колебаний на значение периода. Только на ст. Пудково было затухание маятников сейсмографов.

Согласно [9], дальность регистрации объемных волн сейсмографами Цёльнера — Репсольда, Ребер — Пашвица и других аналогичных при землетрясениях с $M_s = 5$ (т. е. с магнитудой по продольным волнам m_B , равным $\sim 5,6$) не превышала 500 км. Пример записи объемных и поверхностных волн сейсмографом Цёльнера — Репсольда близкого землетрясения на станции Иркутск показан на рис. 1, а.

Таким образом, на действовавших в 1908 г. в России сейсмических станциях объемные волны при Тунгусском землетрясении не могли быть зарегистрированы, поскольку их амплитуды были очень малыми и выделить их на сейсмограммах практически не представлялось возможным. Однако при малых Δ (порядка нескольких десятков километров — см. рис. 3) они были достаточно интенсивными — с амплитудой порядка сотен микрометров — и могли ощущаться очевидцами.

Микробарографические данные. Еще хуже положение с микробарографическими данными. Микробарографы по характеристикам, близким к характеристикам современных приборов, были установлены на английских метеостанциях и на станции в г. Слуцке. На остальных станциях России и других стран записи воздушных волн были получены на обычных барографах с перьевой чернильной регистрацией,

предназначенных для записи медленных изменений атмосферного давления. Их чувствительность была очень низкой — порядка 0,1 мм рт. ст. на 1 мм записи, а скорость движения бумаги — порядка 1 см/ч. Служба времени была очень плохой и, как правило, на большинстве станций не контролировалась должным образом. В силу этого точность отсчета времени вступления воздушных волн на барограммах, причем даже при сравнительно четком вступлении, составляла несколько минут. Определение амплитуд изменения давления в воздушной волне взрыва также было неточным, и на ряде станций ошибки достигали нескольких десятков и даже сотен процентов [1, 4, 5, 33 и др.]. Однако воздушные волны Тунгусского взрыва были столь интенсивными, что даже на несовершенной аппаратуре они были четко зарегистрированы на расстоянии 34 800 км в Потсдаме и на больших расстояниях в других районах [42, 43, 49, 51, 52 и др.].

Особую ценность представляет запись воздушной волны Тунгусского взрыва, зарегистрированная сейсмографами Цельнера — Репсольда в Иркутске. Эта запись получена на той же сейсмограмме, на которой зарегистрированы сейсмические волны от землетрясения, вызванного взрывом (см. рис. 1, а). Благодаря этому время вступления и пробега воздушной волны и периоды колебаний могут быть измерены более точно, чем на других станциях. Запись воздушных волн в Иркутске была получена и на сейсмографе Мильна [4, 5]. К сожалению последняя ни в оригинале, ни в копии не сохранилась (см. упомянутое выше письмо А. А. Трескова).

На рис. 4 приведены фотокопии записей воздушных волн

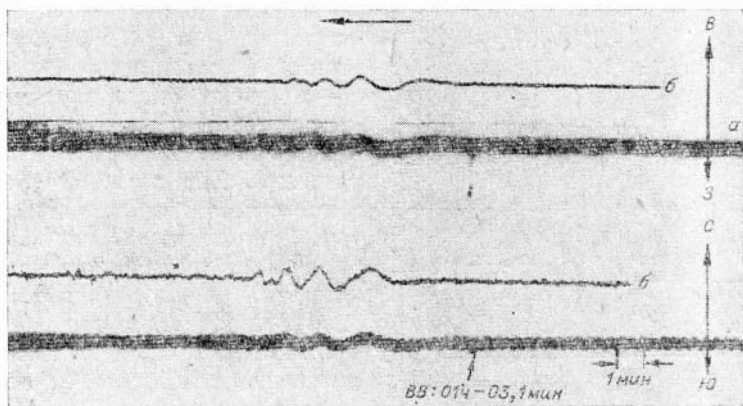


Рис. 4. Примеры записей воздушных волн, зарегистрированных сейсмографами от мощных источников.

а — при Тунгусском взрыве на станции Иркутск ($\Delta=977$ км) горизонтальными маятниками Цельнера — Репсольда: составляющие север — юг и запад — восток; б — горизонтальными сейсмографами типа СГГД при $\Delta=2100$ км (те же составляющие).

Тунгусского взрыва сейсмографами Цёльнера — Репольда в Иркутске и для сравнения записи, полученные в последнее время в тех же азимутах сейсмографами типа СГКД [24] от воздушного источника. Из сопоставления записей видно большое сходство формы колебаний. На рис. 5 воспроизведены примеры записей воздушных волн микробарографами.

Положение эпицентра Тунгусского взрыва хорошо локализуется по характеру вывала леса. Координаты центра этой площади по определению ряда авторов различаются на несколько минут. При дальнейших расчетах за эпицентр взрыва нами принимается точка с координатами $\varphi = 60^{\circ}53'09'' \pm 6''$ с. ш.; $\lambda = 101^{\circ}53'40'' \pm 13''$ в. д.

Дальнейшее уточнение координат эпицентра не повлияет на приводимые ниже оценки параметров землетрясения и взрыва по сейсмическим и микробарографическим данным, поскольку исходные данные получены с относительно малой точностью.

ТИПЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ПРИ ТУНГУССКОМ ВЗРЫВЕ

При мощных воздушных взрывах вдоль континентальных трасс зарегистрированы продольные $P_g, P_n, P, PP, PPP, P_cP, P_kP$, обменные PS, SP и другие волны и соответствующие им поперечные волны различных классов, а также поверхностные волны Релея L_R и каналовые волны типа $L_x, L_i, L_{g_1}, L_{g_2}$ и др. [24, 37]. Волны Лява (L_Q) от воздушных источников были зарегистрированы только при смешанных континентальных и океанических путях распространения, либо в тех случаях, когда их пути частично проходили через рифтовые зоны [24, 45, 46]. Пути распространения поверхностных волн от эпицентра Тунгусского взрыва до всех станций, зарегистрировавших эти волны, являлись континентальными. Поэтому маловероятна возможность регистрации L_Q . Выделение их в [16] на записях станции Иркутск основано на недоразумении; автор указанной работы ошибочно принял запись на составляющую,щей север — юг за составляющую восток — запад. В тех случаях, когда удается зарегистрировать одновременно L_Q и L_R , амплитуды их полных горизонтальных составляющих обычно близки.

Типы волн землетрясений устанавливаются по их кинематическим и динамическим характеристикам. К первым относятся время пробега волны, значения истинных и кажущихся скоростей, их дисперсия и т. д. ко вторым — периоды и амплитуды колебаний в волнах, характер их убывания с Δ , соотношения амплитуд волн различных типов и характер его изменения с Δ , поляризация (направление движения частицы среды в волнах) и ряд других. Объемные волны распространяются

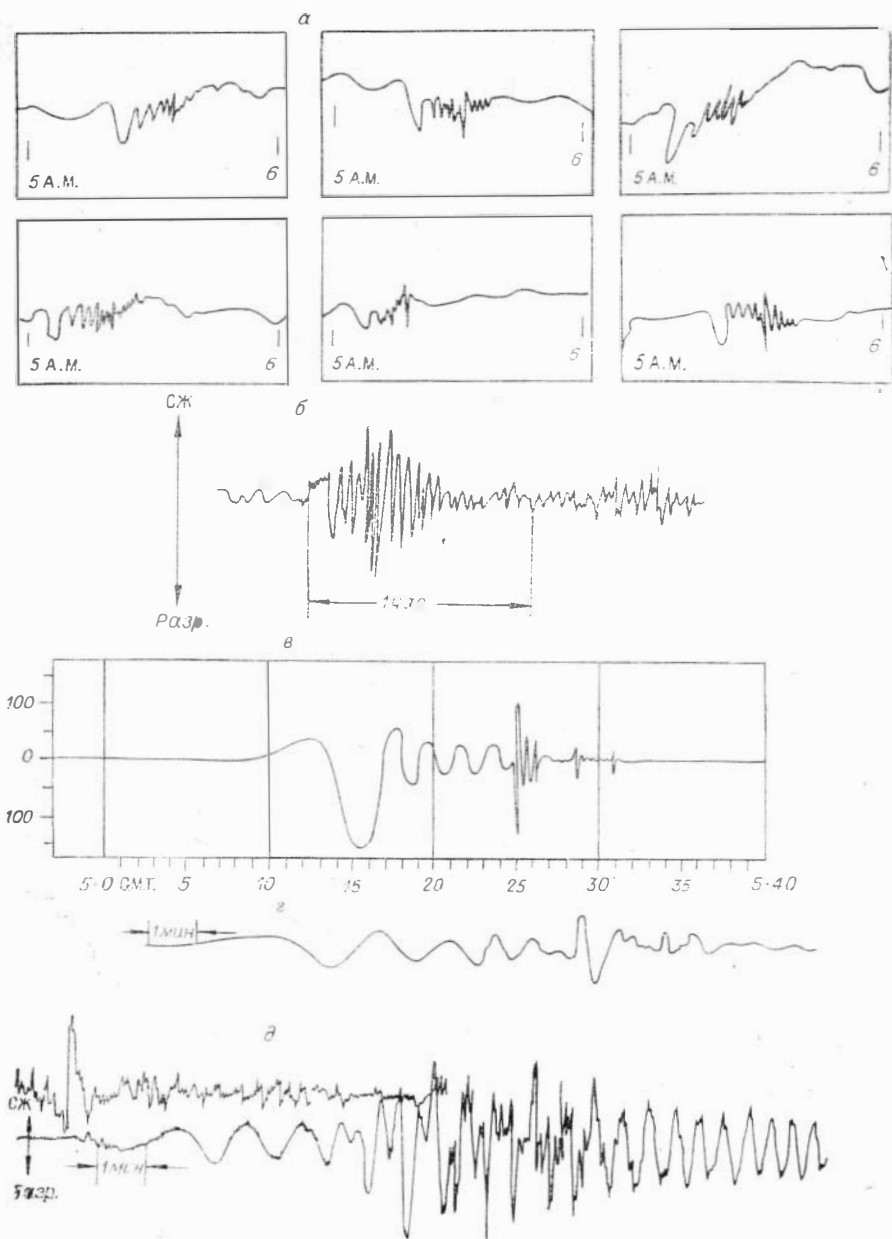


Рис. 5. Примеры записей воздушных волн микробарографами от Тунгусского взрыва (а, в) и более поздних взрывов в атмосфере (б, г, д), иллюстрирующие их сходство.

а — Ричардсона, станции Англии, $\Delta=5700\pm 5800$ км [51]; б — ЭДМБ-IV с гальванометрической регистрацией, $\Delta=6300$ км [23]; в — Ричардсона, станция Питерсфилд, $\Delta=5800$ км [51]; г — ЭДМБ-I, $\Delta=5600$ км [23]; д — то же, $\Delta=6200$ км.

с большими скоростями, чем поверхностные. Периоды колебаний в объемных волнах, возбуждаемых поверхностными источниками, на записях широкополосных сейсмографов меньше, чем в L_R . Амплитуды объемных продольных и поперечных волн для землетрясений с поверхностными очагами всегда меньше, чем для поверхностных волн.

Пользуясь указанными критериями, можно определить, какие типы волн зарегистрированы на сейсмограммах при Тунгусском взрыве и оценить возможный диапазон амплитуд объемных и поверхностных волн (см. ниже).

Амплитуды зарегистрированных поверхностных волн. Как следует из табл. 3, амплитуды поверхностных волн, измеренные по радиальной составляющей на сейсмограммах Тунгусского взрыва, при $T = 40$ с для $\Delta = 970$ км составляли порядка нескольких десятков микрометров, а на $\Delta \approx 4000$ км при $T = 20$ с — 15—20 мкм. На станции Йена при $T = 19$ с на вертикальном приборе $A \approx 1,15$ мкм. Экспериментальные значения A/T для Тунгусского землетрясения нанесены на рис. 3, иллюстрирующем убывание A/T L_R в зависимости от Δ . Как видно из графика, эти значения близки к расчетным.

Из анализа A/T (Δ) (см. рис. 3 и табл. 3) следует, что на сейсмограммах станций Иркутск, Ташкент, Тифлис и Йена могли быть зарегистрированы L_R , причем для Йены однозначно устанавливается релейевский тип волн, поскольку запись получена на вертикальном сейсмографе.

Наблюденные записи удовлетворяют и другим критериям, характерным для L_R (времени пробега t_L ; нормальной дисперсии групповых скоростей $v_{гр}$; уменьшению периодов в цуге колебаний во времени и закономерному их возрастанию в главной фазе, или фазе Эйри, M_2 с ростом Δ ; эллиптической поляризации колебаний в вертикальной плоскости; ретроградной траектории движения частицы грунта). К сожалению, для изучаемых записей столь мощный признак идентификации L_R , как эллиптически поляризованное ретроградное движение частиц грунта в вертикальной плоскости этого движения, использован быть не может, так как при Тунгусском взрыве трехкомпонентные записи ни в одной точке не были получены.

Характер дисперсии колебаний. Запись L_R землетрясений от воздушных взрывов представляет собой нормально диспергирующий цуг колебаний. Первые наиболее длиннопериодные фазы колебаний, распространяющиеся по континентальным трассам в верхней мантии и земной коре с $T = 70 \div 90$ с, имеют $v_{гр} = 3,5 \div 3,6$ км/с. Эти фазы колебания в начале цуга относятся к основной моде L_R и обозначаются M_1 . (Более короткопериодные колебания M_2 распространяются в земной коре со скоростями не менее 2,5 км/с). Последующие группы колебаний M_0 связаны с наличием осадочной толщи на пути распространения волн или в пунктах наблюдения.

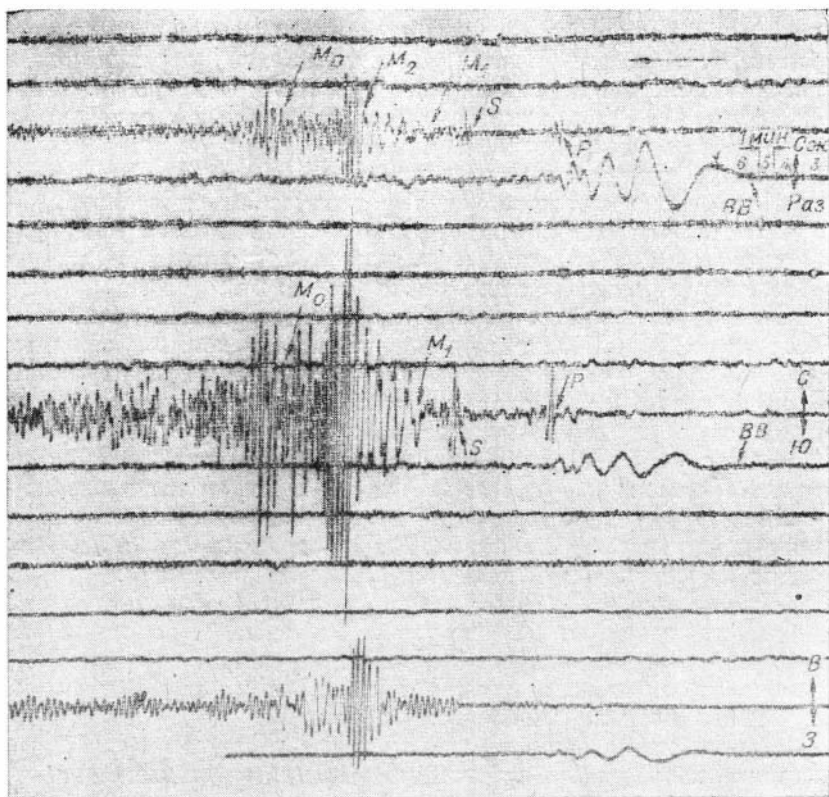


Рис. 6. Запись сейсмических воздушных волн от мощного воздушного источника трехкомпонентной установкой сейсмографов СГД с гальванометрической регистрацией [24].

P — вступление продольных, *S* — поперечных и *M₁* — поверхностных релеевских волн, *M₂* — главной их фазы, *M₀* — поверхностной волны, связанной с осадочным слоем, *ВВ* — воздушных волн.

Пример записи поверхностных сейсмических волн от воздушного источника на современной сейсмической аппаратуре приведен на рис. 6. На записях Тунгусского взрыва классическая картина диспергирующего цуга не видна, поскольку сейсмографы Иркутска не имели затухания, а запись в Йене малоинтенсивна. Однако на иркутской сейсмограмме нормальная дисперсия в начальной части цуга колебаний может быть установлена. Первые два периода в цуге на составляющей север — юг на иркутской сейсмограмме имеют $T \approx 35 \div 40$ с. Колебания с этими периодами не вызвали резонансных явлений в сейсмографе. Несколько позже — после того как периоды колебаний почвы уменьшились до 25—20 с — они вызвали резонансные явления в сейсмографе, что обусловило резкое воз-

растание их амплитуды и большую длительность записи (см. рис. 1. а).

Изменение периодов колебаний в L_R в зависимости от Δ . Отчетливо выраженной зависимости T_{LR} в M_1 от Δ для землетрясений с поверхностным источником не установлено [24]. В то же время T в M_2 закономерно возрастают с увеличением Δ в соответствии с приближенным, экспериментально установленным для землетрясений выражением $T \approx 0,85^3 \sqrt{\Delta}$. (Коэффициент имеет размерность $(с/км)^{1/3}$.)

На рис. 7 показаны усредненный график зависимости $T = T(\Delta)$, возможные области экспериментальных значений T , наблюдаемые при поверхностных источниках в M_1 и M_2 . На графике крупными кружками (1) показаны T воли, зарегистрированных в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Йене. В соответствии с указанной в предыдущем абзаце закономерностью $T = T(\Delta)$ значения T в M_2 при Тунгусском взрыве должны были составлять (в с): на записи станции Иркутск 8—9, Ташкент — 12—14, Тифлис — 15—16, Йена — 16—20. Из рассмотрения графика видно, что на станции Иркутск значения T зарегистрированных волн в начальной и в последующей частях сейсмограммы отвечают T_{M_1} . Первое колебание, выделяемое на записи в Иркутске с $T = 35-40$ с, относится к одному из последующих колебаний в диспергирующем пути $M_1 L_R$. Колебания с еще большими T не отмечены. Последующее наиболее четкое их вступление с $T = 22-25$ с тоже относится к M_1 с T , близким к T_0 сейсмографа.

Зарегистрированные на станции Ташкент колебания также должны быть отнесены к $M_1 L_R$ с T , близкими к T_0 сейсмографа (порядка 22 с). На станции Йена вертикальным сейсмографом зарегистрирована $M_2 L_R$ с $A_{\max} = 1,2$ мкм и $T = 19$ с.

Таким образом, по T , t_L и соотношению амплитуд отнесение записей, полученных на станциях Иркутск, Ташкент и Йена к зе-

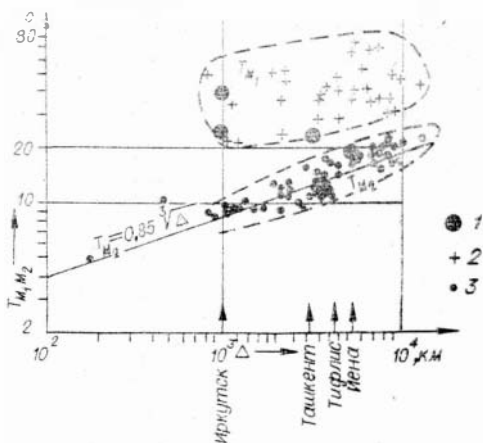


Рис. 7. Характер роста T в зависимости от Δ для максимальных колебаний в M_1 и M_2 в L_R для землетрясений с поверхностными источниками [24].

T_{M_1} — область экспериментальных значений в волнах M_1 ; T_{M_2} — то же, для волн M_2 . 1 — значения T на сейсмограммах Тунгусского взрыва; 2 — экспериментальные значения для T_{M_1} ; 3 — то же, для T_{M_2} .

млетрясению, связанному с Тунгусским взрывом, вполне правомерно. Это также устанавливается по соотношению амплитуд на соответствующих горизонтальных составляющих на записях станций Иркутск и Ташкент.

Отнесение записи, полученной станцией Тифлис, к Тунгусскому взрыву требует дальнейшего обоснования, в качестве которого могло бы служить совпадение наблюдаемой скорости распространения L_R с $T \approx 20$ с вдоль траектории эпицентра Тунгусского взрыва — Тбилиси, если бы эту скорость удалось установить, например, при мощном промышленном взрыве или каким-либо другим способом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ В ЭПИЦЕНТРЕ ПО ВРЕМЕНАМ ПРОБЕГА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Абсолютное время прихода ударной воздушной волны Тунгусского взрыва в эпицентр является временем $O_{эп}$. Его значение может быть определено по разности времен вступлений t_i фаз колебаний в поверхностных волнах на записях станций и соответствующих $t_L = \Delta/v_{гр}$. В рассматриваемом случае Δ известны с точностью ± 1 км. Поэтому точность определения $O_{эп}$ будет зависеть от точности отсчета абсолютных значений t_i различных фаз колебаний в L_R , точности определения T на сейсмограммах и точности, с которой известны дисперсионные кривые $v_{гр} L_R$ на трассе эпицентр — станция.

Точность отсчета t_i фаз волн. Из-за малой скорости движения фотобумаги и довольно широкой световой трассы (1—1,5 мм) на сейсмограммах приборов с оптической регистрацией, а также из-за нерезкого вступления фаз сейсмических волн точность отсчета времени вступления первых фаз колебаний поверхностных сейсмических волн в самых лучших случаях (например, на станции Иркутск) не превышает $\pm 0,5$ мм. При скорости развертки в 3 мм/мин это составляет ± 10 с, при 15 мм/мин (Йена) — порядка ± 4 с. По этим же причинам отсчет абсолютного времени, даже если допустить, что поправки за ход хронометров были известны с точностью ± 5 с, в самых благоприятных случаях при четких вступлениях фаз не мог быть произведен точнее, чем ± 17 с.

Точность определения T зарегистрированных волн. На записях Тунгусского взрыва, полученных в Иркутске и Ташкенте, T наиболее интенсивных колебаний определяется весьма неточно. С известным допущением можно принять, что на временах, близких к моментам вступлений, он близок к T собственных колебаний сейсмографов. На составляющей север — юг в самом начале записи станции Иркутск можно выделить вступление колебания с $T = 35 \div 40$ с.

На станции Йена запись малоинтенсивна и определить T удастся только для одного-двух колебаний в цуге: $T \approx 19$ с. При этом точность отсчета времени вступления фазы колебания в L_R не превышает $\pm 3-5$ с.

Для определения $O_{эл}$ по t_i поверхностных волн наибольшее значение имеют данные станций Иркутск и Йена, поскольку там определены периоды этих волн. Для станций Ташкент и Тифлис T в сейсмическом бюллетене не указаны, а сами записи пока не найдены; можно, однако, принять, что T сейсмических волн на обеих станциях близки к T_0 собственных колебаний маятников, не имевших затухания, и составляют 20—22 с.

Точность определения дисперсионных кривых. Для вычисления O взрыва по t_i необходимо знать зависимость скорости распространения этих волн от периода в диапазоне T от 15 до 40 с, т. е. знать дисперсионные кривые вдоль изучаемых трасс распространения волн. Для района Тунгусского взрыва дисперсионные кривые не установлены, поскольку он является асейсмичным, а мощные взрывы в нем не проводились. Поэтому при расчетах t_L приходится использовать известные дисперсионные кривые по трассам, частично проходящим по исследуемым или близким к ним; значения скоростей по этим трассам могут значительно отличаться от истинных. На это, в частности, может указывать приводимый на рис. 8 пример значительного различия дисперсионных кривых (1—6) вдоль континентальных трасс, построенных для одного и того же землетрясения, но проходящих по различным азимутам. Необходимо также оговорить, что использовать дисперсионные кривые, построенные по записям станции Иркутск по трассам, проходящим от эпицентров землетрясений из наиболее сейсмоактивных районов земного шара (Тихоокеанского, Средиземноморского и др.), нельзя, поскольку эти трассы проходят по смешанным путям и через рифтовые зоны.

При расчете t_L вдоль трасс эпицентр — Иркутск и эпицентр — Ташкент в настоящей статье взяты дисперсионные кривые, построенные по записям, полученным в Иркутске при Ташкентском землетрясении 25 апреля 1966 г. и по землетрясениям в Казахстане (1 и 2 на рис. 9). Для трассы эпицентр — Тифлис дисперсионная кривая построена по записям станции Махачкала от источников в Казахстане (3 на рис. 9). Для трассы эпицентр — Йена взята дисперсионная кривая, построенная

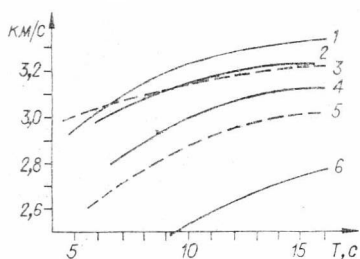


Рис. 8. Дисперсионные кривые $v_{гр} L_R$ от одного и того же поверхностного источника по различным континентальным трассам (1—6).

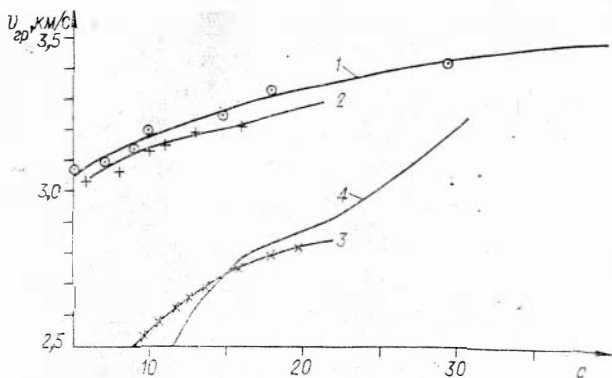


Рис. 9. Дисперсионные кривые $v_{гр}$ L_R .
 1 — Ташкент — Иркутск; 2 — очаг в Казахстане — Иркутск;
 3 — очаг в Казахстане — Махачкала; 4 — очаги в Афганистане — Йена.

по записям этой же станции от источников в Афганистане [8] (4 на рис. 9). Как видно, $v_{гр}$ по записям станций Махачкала и Йена очень близки и имеют относительно низкие значения $v_{гр}$ (порядка 2,8 км/с) на периодах 15—16 с.

Таким образом, в настоящее время нет дисперсионных кривых $v_{гр}$ вдоль трасс, по которым распространялись поверхностные волны от Тунгусского взрыва. Поэтому, пользуясь данными рис. 9, t_L можно определить с ошибкой в несколько десятков секунд.

В случае, если в районе эпицентра Тунгусского взрыва будут проведены большие промышленные взрывы, удастся определить дисперсионные кривые вдоль изучаемых трасс. Это позволит более точно определить $O_{эп}$. Но и в этом случае низкая точность определения времен вступлений и периодов волн на записях Тунгусского землетрясения не позволяет достичь той высокой точности определения ($\pm 1-2$ с), с какой это удается делать по современным наблюдениям над продольными волнами P .

Определение времени в очаге землетрясения. Для определения среднего значения $O_{эп}$ необходимо предварительно вычислить его значения по данным каждой станции. На каждой станции $O_{эп}$ находится как разность времен прихода t_{ij} фазы колебания L_R с данным периодом T_j и времени пробега этой же фазы t_{LR} , вычисляемой из $T_{LR} = \frac{\Delta}{v_{гр}}$. $v_{гр}$ для колебания с T_j берется по дисперсионной кривой, наблюдаемой по близкой трассе. Значения $v_{гр} L_R$ на изучаемых трассах показаны в табл. 4. Там же указаны вычисленные t_{ij} для каждой станции и соответствующие $O_{эп}$.

Определение $O_{\text{ЭП}}$ по сейсмическим данным

Станция	T , с	t_{ij} колебаний с данным T , ч, мин	Принятые значения $v_{\text{ГР}}$, км/с	$O_{\text{ЭП}}$ (Гринвичское) ч, мин
Иркутск	35—40	00—18,2	3,40—3,48	00—13,8 \pm 0,2
	20—25	00—18,8	3,30—3,35	00—13,9 \pm 0,2
Ташкент	15—20	00—32,0	3,20—3,25	00—15,4 \pm 0,6
Тифлис	15—20	00—40,8	2,75—2,80	00—14,9 \pm 0,3
Йена	15—19	00—46,0	2,70—2,85	00—14,6 \pm 0,5

Среднее значение $O_{\text{ЭП}}$ по пяти определениям оказалось равным 00 ч 14,5 \pm 0,8 мин. Ранее проведенное в [44] определение $O_{\text{ЭП}}$ (00 ч 12 мин), на наш взгляд, явилось следствием ошибки. Дело в том, что при расчетах t_{ij} волн (для наиболее длинно-периодных колебаний) в [44] для всех станций принято одно и то же очень заниженное значение $v_{\text{ГР}}$, равное 2,5 км/с, которое вдоль континентальных трасс для колебаний с $T = 40$ и 19 с еще нигде, в том числе и в Йене, не наблюдалось [36 и др.]. Более поздние определения $v_{\text{ГР}}$ в Йене [8] по трассам с востока на запад при $T = 19$ с дают наиболее низкие значения $v_{\text{ГР}} = 2,65$ км/с (при $T = 30$ с $v_{\text{ГР}} = 3,0$ км/с; 4 на рис. 9).

Большая погрешность определения $O_{\text{ЭП}}$ Тунгусского взрыва объясняется отсутствием данных о дисперсионных кривых на путях распространения сейсмических волн от эпицентра взрыва до станций, погрешностями в определении времен вступления волн, периодов и погрешностью за неравномерный ход хронометра.

Определение $O_{\text{ВЗР}}$ по времени пробега воздушных волн. $O_{\text{ВЗР}}$ может быть определено по разности времени вступления воздушной волны и времени ее пробега, определяемой по записи одной или нескольких станций. Наиболее благоприятна в этом отношении запись станции Иркутск, где на одной и той же сейсмограмме записаны сейсмические и воздушные волны (см. рис. 1). Вступления этих волн выделены на оригинале сейсмограммы начальником станции А. В. Вознесенским соответственно в 00 ч 18,8 мин и в 01 ч 03,1 мин [4, 5].

Низкая точность определения времени вступления по микробарограмме, времени пробега воздушных волн по $v_{\text{ГР}}^{\text{ВВ}}$ не позволяет оценить $O_{\text{ВЗР}}$ с достаточной точностью, так как скорости воздушных волн $v_{\text{ГР}}^{\text{ВВ}}$ на пути от пункта взрыва до станций и дисперсионные кривые $v_{\text{ГР}}$ этих волн неизвестны. Более того, значения $v_{\text{ГР}}$ для колебаний с одними и теми же периодами изменяются во времени, что обусловлено изменением темпера-

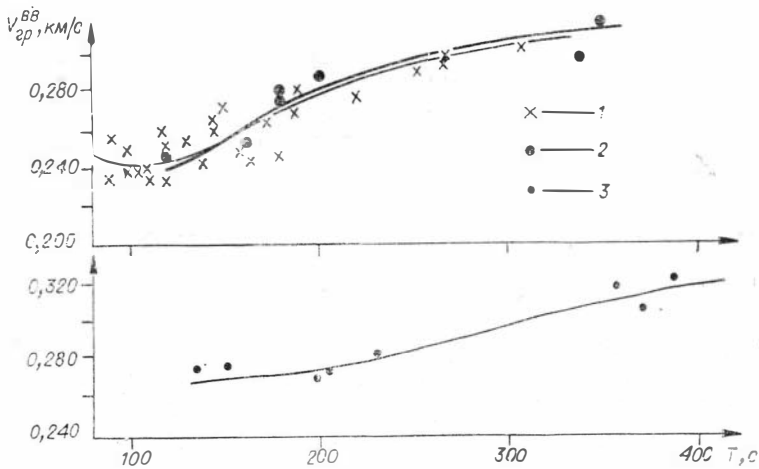


Рис. 10. Примеры дисперсионных кривых групповых скоростей инфразвуковых воздушных волн.

1, 2 — по записям на микробарографе ЭДМБ-1 и сейсмографе СВКД от воздушного взрыва; 3 — по записям микробарографа ЭДМБ-IV от взрыва вулкана Безымянный 30 марта 1956 г.

туры по высоте и скоростной стратификации атмосферы из-за изменений направлений и скорости ветра. Поэтому значения $v_{гр}^{вв}$ на одном и том же пути их распространения от взрывов, произведенных в различное время, могут сильно различаться. Например, для первых колебаний воздушных волн с периодами от 3 до 6 мин значения $v_{гр}$ колеблются от 260 до 310 м/с [37, 39]. Этот же эффект

виден на дисперсионных кривых (рис. 10) и на гистограммах (рис. 11), построенных по времени вступления воздушных волн в зависимости от направления их распространения по странам света. Значения скорости распространения в зависимости от направления могут меняться от 295 до 335 м/с. Строго говоря, знание дисперсионных кривых, полученных в других районах или в другое время, не дает возможности достаточно точно определить время Тунгусского взрыва.

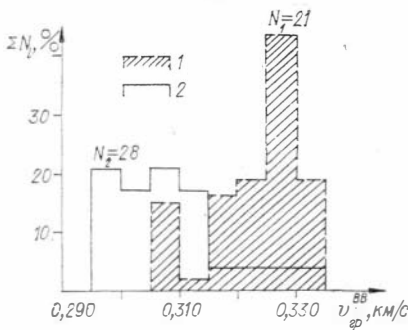


Рис. 11. Гистограмма, иллюстрирующая зависимость скорости распространения первых вступлений воздушных волн с периодами от 3 до 6 мин при их распространении с востока на запад (1) и с запада на восток (2).

Таким образом, по самым оптимистическим оценкам $O_{\text{эп}}$ по времени пробега воздушных волн может быть определено с точностью до нескольких минут. С такой же точностью по разности времени пробега воздушных и сейсмических волн может быть оценено время пробега ударной воздушной волны от точки взрыва до эпицентра. Согласно расчетам, произведенным по формулам для точечного взрыва [17], это время для принятых в данной работе его параметров могло составлять от 7 до 30 с. Однако ошибка в определении по экспериментальным данным $O_{\text{взр}}$ составляет минуты, т. е. в несколько раз превышает определяемую величину.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА

В табл. 5 приводятся значения сейсмических магнитуд $M_s H$ [27] для каждой станции, на которой были получены записи волн L_R Тунгусского землетрясения. $M_s H$ определялись из уравнения $M_s H = \lg A/T + 1,66\Delta^0 + 3,3$, где $A = A_{\text{макс}}$ равно полной горизонтальной составляющей H в L_R , а также по шкале [29]. Значение M_s по записи в Йене вычислено по амплитуде вертикальной составляющей, поэтому оно занижено на 0,17 единицы по сравнению с соответствующим значением $M_s H$, определенным по горизонтальной составляющей. С учетом сказанного, $M_s H$ для Йены при дальнейших расчетах принята равной 5,0. Среднее значение $M_s H$ по четырем станциям равно $4,9 \pm 0,2$. Учитывая неточность определения параметров аппаратуры, A и T , можно принять, что наиболее вероятное значение $M_s H$ для Тунгусского взрыва лежит в пределах от 4,5 до 5,0.

Т а б л и ц а 5

Значения A/T и магнитуд, вычисленных по записям поверхностных волн при Тунгусском взрыве

Станция	A/T	Составляющая	
		$M_s H$	$M_s Z$
Иркутск	1,13	4,8	—
	1,4	5,2	—
Ташкент	0,21	4,6	—
Тифлис	0,12	4,8	—
Йена	0,06	—	4,86

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРОТИЛОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА

Q можно оценить путем сопоставления периодов, амплитуд и энергий воздушных волн ($E_{\text{вв}}$), зарегистрированных сейсмографами и микробарографами при Тунгусском взрыве, а также по другим геофизическим явлениям, сопровождавшим взрывы с известными параметрами. Подобные оценки сделаны также по размерам области вывала леса, интенсивности светового из-

лучения, оцениваемой по ожогам деревьев, и др. Согласно определениям, основанным на сравнении максимальных значений давления в воздушных волнах, наблюдаемых на одних и тех же станциях в Англии при Тунгусском взрыве и более поздних мощных воздушных взрывах, Q Тунгусского взрыва оценен в 30 мгт [43]; в работах [47, 49] аналогичными методами Q определен в 50 мгт. Эти оценки являются приближенными, так как взрывы, энергия которых бралась за эталон, производились в разных районах в различное время года, с чем связано изменение скорости распространения и интенсивности волн. Кроме того, записи получены на различных эпицентральных расстояниях.

Более обоснованно Q получен на основе расчетов по площади радиального вывала леса в эпицентре ударной взрывной волны. Так, в работе [42] Q составляет 13 мгт. В статье [2], в которой учтены новые более полные данные о размере площади вывала леса, Q оценено в 30 мгт. В работе [12] эти оценки сделаны применительно к разным высотам взрыва: при 5 км $Q = 32$ мгт, 7 км — 37 мгт, 10 км — 44 мгт.

Пользуясь методом вычисления $E_{\text{вв}}$, предложенным в [52], оценки Q в настоящей статье произведены с учетом затухания волн на пути их распространения. Коэффициент затухания при этом был определен по записям взрывов, произведенных США на Маршалловых островах, данные о мощностях и высотах которых опубликованы в [41]. Полученные таким путем данные сравниваются со значением $E_{\text{вв}}$, вычисленным Уипплом для Тунгусского взрыва; при этом использованы также результаты расчета $E_{\text{вв}}$ взрывов по записям японских станций [53] и по записям, полученным автором [23]. По-видимому, для расчета $E_{\text{вв}}$ можно применить более совершенные способы, чем способ, предложенный в [51]. Однако в настоящей статье намеренно использован этот способ, поскольку автор метода при вычислениях $E_{\text{вв}}$ Тунгусского взрыва располагал оригиналами микробарограмм различных станций; этот же способ использован в [53]. Примеры записей воздушных волн мощных воздушных взрывов, в том числе взрыва вулкана Безымянного, приведены в работах [23—25, 37, 43, 47, 49, 53].

Значения $E_{\text{вв}}$, вычисленные для ряда наиболее мощных взрывов с известными параметрами, произведенных США на Маршалловых островах, и при Тунгусском взрыве без учета затухания волн на пути их распространения и с его учетом, приведены в табл. 6. Сравнивая значения $E_{\text{вв}}$ воздушного взрыва, произведенного США 20 мая 1956 г. над о. Наму, и Тунгусского взрыва, можно заключить, что Q последнего в 2 раза превышала Q взрыва над о. Наму и составляла порядка 20 мгт.

Таким образом, анализируя данные, полученные рядом авторов по ударным и инфразвуковым воздушным волнам, можно считать наиболее вероятной оценкой Q Тунгусского взрыва 20—50 мгт.

Определение Q взрыва по сейсмическим записям.

По интенсивности поверхностных сейсмических волн можно приблизительно оценить Q Тунгусского взрыва, используя для этого экспериментально установленные Ботом [37] соотношения между M_s или энергией сейсмических волн E_c и мощностью воздушных взрывов. Эта методика была применена в [44] для оценки энергии Тунгусского взрыва по магнитуде, определенной им по записи станции Йена и равной 5,0. Согласно сделанным оценкам, энергия Тунгусского взрыва составила $2 \cdot 10^{24}$ эрг, а $Q = 47$ мтг. В [44] использовано соотношение, установленное в [50] для вычисления E_c по $M_s H$ европейских землетрясений. Однако, как показано в [24], соотношения, связывающие $M_s H$ и E_c мелкофокусных землетрясений, неприменимы для определения E_c землетрясений от поверхностных источников.

Для перехода от E_c землетрясения от воздушного источника к энергии самого источника в [44] использован переводной множитель, установленный в [37] для случая распространения поверхностных волн по смешанным путям. Тунгусский взрыв произошел над континентом, пути распространения волн от эпицент-

Т а б л и ц а 6
Значения $E_{вр}$, зарегистрированных при контактных и воздушных взрывах на Маршалловых островах и Тунгусском взрыве

Дата и время в эпицентре по Гринвичу	31. 10. 52 г.	28. 2. 54 г.	20. 5. 56 г.	Тунгусский взрыв	Взрыв пультана Бельманского 30. 3. 56 г.
h , м	6	0	1296	3000—9000	0
Q , мтг	14	15	10	—	—
$E_{вр}$, эрг, без учета поглощения [53]	$50 \cdot 10^{20}$ (3900—4250)	$13,8 \cdot 10^{20}$ (1900—4250)	—	—	—
То же, по данным автора	$6,43 \cdot 10^{20}$ (3800—4250)	$9 \cdot 10^{20}$ (6400—22000)	$3,58 \cdot 10^{20}$ (5300—11000)	$3,2 \cdot 10^{20}$ (990—5720)	—
То же, с учетом поглощения	$5,47 \cdot 10^{21}$	$7,65 \cdot 10^{21}$	$3,58 \cdot 10^{21}$	$7,4 \cdot 10^{21}$	10^{23} (2250)—(4580)

Примечание. Даты, время, h и Q взрывов приведены по [41]. В скобках указаны диапазоны расстояний (км), на которых зарегистрированы воздушные волны.

Т а б л и ц а 7

Оценка высоты Тунгусского взрыва по сейсмическим данным

$M_s H$	Q , мГТ	h , км
4,5	30	6,2—7,3
4,5	50	7,3—9,2
5,0	30	2,5—4,4
5,0	50	3,3—5,2

фразуковым волнам, ее следует рассматривать как необоснованную.

Поскольку интенсивность сейсмических волн, возбуждаемых поверхностными источниками, зависит от Q и h , от поглощения и сейсмогеологических условий в районе эпицентра и на пути распространения волн [19—21], то при определении параметров Тунгусского взрыва необходимо использовать соответствующие соотношения между E_c или $M_s H$ и параметрами воздушных источников, полученных в сходных условиях. Необходимо, также, чтобы соответствующие соотношения были бы получены при сопоставимых мощностях и высотах источников.

Подобные приближенные теоретические соотношения между E_c , $M_s H$ и \bar{h} установлены в [19]. Из них следует, что для определения Q и h по M_s нужно знать либо h , либо Q . В рассматриваемом случае известны Q и $M_s H$, используя которые, мы сделали оценки h взрыва Тунгусского метеорита (табл. 7).

ОБ ОДНОВРЕМЕННОСТИ ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА

На основании показаний очевидцев могло появиться предположение о неединовременном взрыве. Очевидцы слышали на расстоянии от нескольких десятков до 1000 км шум и гул, на фоне которых 2—7 и более раз отмечались отдельные звуковые импульсы как от взрывов [1, 3, 4, 10, 18 и др.] с интервалами не менее 2 мин.

Распад крупных метеоритов вблизи земной поверхности наблюдался неоднократно. Например, это имело место в случае Сихотэ-Алиньского метеорита, падение которого, однако, не сопровождалось интенсивным взрывом. Раскол метеорита в атмосфере Земли и последующие взрывы его частей должны отделяться интервалами, по-видимому, не более нескольких секунд.

Малая разрешающая способность сейсмической и микробагрографической аппаратуры, на которой получены записи сейсмических и воздушных волн Тунгусского взрыва, не позво-

ра до станции Йена являлись континентальными. Поэтому соотношение, установленное в [37] для другого района, для определения энергии Тунгусского взрыва непригодно.

Таким образом, оценка энергии Тунгусского взрыва, сделанная в [44], некорректна. Поэтому, несмотря на то, что полученное значение энергии Тунгусского взрыва близко к оценкам, сделанным более корректно другими авторами по ударным и ин-

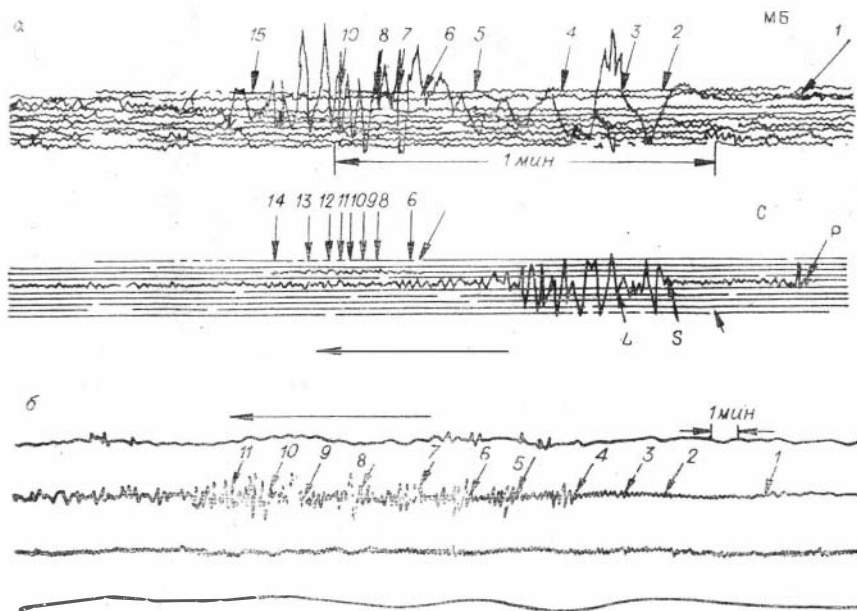


Рис. 12. Примеры записи многократных приходов воздушных волн в одну точку от единичного источника.

а — при $\Delta=180$ км (МБ — запись микробарографа, С — запись сейсмометра); б — при $\Delta=2800$ км, запись микробарографом типа ЭДМБ-IV. Цифрами обозначены приходы отдельных импульсов.

ляет выделить на них отдельные вступления волн. Сейсмические записи, полученные при Тунгусском взрыве, настолько искажены и несовершенны, что никакое сопоставление формы или особенностей записи с записями, полученными на современной аппаратуре, невозможно. В то же время амплитуды, периоды, спектры, форма и другие особенности записей микробарографов при Тунгусском взрыве и последующих воздушных взрывов могут быть сопоставлены между собой; могут быть также сопоставлены записи воздушных волн, полученные сейсмографами станции Иркутск.

Анализ и сравнение формы записи микробарограмм Тунгусского взрыва [51, 52 и др.] и многочисленных записей, полученных при последующих мощных воздушных взрывах, показал, что записи воздушных волн Тунгусского взрыва, особенно в начальной части, по своей форме практически тождественны записям мощных контактных и воздушных одиночных взрывов сравнимой мощности, зарегистрированных на одних и тех же или близких эпицентральных расстояниях. Это позволяет предполагать, что Тунгусский взрыв являлся одиночным взрывом, либо имело место несколько близких взрывов —

одновременных или происшедших через малые промежутки времени.

Что касается многочисленных приходов воздушных волн в одну и ту же точку, то подобное явление имеет место при одиночных воздушных взрывах, в том числе тротильных. Оно было неоднократно отмечено на расстояниях до 3000 км. Появление этих волн связано с изменением скорости распространения воздушных волн с высотой, т. е. с их рефракцией, возвращением их на земную поверхность и последующими многократными отражениями от земной поверхности. При воздушных взрывах известны случаи, когда многократные приходы звуковых волн на расстояниях в несколько сот и тысяч километров отмечались микробарографами и сейсмографами (рис. 12).

ВЫВОДЫ

Записи сейсмических волн землетрясения, вызванного Тунгусским взрывом, согласно данным сейсмических бюллетеней, получены на четырех сейсмостанциях: в Иркутске, Ташкенте, Тифлисе и Йене. Сохранились записи только Иркутска и Йены. Причиной отсутствия записей на других действовавших в 1908 г. в России сейсмических станциях явилось малое увеличение сейсмической аппаратуры. Станция Пулковое, оснащенная наиболее чувствительной аппаратурой, находилась в это время в регулировке и регистрация на ней не производилась.

Отнесение записей, полученных в Иркутске, Ташкенте и Йене, к Тунгусскому взрыву вполне правомерно. Это устанавливается по согласованию t_L сейсмических волн и по соотношению амплитуд на соответствующих горизонтальных составляющих на записях в Иркутске и Ташкенте. Отнесение записи, полученной в Тифлисе, к Тунгусскому землетрясению весьма правдоподобно, однако требует дальнейшего обоснования.

В Иркутске, Ташкенте, Йене и, возможно, Тифлисе зарегистрированы L_R . Для Иркутска и Ташкента это устанавливается по периодам колебаний и соотношению амплитуд на соответствующих горизонтальных составляющих, а для Йены еще и потому, что запись получена на вертикальном сейсмографе. Волны L_Q в Иркутске не зарегистрированы. Вообще, при воздушных взрывах эти волны с континентальными путями распространения и при отсутствии рифтовых зон на их пути не отмечены.

Первое колебание, выделяемое на записи радиальной составляющей север — юг станции Иркутск с T около 40 с, относится к одному из последующих колебаний в диспергирующем цуге фазы $M_1 L_R$. Предшествующие ему колебания с еще

большими T на записи не отмечены из-за малого увеличения сейсмографов. Последующее наиболее четкое вступление с $T \approx 22$ с также относится к фазе M_1 с T , близкими к T_0 сейсмографа.

Зарегистрированные в Ташкенте колебания также относятся к фазе $M_1 L_R$ с T , близкими к T_0 сейсмографа порядка 22 с. На станции Йена зарегистрирована фаза $M_2 L_R$.

На сейсмических записях, полученных в Иркутске и Ташкенте, T наиболее интенсивных колебаний определяется весьма неточно. Можно только считать, что он близок к T_0 сейсмографов, равному около 22 с. В Йене запись воли малоинтенсивна и определить период удастся только для одного-двух колебаний; он равен 19 с.

$O_{оп}$ Тунгусского взрыва по сейсмическим данным определяется с большой погрешностью. Согласно наиболее оптимистическим оценкам, $O_{оп}$ взрыва равно 00 ч 14,5 \pm 0,8 мин по гринвичскому времени.

$M_s H$ землетрясения, вызванного этим взрывом, по данным станции Йена равна около 5,0. Это значение в общем согласуется с данными станций Иркутск и Ташкент. По данным трех станций, $M_s H$ оценивается от 4,5 до 5,0.

Q Тунгусского взрыва, определенный по $E_{вв}$ с учетом затухания, равен 20 мгт. Наиболее достоверные оценки Q взрыва устанавливаются по площади вывала леса — 30—50 мгт.

h взрыва может быть оценена на основе зависимости между $M_s H$ или E_c и h , теоретически установленной для воздушных взрывов. Согласно оценкам, сделанным указанным способом, его высота при условии, что $M_s = 4,5$ и $Q = 30$ мгт, лежит в пределах 6,2—7,3 км; при $Q = 50$ мгт — 7,3—9,2 км. При $M_s = 5,0$ и $Q = 30$ мгт $h = 2,5 \div 4,4$ км, при $Q = 50$ мгт — 3,3—5,2 км.

Методы определения h , основанные на использовании t_L сейсмических волн или разности времен пробега воздушных и сейсмических волн, из-за неточного их определения в данном случае непригодны. Соответствующие расчеты показывают, что ошибки в определении h будут много больше самой определяемой величины.

По сейсмическим записям и записям воздушных волн нельзя сделать какого-либо заключения о природе Тунгусского взрыва. Однако большая мощность взрыва указывает на весьма высокую концентрацию энергии в единице массы космического тела.

Некоторые ранее сделанные оценки параметров Тунгусского взрыва недостаточно обоснованы. Это связано с неполнотой исходных данных и неразработанностью методов определения параметров. Некоторые авторы при их оценке исходили из неверных представлений о природе зарегистрированных волн [16 и др.] или использовали методы, разработанные для зем-

летрясений и непригодные для оценки энергии взрывов [44 и др.].

В заключение следует отметить, что привлечение современных представлений и методов для оценки параметров Тунгусского землетрясения и взрыва по имеющимся записям сейсмических и воздушных волн мало изменило ранее сделанные оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С. Новые материалы по полету большого метеорита 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири.— «Астрон. жур.», 1933, т. 10, № 4, с. 465—486.
2. Бронштэн В. А. Воздушные волны Тунгусского метеорита.— «Астрон. вест.», 1969, № 4, с. 214—222.
3. Бюллетень Постоянной Центральной сейсмической комиссии, 1908 г., апрель — июль. Под ред. Г. В. Левицкого. СПб., 1913, 77 с.
4. Вознесенский А. В. Хатангский метеорит 30 июня 1908 г. и отметка его падения сейсмографами в Иркутске.— «Природа», 1925, № 4—5, с. 113—114.
5. Вознесенский А. В. Падение метеорита 30 июня 1908 г. в верховьях р. Хатанги.— «Мироведение», 1925, т. 14, № 1, с. 25—38.
6. Голицын Б. Б. Избранные труды, т. II. Сейсмология. М., Изд-во АН СССР, 1960, 490 с.
7. Голицын Б. Б. О результатах новейших сейсмических наблюдений в Пулково.— «Изв. Пост. Центр. сейсм. комис.», 1909, т. 3, вып. 2, № 1, с. XXVI—XXVII.
8. Гют Д., Хартер Д. Исследование океанического и континентального строения земной коры по дисперсии поверхностных волн.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1970, № 10, с. 71—78.
9. Землетрясения в СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961, 412 с.
10. Золотов А. В. Проблема тунгусской катастрофы 1908 года. Минск, «Наука и техника», 1969, 202 с.
11. Золотов А. В. К вопросу о концентрации энергии при взрыве Тунгусского космического тела.— «Журн. технич. физики», 1967, т. 37, № 11, с. 2089—2094.
12. Золотов А. В. Оценка энергии Тунгусского взрыва 1908 г.— В кн.: Современ. состояние пробл. Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 22—23.
13. Золотов А. В. Новые данные о Тунгусской катастрофе.— «Докл. АН СССР», 1961, т. 136, № 1, с. 84—87.
14. Золотов А. В. К вопросу о кажущемся запаздывании начала магнитного возмущения относительного момента взрыва Тунгусского космического тела 1908 г.— В кн.: Пробл. Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1967, вып. 2, с. 151—153.
15. Зоткин И. Т. Современное состояние изучения Тунгусского метеорита.— «Астроном. календарь на 1965 г.». М., Физматгиз, 1964, с. 233—249.
16. Иванов К. Г. Момент взрыва Тунгусского метеорита и время запаздывания геомагнитного эффекта.— «Геомагнетизм и аэродомия», 1965, т. 5, № 6, с. 1119—1120.
17. Коробейников В. П., Мельников Н. С., Рязанов Е. В. Теория точечного взрыва. М., Физматгиз, 1964, 332 с.
18. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. М., Изд-во АН СССР, 1949, 196 с.
19. Коган С. Я. К вопросу о связи параметров воздушного взрыва с сейсмической энергией.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1965, № 4, с. 9—22.

20. Люкэ Е. И. Зависимость энергии поверхностной волны от параметров воздушного взрыва.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1967, № 4, с. 14—25.
21. Люкэ Е. И. Экспериментальное изучение зависимости энергии волн Релея от мощности и высоты взрыва в воздухе.— «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1967, № 2, с. 32—40.
22. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Пробл. Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 103—112.
23. Пасечник И. П. Наука доказала: ядерные взрывы можно обнаружить, где бы они ни проводились.— «Природа», 1962, № 7, с. 3—12.
24. Пасечник И. П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М., «Наука», 1970, 191 с.
25. Пасечник И. П. Воздушные и сейсмические волны, возникшие при взрыве вулкана Безымянный 30 марта 1956 г.— «Изв. АН СССР, серия геофиз.», 1958, № 9, с. 1121—1126.
26. Пасечник И. П. Предварительная оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита 1908 г. по сейсмическим и барографическим данным.— В кн.: Современ. состоящие пробл. Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 31—35.
27. Рыкачев М. Отчет по Николаевской главной физической обсерватории за 1907 г.— «Зап. Академии наук. Отд. физ.-мат. наук», 1909, т. 24, № 5, 136 с.
28. Саваренский Е. Ф., Шечков Б. Н. Строение земной коры в Евразии по дисперсии поверхностных волн.— «Изв. АН СССР, серия геофиз.», 1962, № 5, с. 700—704.
29. Соловьев С. Л., Шебалин П. В. Определение интенсивности землетрясений по смещению почвы в поверхностных волнах.— Изв. АН СССР, серия геофиз.», 1957, № 7, с. 926—930.
30. Тресков А. А. К вопросу о сейсмических волнах, сопровождавших падение Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.— «Астроп. журн.», 1934, т. 11, № 6, с. 597—599.
31. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского взрыва.— В кн.: Пробл. Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1967, вып. 2, с. 40—61.
32. Фесенков В. Г. Помутнение атмосферы, произведенное падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г.— «Метеоритика», 1949, вып. 6, с. 48—53.
33. Фесенков В. Г. О воздушной волне, произведенной падением Тунгусского метеорита 1908 г.— «Метеоритика», 1959, вып. 17, с. 116—120.
34. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеорных тел. М., «Наука», 1969, 87 с.
35. Цикулин М. А. Приближенная оценка параметров Тунгусского метеорита 1908 г. по картине разрушений лесного массива.— «Метеоритика», 1969, вып. 20, с. 87—94.
36. Шечков Б. Н., Юркевич О. И. Определение толщины земной коры на украинском кристаллическом массиве по дисперсии поверхностных волн.— «Геофиз. сборник», Киев, Изд-во АН УССР, 1962, вып. 1 (3), с. 75—79.
37. Bath M. Seismic records of explosions — especially nuclear explosions. Part III.— Försaverts Forschungsanstalt Avdelning 4, 1962, Stockholm, 116 p.
38. Catalogue of Earthquakes for 1908.— «Centr. Bureau Intern. Seism. Assoc., serie B.», Strasbourg, 1913, IV, 69 p.
39. Dohn W. L., Shaw D. M. Exploring the atmosphere with nuclear explosions.— «Reviews of Geophys.», 1967, v. 5, № 1, p. 53—82.
40. Eppenstein O. Das Vertikalseismometer der seismische Station zu Jena.— «Gerlands Beiträge zur Geophysik», 1908, Bd. 9, S. 593—604.
41. Griggs D. T., Press F. Probing the Earth with nuclear explosions.— «J. Geophys. Res.», 1961, v. 66, № 1, p. 237—258.

42. Hant I. N., Palmer R., Penny S. W. Atmospheric waves caused by large explosions.— «Phil. Trans.», 1960, v. 252, p. 275—315.
43. Jones R. V. Sub-acoustic waves from large explosions.— «Nature», 1962, v. 193, № 4812, p. 229—232.
44. Martin H. Die Tunguska-Katastrophe in geophysikalischer Sicht.— «Sterne», 1966, v. 42, № 3/4, p. 45—51.
45. Oliwer J., Ewing M. Seismic surface waves of Palisades from explosions in Newada and Marshall islands.— «Proc. Acad. Sci. USA», 1958, v. 44, № 4, p. 780—785.
46. Pomeroy P. W. Long period seismic waves from large near-surface nuclear explosions.— «Bull. Seism. Soc. Amer.», 1963, v. 53, № 1, p. 109—149.
47. Posey J. W., Pierce A. D. Estimation of nuclear explosion energies from microbarographs records.— «Nature», 1971, v. 232, № 5308, p. 253.
48. Press F., Harkrider D. Propagation of acoustic—gravity waves in the atmosphere.— «J. Geophys. Res.», 1962, v. 67, № 10, p. 3889—3908.
49. Scorer R. S. The dispersion of a pressure pulse in the atmosphere.— «Proc. Roy. Soc. Amer., ser. A», 1950, v. 201, № 1064, p. 137—157.
50. Vanek J., Stelzner J. Einheitliche Bestimmung von Erdbebenmagnituden für mitteleuropäische Stationen.— «Travaux de l'Institut geophysique de l'Academie Tschecoslovaque des Sciences», 1960. (Geofisikalni sbornik, № 136.) S. 299—339.
51. Whipple F. J. The Great Siberian meteor and the waves seismic and aerial which it produced.— «Quart. J. Roy. Meteor. Soc.», 1930, v. 56, № 236, p. 287—304.
52. Whipple F. J. On phenomena related to the great Siberian meteor.— «Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.», 1934, v. 60, № 257, p. 505—513.
53. Jamamoto Ryozaaro. The microbarographic oscillations produced by the explosions of hydrogen-bomb.— «The meteorological notes of the Meteorological Research Institute, Kyoto University», 1954, ser. 2, № 1, p. 120—133.

В. П. КОРОБЕЙНИКОВ, П. И. ЧУШКИН, Л. В. ШУРШАЛОВ

О РАСЧЕТЕ НАЗЕМНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПРИ ВОЗДУШНОМ ВЗРЫВЕ МЕТЕОРИТА

Взрыв крупного метеорита, происшедший на небольшой высоте в атмосфере, может вызвать значительные разрушения на поверхности Земли. Траекторные и энергетические характеристики метеорита в момент взрыва, как правило, не бывают точно известными. Определение их, исходя из количественной информации, описывающей картину произведенных разрушений, и некоторых зарегистрированных геофизических эффектов при взрыве метеорита, представляет собой решение обратной задачи.

Авторами была разработана математическая модель и метод расчета системы ударных волн, возникающих при полете и взрыве крупных метеоритных тел в атмосфере [8—9, 18—19].

Эти волны моделируются системой волн, которые образуются при взрыве полубесконечного цилиндрического заряда с удельной энергией, изменяющейся по определенному закону в зависимости от координаты ξ вдоль оси заряда. Условно различаются две части энергии заряда, отвечающие сферической (энергия взрывной волны E_0) и цилиндрической (удельная энергия баллистической волны $E_1 = E_1(\xi)$) частям ударной волны. Ось заряда ориентируется вдоль траектории, наклоненной под углом α к поверхности Земли, а его передняя точка располагается на высоте H_0 в конечной точке траектории метеорита. Все эти величины рассматриваются как основные определяющие параметры модели, причем в зависимость $E_1 = E_1(\xi)$ входят свои определяющие параметры.

Определяющие параметры находятся в результате решения обратной задачи, которое ищется на основе некоторых физических данных, зафиксированных при взрыве метеорита. От точности этих данных существенно зависит точность искомого решения. Здесь проводится расчет движения ударной волны в атмосфере и ее отражения от поверхности Земли с помощью метода, в котором используются как точный численный подход, так и аналитические приближения. Введение указанной модели позволяет не вникать в физическое существо явления, происходящего с метеоритом на конечном участке траектории и сопровождающегося выделением или преобразованием энергии и созданием мощной ударной волны. При таком моделировании необязательно знать, имеют ли место действительный взрыв или резкое усиление и отход баллистической волны при быстром нестационарном торможении тела.

В случае взрыва Тунгусского метеорита, к которому была применена эта модель, собраны и изучены сейсмограммы и барограммы, данные об области лучистого ожога деревьев, установлена детальная картина вывала лесного массива на месте катастрофы.

Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по барографическим записям проводилась рядом авторов. В [16] определена величина тротилового эквивалента взрыва, равная 10 ± 5 мкг. В [12] тротильный эквивалент, полученный по барограммам путем сравнения с воздушным ядерным взрывом, имеющим известные параметры, равняется 30—40 мкг, а высота взрыва — 3,3—9,2 км. Здесь проанализированы также 4 имеющиеся сейсмограммы, которые из-за низкой точности позволяют найти лишь магнитуду землетрясения, но не высоту взрыва. Эти оценки слишком широки и недостаточно точны. Отметим, что даже при современных способах измерения воздушных волн, зарегистрированных при взрыве метеорита Ревелсток, оценки его энергии по барограммам [21] в зависимости от пункта измерений и способа обработки отличаются на порядок.

Данные о конфигурации области леса, подвергшегося лучистому ожогу [2, 3], позволяют представить лишь общую картину явления. Применять их для нахождения энергии и высоты источника ожога, который определенно не является точечным, несравненно более трудно и менее надежно, чем использовать информацию о вывале леса. Это объясняется гораздо большими ошибками измерений, необходимостью интегрировать крайне сложное уравнение переноса и отсутствием какой-либо информации о частотных характеристиках излучающего метеоритного тела, которые играют решающую роль при распространении лучистого потока через атмосферу. Заметим также, что коэффициент поглощения воздуха может изменяться на шесть порядков. Тем не менее данные по ожогу интересны для энергетических оценок.

Основным последствием взрыва Тунгусского метеорита является разрушение лесного массива, которое наиболее достоверно изучено методом статистического анализа. Однако эти данные, описывающие поле направлений поваленных деревьев, содержат заметные ошибки измерений и подвержены влиянию локальных факторов. Например, азимут оси симметрии области взрыва, определенный в [14] по разным условиям, отличается на 16° .

В работе [13] была рассмотрена внутренняя структура зоны вывала леса, построено поле стандартных отклонений s направлений повала деревьев от среднего и показано, что величина s обратно пропорциональна аэродинамическому давлению, валившему деревья. К сожалению, ввиду отсутствия экспериментального значения для соответствующего коэффициента пропорциональности, а также большого разброса у поля s , использовать эту информацию при расчетах действия ударной волны непосредственно не удастся. При повале деревьев основным разрушающим фактором является динамический напор $q = \rho u^2$, вычисленный по плотности ρ и горизонтальной составляющей скорости u потока за ударной волной непосредственно после ее отражения от Земли. При расчетах надо знать, какому значению $q = q_{\min}$ отвечают внешняя граница области поваленного леса и граница зоны стоячего леса и хаотического вывала вблизи эпицентра. Принимаемые обычно в расчетах данные [22] о минимальной разрушающей величине q_{\min} для деревьев могут оказаться ненадежными для лиственниц, растущих в Сибири в условиях вечной мерзлоты. В этой связи необходимо проведение соответствующих экспериментов в натуральных условиях.

Для решения обратной задачи при моделировании взрыва Тунгусского метеорита в качестве основных исходных данных нами используется карта-схема вывала леса [14]. Искомые определяющие параметры модельного взрыва находятся из усло-

вий соответствия рассчитанной зоны наземных разрушений с фактически существующей.

При практической реализации модели взрыва Тунгусского метеорита вносится ряд упрощающих допущений. Воздух рассматривается как совершенный газ с постоянным отношением удельных теплоемкостей; не учитываются как физико-химические процессы, происходящие в нем при высоких температурах, так и перенос энергии излучением. Распределение удельной энергии баллистической волны на активном участке траектории, оказавшем воздействие на вывал леса, принимается заданным по некоторому закону. Расчет распространения ударных волн в неоднородной атмосфере на поздней стадии проводится в рамках секторного приближения, в котором не учитывается перетекание энергии из нижней части возмущенной области в ее верхнюю часть. Влиянием ветра пренебрегается, а атмосфера рассматривается либо стандартной, либо изотермической. При расчете отражения ударной волны поверхность Земли принимается плоской, а нерегулярная стадия отражения рассчитывается с помощью эмпирической зависимости.

Введение всех этих допущений целесообразно, поскольку они, с одной стороны, отвечают точности используемых фактических данных по вывалу леса, а с другой — существенно сокращают трудоемкость вычислений, связанных с многократным решением трехмерной нестационарной задачи. Более строгий расчет нерегулярного отражения ударной волны представляет собой весьма сложную задачу, для которой сейчас только развиваются численные методы.

Вообще говоря, как неоднократно указывали авторы, решение обратной задачи может быть неоднозначным, что во многом зависит от ее постановки. В частности, одну и ту же форму внешней границы зоны вывала леса в ее головной части можно получить при разных комбинациях H_0 и E_0 . Однако если в постановке задачи учитывать положение не только внешней границы, но и линии, ограничивающей стоячий лес вблизи эпицентра, то параметры H_0 и E_0 определяются практически однозначно. Для этой же цели можно брать какую-либо другую натурную линию $g = \text{const}$, например, линию максимальных разрушений, которая, правда, имеет менее регулярную форму и установлена, очевидно, с большим разбросом [13].

Специальное исследование было проведено для выяснения неоднозначности решения по углу α . Для ряда фиксированных значений α из вероятного интервала $\alpha = 15^\circ \div 45^\circ$ отыскивалось такое распределение $E_1(\xi)$ из некоторого выбранного класса, которое давало бы хорошее соответствие между рассчитанной и фактической картиной вывала леса. Рассматривался следующий класс распределений:

$$E_1(\xi) = E_{10} \exp \left[-k \bar{\xi}^n (1 + \bar{\xi}^n) \right],$$

где $\bar{\xi} = \xi/\xi_0$, ξ_0 — характерная длина, k и n — некоторые параметры, варьирующие следующим образом: $\xi_0 = 10 \div 30$ км, $n = 2$ и 3 , $k = 0,5$ и 1 . Этот класс распределений был выбран на основе большой серии расчетов (проведенных с учетом экспериментальных данных по сопротивлению и абляции) квазистационарного движения в стандартной атмосфере Земли сферических тел различного размера и плотности при различных высотах, скоростях и углах входа. Принятые распределения $E_1(\xi)$ отражают как обычные нарастающие зависимости энерговыделения при входе метеоритных тел в плотные слои атмосферы, так и наблюдающийся в некоторых случаях спад энерговыделения на конечном участке траектории.

Как показало исследование, для $\alpha = 30 \div 40^\circ$ удается получить зоны вывала, близкие по форме к наблюдаемой, которые, однако, для разных α существенно различаются по своей внутренней структуре. При $\alpha = 40^\circ$ рассчитанное поле направлений поваленных деревьев хорошо согласуется с фактическим, в то время как при $\alpha = 30^\circ$ отклонения от радиальности слишком велики (см. рис. 1 и 3). Для $\alpha < 30^\circ$ при различных зависимостях $E_1(\xi)$ из данного класса рассчитанные зоны разрушений сильно отличаются от натурной по форме и, в особенности, по внутренней структуре.

Таким образом, включение в постановку обратной задачи условия близости полей направлений поваленных деревьев сильно сужает возможный диапазон изменения угла α ($\alpha = 35 \div 40^\circ$).

В результате этих расчетов был установлен еще один интересный факт, существенный для однозначности выбора распределения $E_1(\xi)$. Выяснилось, что хорошее согласие рассчитанной и фактической зон вывала леса получается в тех случаях, когда на всем конечном «активном» участке траектории энерговыделение мало отличается от постоянного. Следовательно, в модельных расчетах на этом участке практически можно принимать $E_1 = E_{1_0} = \text{const}$.

Обратная задача обладает также известной некорректностью при определении энергетических характеристик модельного взрыва. Величины E_0 и E_1 меняются соответственно по кубической и квадратичной зависимости при изменении перепада давлений за отраженной ударной волной и постоянном расстоянии от данной точки на поверхности Земли до модельного заряда. Значит, эти величины будут сильно зависеть от принимаемого значения q_{\min} на границе, оконтуривающей область вываленного леса.

Первые решения авторов [18, 19] с расчетом вывала леса при Тунгусском взрыве были затем улучшены [10, 11]. Теперь в результате большой серии расчетов получено уточненное решение, в котором для основных определяющих параметров Тунгусского метеорита найдены следующие значения:

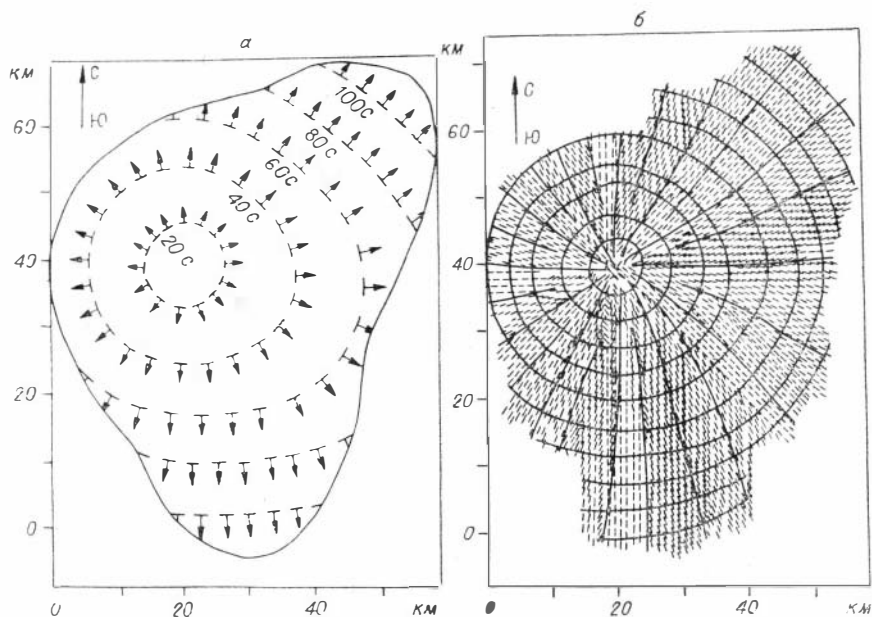


Рис. 1. Рассчитанная (а) и реальная (б) картины вывала леса в районе Тунгусского метеорита.

$H_0 = 6,5$ км; $\alpha = 40^\circ$; $E_0 = 6,5 \cdot 10^{22}$ эрг; $E_1 = 9,5 \times 10^{16}$ эрг/см. Активный участок траектории, на котором баллистическая волна производила разрушение леса, имеет протяженность около 20 км. Энерговыведение на этом участке почти втрое превышает энерговыведение при взрыве в конечной точке траектории.

Картина вывала леса для полученного решения представлена на рис. 1, а. Зона разрушений околонуна линия $q = q_{\min} = 0,008$ кг/см². Штриховые кривые изображают изохроны, т. е. линии прихода ударной волны на поверхность Земли в отмеченные моменты времени. Стрелками, нормальными к изохронам, указаны направления падения деревьев. На рис. 1, б приведена карта-схема вывала лесного массива [14]. Между рассчитанной и реальной картинами поваленного леса имеется достаточно хорошее соответствие в отношении как формы и размеров, так и внутренней структуры.

Для полученного решения на рис. 2 в зоне наземных разрушений построена система изолиний q , отвечающих одинаковой степени вывала. При воздушном взрыве всегда существует участок, где q достигает максимума, а вокруг эпицентра — область, где $q < q_{\min}$ и вывала деревьев не происходит. В рассматриваемом решении последняя область имеет диаметр

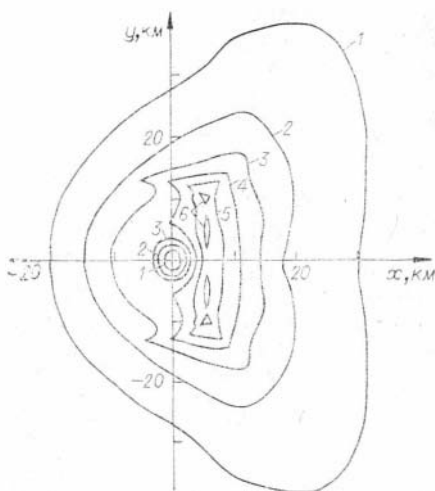


Рис. 2. Система изолиний динамического напора q в зоне наземных разрушений.

1 — 0,008; 2 — 0,016; 3 — 0,024; 4 — 0,032; 5 — 0,040; 6 — 0,048 кг/см².

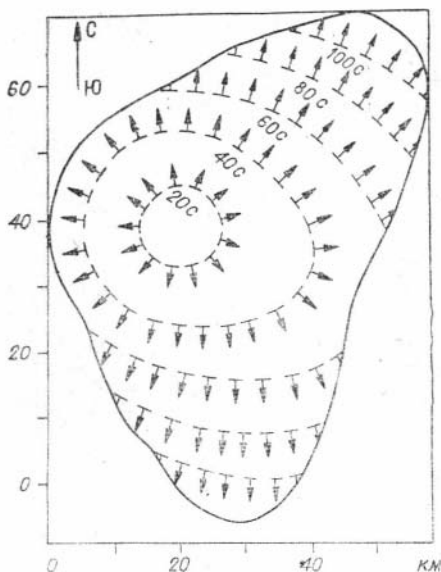


Рис. 3. Рассчитанная картина вывала леса при $\alpha = 30^\circ$.

около 3 км. Самое большое значение $q = 0,55$ кг/см² достигается в крыльях зоны разрушений, что находится в согласии с данными измерений на местности [13].

Отметим, что конкретный вид изолиний q существенно зависит от соотношения энергий. Если взрывная волна по своей энергии превосходит баллистическую волну (при этом крылья зоны разрушений имеют относительно малую площадь), то линия максимальных разрушений будет размещаться в передней части этой зоны. Случай с таким соотношением энергий (иным, чем у Тунгусского метеорита) рассмотрен в работе [11].

Величина угла наклона траектории $\alpha = 40^\circ$ в решении получилась довольно большой, но она не выходит из диапазона значений $\alpha = 28 \pm 12,5^\circ$, найденного по астрометрическим оценкам [4] на основании опроса очевидцев полета Тунгусского метеорита. Как указывалось выше, при решении обратной задачи величина α определяется достаточно жестко по внутренней структуре зоны наземных разрушений. Этот факт подтверждает рис. 3, где изображена картина вывала леса, рассчитанная для $\alpha = 30^\circ$. В этом случае поле направлений упавших деревьев и нормальное

к нему семейство изохрон (ставших более вытянутыми по сравнению со случаем $\alpha = 40^\circ$) заметно расходятся с фактическими данными (см. рис. 1, а). При еще меньших α эти расхождения значительно увеличиваются.

Обсудим теперь особенности расчета ударной волны в атмосфере с переменной плотностью. Как известно, точного численного решения этой задачи в случае, когда надо учитывать противодействие, пока не получено, и обычный подход предусматривает применение секторного приближения [5]. Нами использовалось эмпирическое модифицированное правило Сакса, которое как показано в [20] для опускающейся сферической ударной волны при различной неоднородности атмосферы дает по сравнению с квазиодномерным численным решением максимальное расхождение в 20% в основном для слабых волн. Следует подчеркнуть, что секторное приближение само вносит серьезные ошибки на поздней стадии. Поэтому здесь взрыв в неоднородной атмосфере необходимо рассчитывать более точно, учитывая как двумерность течения, так и действие силы тяжести. Такие расчеты для случая Тунгусского метеорита в настоящее время проводятся авторами.

Для расчета ударной волны на ее слабой стадии можно применять уточненную методику, в которой используются асимптотические решения, полученные рядом авторов (см., например, [15]) для распространения таких волн в неоднородной среде. На основе нелинейной акустики выводится выражение, дающее избыточное давление на ударном фронте в зависимости от расстояния и угловой координаты. Постоянные величины, входящие в это соотношение, находятся из условия сопряжения асимптотического решения с рассчитанным решением на предшествующей стадии. Расчеты сферической части ударной волны можно также осуществить с помощью другой методики [6], основанной на склейке асимптотических решений для сильной и слабой волн в неоднородной среде. Как показано в [5], для опускающейся волны эта методика обеспечивает хорошую точность, причем здесь линеаризованное решение на сильной стадии учитывает передачу энергии вверх из нижних более плотных слоев воздуха.

По первой из этих методик были проведены оценочные расчеты для Тунгусского взрыва при распространении ударной волны в изотермической атмосфере (что при небольшой высоте взрыва не столь существенно). Выяснилось, что в этом случае общая картина вывала леса при прежних значениях $\alpha = 40^\circ$ и $H_0 = 6,5$ км изменяется мало (в пределах погрешностей расчетного метода и замеров на местности). Однако, как и следовало ожидать, величина E_0 увеличивается примерно в 1,6 раза, а E_1 — в 1,5 раза, соответственно составляя 10^{23} и $1,4 \times 10^{17}$ эрг. Тогда суммарная энергия взрывной и баллистической волн, рассчитанная по разрушениям леса при Тунгус-

ском падении, будет примерно равняться 9,5 мвт. Эта величина хорошо согласуется с оценкой М. А. Садовского: по размерам разрушений, энергия Тунгусского взрыва около 10 мвт.

Приведенное значение суммарной энергии относится только к разрушению лесного массива и является лишь полной энергией, выделившейся при полете и взрыве Тунгусского метеорита. Часть энергии пошла на возмущение плотной атмосферы при полете космического тела. Как подтверждают проведенные траекторные расчеты, эта величина для тела очень большого размера может быть весьма значительной. Часть энергии взрыва была перенесена излучением, нагрев окружающий воздух. Во время взрыва имела место передача энергии из нижних слоев атмосферы в верхние, что в наших расчетах не учитывалось. Естественно, что все эти доли энергии не участвовали в вывале леса, но, конечно, влияли на воздушные волны, зарегистрированные барографами при полете и взрыве Тунгусского метеорита. Приближенные оценки показывают, что с учетом вышеупомянутых эффектов полная энергия, выделившаяся при полете и взрыве Тунгусского космического тела, может, грубо говоря, в 1,5—2 раза превышать суммарную энергию, вычисленную по вывалу леса.

Значения основных параметров Тунгусского явления, отвечающие полученному решению обратной задачи, нельзя рассматривать как окончательные, во-первых, из-за неполной надежности некоторых исходных экспериментальных данных и, во-вторых, из-за упрощающих допущений, введенных в модель и метод расчета. Например, уточнение фактической границы стоячего леса вблизи эпицентра может повлиять в первую очередь на величины H_0 и E_0 . Полученное решение, являясь достаточно обоснованным, служит хорошей опорной базой для возможных улучшений, которые, в частности, могут быть серьезными при переходе от секторного приближения к точным двумерным расчетам ударной волны в неоднородной атмосфере с учетом силы тяжести.

Используя модель с направленным неосесимметричным взрывом, можно в принципе получить теоретическую картину разрушений, в которой имеет место узкая полоса неповаленного леса, простирающаяся от головной части зоны вывала к эпицентру. Такая область, составляет лишь малую часть всей зоны разрушений, и поэтому не играет заметной роли.

Оценка параметров Тунгусского метеорита на основе взрывной модели проводилась в [1], где получены следующие значения параметров: $H_0 = 7,5$ км; $\alpha = 15^\circ$; $E_0 = 5,5 \cdot 10^{23}$ эрг; $E_1 = -1,9 \cdot 10^{18}$ эрг/см на последних 30 км траектории и $E_1 = 6 \cdot 10^{17}$ эрг/см на предыдущем участке. При сравнении работ [10, 11] и [1] надо иметь в виду, что приближенный метод учета неоднородности атмосферы в [1] дает практически те же результаты, что мо-

дифицированное правило Сакса, используемое в [10, 11]. Однако в отличие от [10, 11], где определено решение обратной задачи, хорошо соответствующее реальным форме и внутренней структуре зоны вывала леса, оценки [1] основываются на весьма грубых соображениях. В [1] рассматривается не совместное, а лишь независимое действие взрывной и баллистической волн, что, хорошо известно (см., например, [15]), недопустимо. Здесь не получено ни одной зоны вывала, внешняя граница которой была бы сколько-нибудь похожа на натурную «бабочку», а поле направлений упавших деревьев даже не определялось. Более того, при малых разрушающих значениях горизонтального скоростного напора (к тому же, в [1] эта величина вычислена неправильно) изодинамы в виде «бабочки», как указывают сами авторы [1], вообще не получаются. Чтобы изодинама прошла хотя бы через две характерные точки A и B на задней границе зоны вывала, авторы предлагают рассматривать скачкообразное увеличение энергии баллистической волны E_1 при приближении к A , что совершенно не улучшает дела, так как точки A и B лежат практически на одной прямой, перпендикулярной проекции траектории на Землю. Значения H_0 и α проведенными расчетами не обоснованы, а приняты фактически по показаниям очевидцев. Скорость и масса тела в конечной точке траектории оценены с грубой ошибкой — они вычислялись по энергии E_1 не в этой точке, а в точке A (расположенной от нее в 30 км), что дало неправильные величины скорости $v=26$ км/с и массы $m=1,5 \cdot 10^{11}$ г вместо $v=44$ км/с и $m=0,5 \cdot 10^{11}$ г. Нетрудно вычислить, что при значениях параметров [1] для Тунгусского метеорита суммарная энергия взрывной и баллистической волн, рассчитанная по вывалу леса, составляет около 150 мтг, а полная энергия, выделившаяся при полете и взрыве тела, может достигнуть 250 мтг. Значит, оценки энергии [1] во много раз превышают оценки как М. А. Садовского, так и И. П. Пасечника [12] и должны быть признаны неудовлетворительными.

Кратко остановимся на возможном влиянии стратосферного ветра. Теория распространения ударных волн в движущейся среде хорошо развита. Например в [7] дана процедура пересчета решения задачи о взрыве на случай поступательного потока, а в [21] подробно анализируется влияние ветра на слабые ударные волны при полете метеоритов. Однако в случае Тунгусского метеорита провести учет стратосферного ветра затруднительно из-за отсутствия достоверных сведений о нем. Вместе с тем очевидно, что роль стратосферного ветра не была серьезной из-за относительно малой высоты взрыва. Следует принимать во внимание, что на больших высотах, где скорость ветра велика, ударная волна, будучи весьма сильной, двигалась наиболее быстро. Как видно по рис. 1, б, время прихода ударной волны на Землю составляет от 10 с в

эпицентре до 120 с у краев крыльев «бабочки», и возможный из-за стратосферного ветра сдвиг рассчитанной картины наземных разрушений оценивается в этих местах от 100 до 1000 м.

Полет и взрыв Тунгусского метеорита сопровождался довольно сильным излучением. Можно надеяться, что примененное взрывное моделирование при условии сохранения характерных температур будет пригодным для описания эффектов выходящего излучения и проведения оценочных расчетов, результаты которых можно будет сопоставить с данными о лучистом ожоге в районе падения Тунгусского метеорита.

Источник излучения в этом случае имел форму, вытянутую вдоль траектории, что отвечает принятой взрывной модели. Как показали расчеты [9], на начальной стадии модельного взрыва зона максимальных температур располагается в промежуточной области между сферическим и цилиндрическим участками ударной волны. Взаимодействие излучения от этих участков приводит к тому, что на поверхности Земли световой импульс в направлении назад по траектории будет больше, чем вперед. Отсюда следует, что центр максимального ожога на Земле должен быть смещен относительно эпицентра взрыва в сторону, обратную направлению полета, и в ту же сторону должна быть вытянута вся область наземного ожога. Стратосферный ветер, довольно слабо влияя на положение эпицентра и совсем не влияя на положение центра ожога, мог внести лишь небольшое искажение в величину и направление этого смещения. Приведенные теоретические соображения, полученные в рамках взрывной модели, находятся в качественном соотношении с выводами [2, 3] на основании натуральных материалов по лучистому ожогу деревьев при Тунгусском взрыве.

Сделаем еще замечание о новой гипотезе, в которой Тунгусское явление рассматривается как «черная дыра» [17]. Она, даже если не касаться чисто физических аспектов, не в состоянии объяснить картину наземных разрушений, явно вызванных воздушным взрывом, и аномального свечения атмосферы. Против этой гипотезы говорит также отсутствие каких-либо данных о геофизических эффектах при выходе «черной дыры» из Земли, которые должны быть сравнимы с соответствующими эффектами при ее входе и не могли остаться незамеченными. В [17] также неправильно определено положение гипотетической точки выхода «черной дыры» из Земли (в Северной Атлантике). Для реальных траекторий с азимутами $275-295^\circ$ и углами наклона $20-45^\circ$ точка выхода будет располагаться в полосе приблизительно от линии Калининград — Мелитополь до линии Зеленый мыс — Гвинейский залив.

В заключение подчеркнем, что разработанное моделирование взрыва летящих метеоритов в атмосфере, основанное на расчете воздушных ударных волн, является вполне эффективным для расчета их энергетических и траекторных характеристик. Однако точное определение основных параметров метео-

рита требует более широкой и надежной исходной информации, зарегистрированной и измеренной при наблюдениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бронштэн В. А., Бояркин А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 47—63.
2. Васильев Н. В., Львов Ю. А. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита. — «Природа», 1974, № 3, с. 99—101.
3. Воробьев В. А., Ильин А. Г., Шкута Б. Л. Изучение термических поражений веток лиственниц, переживших Тунгусскую катастрофу. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, 1967.
4. Зоткин И. Т. Траектория и орбита Тунгусского метеорита. — «Метеоритика», 1966, вып. 27, с. 109—118.
5. Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М., «Наука», 1974, 256 с.
6. Коробейников В. П., Карликов В. П. Определение формы и параметров ударной волны при взрыве в неоднородной атмосфере. — «Докл. АН СССР», 1963, т. 148, № 6, с. 1271—1274.
7. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шароватова К. В. Газодинамические функции точечного взрыва. М., 1969, 48 с.
8. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере метеоритных тел. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 29—30.
9. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел. — «Метеоритика», 1973, вып. 32, с. 73—89.
10. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита. — «Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа», 1974, № 3, с. 94—100.
11. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Об ударных волнах при полете и взрыве метеоритов. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 20—46.
12. Пасечник И. П. Предварительная оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита 1908 г. по сейсмич. и барографич. данным. (В наст. сб.)
13. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Томск, 1967.
14. Фаст В. Г. Вывал леса, произведенный Тунгусским метеоритом. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 41—42.
15. Цикулин М. А. Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М., «Наука», 1969, 88 с.
16. Hunt J. N., Palmer R., Penney W. Atmospheric waves caused by large explosions. — «Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A», 1950, v. 252, № 1011.
17. Jackson A. A., Ryan M. P. Was the Tungus event due to a black hole? — «Nature», 1973, v. 245, № 5490, p. 88—89.
18. Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V. Gas dynamics of flight and explosion of meteorite bodies in the Earth's atmosphere. — In: Fluid Dynamics Transactions, v. 6, p. II. Warszawa, 1971.
19. Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V. Gas dynamics of the flight and explosion of meteorites. — «Astronautica Acta», 1972, v. 17, № 4/5, p. 339—348.
20. Lutzky M., Lehto D. L. Shock propagation in spherically symmetric exponential atmospheres. — «Physics of Fluids», 1968, v. 11, № 7.
21. ReVelle D. O. Acoustics of meteors — effects of the atmospheric temperature and wind structure on the sound produced by meteors. — Tech. Report Univ. of Michigan. USA, 1973, 432 p.
22. The effects of nuclear weapons. Washington, 1964, 730 p.

**ОЦЕНКА КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА
ОЖГОВЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ
ПОРАЖАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В РАЙОНЕ
ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА**

Ожоговые повреждения, обнаруженные в 1961 г. на ветвях лиственниц в районе падения Тунгусского метеорита, относятся к числу важнейших проявлений природы этого феномена. Предполагается, что тепловое воздействие на ветви есть результат выделившейся при взрыве лучистой энергии. Поэтому координаты источника ожога можно рассматривать как координаты центра взрыва. Согласно предварительной оценке Е. В. Маслова [4], высота взрыва заключена в пределах 6,5—11,5 км. По ожоговым повреждениям Г. М. Зенкин и А. Г. Ильин [2] вычислили координаты источника ожога (в км):

$$x = 38,60 \pm 0,30; y = 22,10 \pm 0,35; h = 4,80 \pm 0,55, \quad (1)$$

где x, y — координаты в системе, описанной в [7], а h — высота над поверхностью Земли.

Расчеты, сделанные автором в работах [5, 6] на основании большого фактического материала (168 веток вместо 19, использованных в [2]), не подтвердили координаты (1), заставив усомниться в правильности использованной модели ожога — локализованного в достаточно малой области пространства источника лучистой энергии, — так как полученная высота $h = 0,74$ км [5, 6] не соответствует реальной картине разрушений в районе падения метеорита. Применяемый в указанных работах метод расчета основан на засечке некоторой точки в пространстве плоскостями, которые в идеальном случае (при отсутствии случайного разброса) проходили бы через эту точку. Основным параметром, влияющим на точность такой засечки, является угол φ наклона плоскости от вертикали. Дополнительный анализ показал, что применяемый метод при большом разбросе угла φ дает существенное занижение вычисляемой высоты источника [6]. Здесь же произведена оценка дисперсии σ угла φ , которая оказалась достаточно большой по величине ($\sigma > 40^\circ$). На основании этого сделан вывод, что используемая для вычисления координат совокупность плоскостей не содержит практически никакой информации о положении источника ожога в пространстве. Поэтому для определения его координат следует привлекать другие методы. В данной статье вычисляются координаты точечного источника лучистой энер-

гии, создающего на поверхности Земли распределение освещенности, наиболее точно соответствующее распределению интенсивности поражений ветвей.

Применяемая для расчетов модель строится в предположении, что уровень минимальной энергии q , необходимой для поражения участка коры ветки, пропорционален толщине коры δ на этом участке:

$$q = k\delta. \quad (2)$$

Согласно [3], связь толщины коры с диаметром d ветки может быть описана линейной зависимостью

$$\delta = ad + \delta_0. \quad (3)$$

Пусть в некоторой точке пространства (x_0, y_0, h_0) выделилась лучистая энергия W . Рассмотрим участок ветки, положение в пространстве которого определяется координатами (x, y) дерева, азимутом α и углом наклона β оси этого участка к поверхности Земли. При изучении ожоговых повреждений ветви распиливались поперек на небольшие цилиндрические части, называемые спилами. Через ось спила и точку (x_0, y_0, h_0) проведем плоскость P . Обозначим через ν угол, под которым лучи источника, лежащие в P , падают на спил. Из геометрических соображений следует, что $\sin \nu$ выражается через координаты спила следующим образом:

$$\sin \nu = \frac{(x_0 - x) \cos \beta \cos \alpha + (y_0 - y) \cos \beta \sin \alpha + h_0 \sin \beta}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + h_0^2}}.$$

Плотность падающей энергии Q постоянна на образующих спила. Распределение энергии по его поверхности описывается формулой

$$Q(\Psi) = Wf(r) \cos \nu \cos \Psi, \quad (4)$$

где $r = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + h_0^2}$, $f(r)$ — функция ослабления, а Ψ — величина двугранного угла между плоскостью P и плоскостью, проходящей через ось и образующую спила.

На границе области поражения интенсивность излучения достигает того минимального уровня q_0 , при котором происходит поражение наиболее тонких участков коры. В соответствии с (2) и (3), $q_0 = k\delta_0$. С другой стороны, $q_0 = Wf(R_0)$, где R_0 — расстояние от точки (x_0, y_0, h_0) до границы области поражения. Из последних двух формул получим

$$K = \frac{Wf(R_0)}{\delta_0},$$

Подставляя найденное значение k в (2), имеем

$$q = \frac{\delta}{\delta_0} f(R_0) W.$$

Для того чтобы произошло поражение коры участка ветки, соответствующего данному спилу, необходимо выполнение неравенства $Q_{\max} = Q(0) \geq q$. Используя (4) и (5), это неравенство преобразуем к виду

$$\cos v \geq \frac{\delta}{\delta_0} \cdot \frac{f(R_0)}{f(r)}. \quad (6)$$

При выполнении этого неравенства происходит повреждение коры ветки, и сектор повреждения ε определяется условием

$Q\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) = q$. Отсюда, используя (3—5), получим окончательно

$$\cos \frac{\varepsilon}{2} = \frac{ad + \delta_0}{\delta_0} \cdot \frac{f(R_0)}{f(r)} \text{ при } \cos v \geq \frac{ad + \delta_0}{\delta_0} \cdot \frac{f(R_0)}{f(r)}, \quad (7)$$

Если неравенство (6) не выполняется, то $\varepsilon = 0$ и $\cos \frac{\varepsilon}{2} = 1$.

Формула (7) позволяет вычислять теоретические значения секторов повреждения и сравнивать их с имеющимися на спилах в действительности. При выводе этой формулы удалось исключить неизвестную энергию W и трудно определяемый коэффициент k . Определению подлежат коэффициенты a и δ_0 зависимости (3), а также радиус зоны поражения R , необходимый для вычисления величины $R_0 = \sqrt{R^2 + h_0^2}$.

Значения $a = 0,1$ и $\delta_0 = 0,4$ были получены путем линейной регрессии по материалам, взятым из работы [3]. С определением R дело обстоит несколько сложнее. Зона ожоговых поражений в районе Тунгусской катастрофы имеет радиус около 10 км. На границе этой зоны пораженные ветви еще имеют диаметр $d \approx \approx 2$ мм. В рассматриваемой модели на границе поражения значение d должно стремиться к нулю, т. е. R должен быть больше радиуса наблюдаемой зоны поражения. В данной статье величина R определяется путем линейной экстраполяции зависимости величины максимального диаметра поражен-

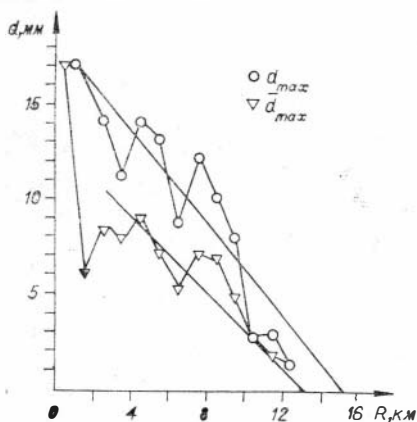


Рис. 1. Определение радиуса зоны ожоговых повреждений.

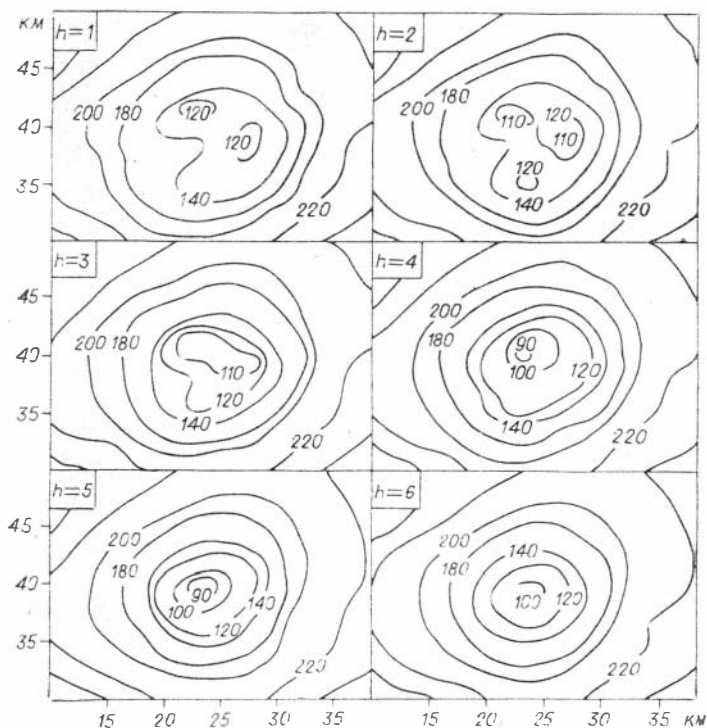


Рис. 2. Изолинии функции $S(x_0, y_0, h_0)$ в горизонтальных плоскостях на различных высотах (h , км) для $R=13$ км.

ных ветвей от расстояния до центра зоны поражений. Для этого вся зона поражения была покрыта системой концентрических колец с центром в точке $x = 22$ км, $y = 39$ км и шагом по радиусу 1 км. Для каждого кольца было вычислено среднее \bar{d}_{\max} от максимальных диаметров пораженных веток различных лиственниц, попавших в кольцо, и выписан наибольший d_{\max} . Полученные две зависимости приведены на рис. 1. Там же построены две прямые, полученные методом наименьших квадратов по данным зависимостям. Точки пересечения этих прямых с осью OR дают два значения R : 13 и 15 км. Так как трудно отдать предпочтение одному из них, было сделано два расчета.

В качестве меры адекватности построенной модели с действительностью бралась сумма

$$S(x_0, y_0, h_0) = \sum_{i=1}^N p \left(\cos \frac{\varepsilon_i}{2} - \cos \frac{\hat{\varepsilon}_i}{2} \right)^2,$$

где $\hat{\varepsilon}_i$ — сектор, имеющийся на спиле, ε_i — соответствующее

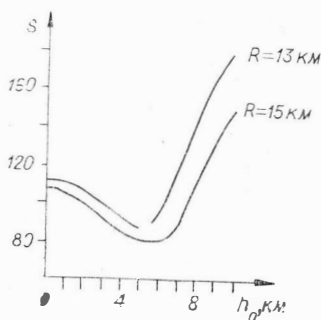


Рис. 3. Зависимость минимума функции $S(x_0, y_0, h_0)$ от h_0 .

ему теоретическое значение, p_i — весовой коэффициент, равный длине образующей спирали. За оценку координат источника излучения принималась точка (x_c, y_c, h_c) , в которой сумма $S(x_0, y_0, h_0)$ достигает минимума. В качестве функции ослабления использовалась функция

$$f(r) = \frac{1}{4\pi r^2}$$

(ослаблением, связанным с рассеянием излучения в атмосфере, пренебрегалось).

Расчеты велись на основании данных более чем полутора тысяч спилов. Источник излучения помещался последовательно в

узлы трехмерной регулярной решетки и для каждого узла вычислялась S .

На рис. 2 изображены горизонтальные слои решетки для $R = 13$ км и для различных h_0 . Структура изолиний, довольно хаотическая для слоев малых h_0 , с ростом h_0 преобразуется в систему замкнутых вложенных друг в друга линий. На рис. 3 приведена зависимость минимума S от h_0 для $R = 13$ км и $R = 15$ км. В первом случае минимум достигается на высоте $h_c = 5$ км, во втором — при $h_c = 6$ км. С увеличением высоты в интервале 6—10 км S резко возрастает; тем самым сделанные расчеты отвергают высоты взрыва больше 6 км. Проекция найденных точек на поверхность Земли имеет координаты $x_c = 39,8$ км, $y_c = 23,5$ км. Таким образом, по распределению интенсивности поражающего воздействия на ветви лиственниц получена $h_c = 5 \div 6$ км.

В заключение отметим работу [1], в которой для оценки координат источника ожога также используется распределение интенсивности поражения, только характеристикой интенсивности является максимальный диаметр пораженных ветвей. В этой работе $h = 7$ км. Недостатком используемой в [1] методики является привлечение к расчетам небольшой части имеющегося материала. Характеристика интенсивности, основанная в настоящей статье на диаметре ветвей и секторе поражения, позволила использовать в расчетах в полном объеме весь имеющийся в настоящее время фактический материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В. А., Демин Д. В. Новые результаты исследования термических поражений лиственниц в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 13—15.
2. Зенкин Г. М., Ильин А. Г. О лучевом ожоге деревьев в районе взрыва Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1964, вып. 24, с. 129—140.

3. Ильин А. Г., Воробьев В. А., Байер В. В. Связь параметров пораженных веток лиственниц со световой энергией.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 105—109.
4. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 103—112.
5. Разин С. А. К анализу направленности ожоговых плоскостей веток в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 37—38.
6. Разин С. А., Фаст В. Г. К вопросу о пространственной локализации источника ожоговых повреждений в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, «Наука», 1975, с. 64—68.
7. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 62—104.

**Н. В. ВАСИЛЬЕВ, В. К. ЖУРАВЛЕВ, Д. В. ДЕМИН,
А. Д. АММОСОВ, А. И. БАТИЩЕВА**

О НЕКОТОРЫХ АНОМАЛЬНЫХ ЭФФЕКТАХ СВЯЗАННЫХ С ПАДЕНИЕМ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Падение крупных метеоритов типа Тунгусского и Сихотэ-Алиньского сопровождается взрывными явлениями, приводящими к локальным нарушениям биосферы. При этом организмы, населяющие район падения, подвергаются комплексному воздействию механических (ударная волна), радиационных (видимое и ультрафиолетовое излучения), тепловых (лесные пожары) факторов и электромагнитных возмущений. Кроме того, лесные пожары, в свою очередь, усиливают химический мутагенез за счет повышения концентрации продуктов сухой возгонки древесны в почве. Взрывы крупных метеоритов в принципе могут генерировать рентгеновское излучение.

К сожалению, до последнего времени вопрос относительно мутационных последствий крупных метеоритных падений остается слабо изученным. Ниже делается попытка рассмотреть на примере Тунгусского метеорита некоторые аспекты этого вопроса, хотя следует иметь в виду специфические особенности, выделяющие его среди других крупных метеоритов. Истории метеоритики неизвестны аналоги Тунгусского взрыва, что оправдывает попытки найти объяснение этому явлению, в том числе биологических его аспектов, с нетрадиционных позиций.

Если допустить, что Тунгусский взрыв произошел не в результате преобразования кинетической энергии тела, а за счет

выделения внутренней энергии, то наиболее близким аналогом из известных нам физических явлений может служить высотный взрыв. Разумеется, эта аналогия, основанная на сравнении масштабов и структуры разрушений, может быть чисто внешней. Однако ряд данных, полученных за последние годы, дает некоторые основания для предположения, что она является более глубокой.

Если ядерная реакция и имела место, то нет никаких априорных данных о ее типе. Следовательно, неизвестен состав и спектры излучения возникших изотопов. После взрыва прошло более полувека, причем в течение последних 20 лет происходило глобальное выпадение радиоактивных осадков. Поэтому надежный ответ может быть получен только при комплексном подходе, включающем различные специальные методы, дающие косвенную информацию. Выводы, полученные на основании применения отдельных частных методик, не всегда могут быть истолкованы однозначно. Лишь согласованные данные независимых направлений исследования могут рассматриваться как решающее доказательство той или иной точки зрения.

Характер разрушений, вызванных ударной волной взрыва любой природы, практически одинаков и не может служить указателем на источник взрыва. Иначе обстоит дело с излучением взрыва в видимой и инфракрасной областях, которое мы для краткости будем называть световым излучением. Высокий выход световой энергии — характерная особенность ядерного взрыва в тропосфере (30—40% от полной энергии ядерной реакции [5]). Термодинамические оценки энергии светового излучения химического взрыва, основанные на экспериментальных значениях теплоты превращения и температуры наиболее мощных химических взрывчатых веществ, дают долю светового излучения порядка 10^{-6} — 10^{-8} % [1].

Значительно больше излучается света при торможении метеоритов в атмосфере, однако и в этом случае выход световой энергии ниже, чем в случае ядерного взрыва. Эксперименты по моделированию метеоров, проведенные с железными частицами микронных размеров, показали, что суммарная лучистая энергия в спектральном диапазоне 340—630 нм почти не зависит от скорости метеорита в интервале 20—40 км/с и составляет 0,5% от кинетической энергии частицы [19]. Эти эксперименты не подтверждают вывода теории К. П. Станюковича и В. П. Шалимова [17] о резком возрастании светового излучения при торможении тел со скоростями более 30 км/с, выдвинутое для объяснения высокой доли светового излучения Тунгусского метеорита.

Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение взрыва в тропосфере поглощается воздухом на расстоянии менее 1 м и практически не оказывает прямого действия.

Решающими доказательствами ядерной природы взрыва явились бы следы действия радиоактивных излучений, а именно радиоактивные и необычные стабильные изотопы, возникающие под действием нейтронов или γ -квантов высокой энергии, наведение электронных и ионных дефектов кристаллической решетки горных пород, радиационные повреждения полимерных структур древесной растительности и т. д. Надежную информацию о присутствии ионизирующих излучений можно получить из анализа записей эффектов в ионосфере и магнитном поле Земли, порожденных инжекцией частиц и квантов высокой энергии. Обнаружение продуктов взрыва, выпавших в виде осадков из атмосферы, также может дать материал для идентификации взрыва.

Остатки непрореагировавшего вещества взорвавшегося тела могут дать информацию не только о его составе, но и о механизме взрыва. Например, обнаружение необычных изотопных соотношений элементов могло служить доказательством ядерной реакции. Во всех случаях локализация следов относительно траектории и зоны разрушений является важнейшим критерием связи того или иного эффекта со взрывом.

Лучистые поражения деревьев. Оценка энергии вызвавшего эти поражения светового излучения, сделанная в [7, 10], дала величины того же порядка, что и при ядерном взрыве сопоставимой мощности. Оценка по границе термических поражений деревьев получает независимое подтверждение в результате анализа сообщений очевидцев, испытавших действие взрыва или наблюдавших его с расстояний порядка 200 км.

Следует, однако, отметить, что оценка доли световой энергии, опирающаяся на объективный материал — поражение веток — сделана пока очень грубо, и ее точность не выше точности определения по показаниям очевидцев. Поэтому для того, чтобы вопрос о величине световой энергии взрыва Тунгусского метеорита мог считаться окончательно решенным, требуется проведение работы по энергетической калибровке поражения «записанных» деревьями. Сам же факт наличия лучевого поражения веток лиственниц из высоко расположенного источника, по нашему мнению, может считаться надежно установленным. Доказательством служит сама возможность восстановления положения в пространстве этого источника по измеренным параметрам поражений несколькими независимыми способами, дающими удовлетворительно сходящиеся результаты (см. [8] и статью С. Д. Разина в настоящем сборнике).

Анализ на ЭЦВМ каталога поражений, составленного по результатам экспедиций 1960—1969 гг., позволил сделать вывод о наличии некоторых общих черт в структуре полей вывала и ожога. Это прежде всего наличие «выступов» поля ожога в восточной части пораженной территории [4]. «Лепестки» поля ожога естественно сопоставить с «крыльями» поля вывала,

хотя полного сходства не наблюдается. Несомненно, что указанная не тривиальная особенность поля лучевого поражения заключает в себе отражение существенных черт явления.

Радиоактивность почв и растений. Прежде чем решать задачу поиска прямых или косвенных следов наведенной и остаточной радиоактивности 1908 г. в районе Тунгусской катастрофы, необходимо иметь представление об общем характере фона в данном районе. При этом в первую очередь представляют интерес любые отклонения и особенности, совпадающие с особыми местами поля действия взрыва (эпицентр, проекция траектории, направление максимального аэродинамического напора и т. д.), либо обнаруживающие по отношению к ним симметрию.

В 1959 г. была проведена полевая съемка по тропе Кулика и в районе Большой Котловины в радиусе 4 км. Хотя полученные цифры и не выходили за пределы естественных колебаний фона в непосредственной близости от эпицентра, они оказались в 1,5—2 раза выше, чем на периферии [15]. Если выделить на карте, приведенной в [11], периферическую и центральную зоны радиусом 3 км с центром в точке, расположенной в 2 км на ЮЗ от горы Фаррингтон, и усреднить данные каждой зоны отдельно, обнаружится существенное, статистически значимое увеличение ($P \leq 0,001$) цифр в центральной зоне сравнительно с периферической (рис. 1, а). Этот эффект не вызван особенностями рельефа местности, так как сопоставление данных, полученных на вершинах возвышенностей, обнаруживает еще большее различие для центральной и периферической зон (см. рис. 1, б). Обработка этих материалов, проведенная одним из авторов настоящей статьи на ЭЦВМ по программе, описанной в [6], подтвердила существование зоны с повышенным уровнем активности (в пределах колебаний земного фона) с радиусом около 3 км. Контрольные замеры 1969 г. по проекции траекто-

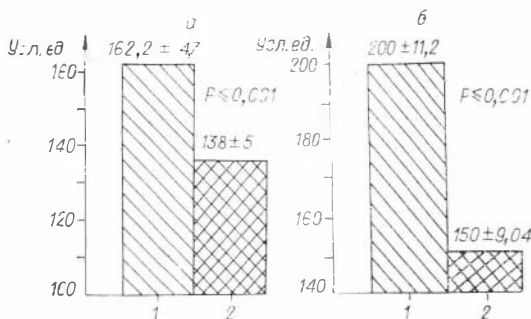


Рис. 1. Радиоактивность почв в центре (1) и на периферии (2).

а — активность поверхностного слоя выражена в 0,01 калиевых единиц [12]; б — то же, для проб, взятых на вершинах возвышенностей.

рии на расстоянии 10 км от эпицентра показали статистически значимое превышение уровня активности для участков, удаленных от эпицентра до 6,5 км. В 2 км на ЮЗ от горы Фаррингтон было обнаружено повышение фона на 50—75% по отношению к периферии.

В 1969 г. были отобраны пробы почв в радиусе до 30 км вокруг эпицентра. В лаборатории Института катализа СО АН СССР была исследована их суммарная β -активность. Был подтвержден полученный ранее результат: колебания радиоактивности почв не выходят за пределы естественного фона, и лишь вблизи эпицентра взрыва имеет место повышение цифр по сравнению с периферией (в 1,5—2 раза). Иными словами, за 10 лет соотношение активности в эпицентре и на периферии почти не изменилось. Статистическая обработка результатов на ЭЦВМ выявила конфигурацию этой слабой аномалии: налицо определенное сходство некоторых ее геометрических особенностей с полем, полученным в результате аналогичной обработки данных ожоговых повреждений деревьев.

В 1960 г. были получены материалы, характеризующие радиоактивность золы голубики, багульника, хвои лиственницы, мхов и т. д. [11]. Результаты замеров для голубики представлены на рис. 2. Отчетливо видно, что сравнительно высокие показания локализуются в области гор Стойкович и Фаррингтон, т. е. неподалеку от эпицентра взрыва. Статистическая обработка подтвердила наличие локального центра радиоактивности золы некоторых видов растений вблизи эпицентра. Съемка спектров золы голубики, выполненная в ИГГ СО АН СССР, дает основание полагать, что основной вклад в радиоактивность в данном случае дает Cs^{137} .

Глобальные осадки после ядерных испытаний сильно осложняют вопрос о поисках следов радиоактивности 1908 г. Поэтому более перспективны поиски определенных изотопов с применением обогащения проб из стратифицируемых природных объектов. А. В. Золотов [9] обнаружил в золе годичных слоев древесины, включающих кольцо 1908 г., небольшое повышение β -активности, связанное, по-видимому, с Cs^{137} . Повышение радиоактивности в слое, включающем торф 1908 г., было под-

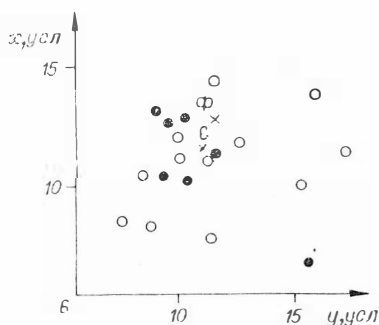


Рис. 2. Территориальное распределение проб золы голубики с относительно высокой и относительно низкой радиоактивностью; район эпицентра Тунгусского взрыва. Точки отбора проб заданы в системе координат, в которой координаты горы Стойкович: $x=12,6$, $y=11,7$. \circ — пробы, дающие менее 2000, \bullet — более 2000 рас./мин. г; Φ — гора Фаррингтон; \times — гора Стойкович. По данным Л. В. Кириченко [11].

тверждено В. Н. Мехедовым [14], однако ее источником является изотоп, испускающий мягкое излучение, возможно, C^{36} . Поиски изотопа Ar^{39} в минеральной компоненте почвы вблизи эпицентра дали отрицательные результаты [12]. В деревьях из Калифорнии и района пос. Ванавара [3, 20] в годичном слое 1909 г. обнаружено небольшое превышение среднего уровня излучения C^{14} .

Попытка обнаружить след радиоактивных выпадений из облака взрыва, предпринятая Л. В. Кириченко, дала отрицательный результат (пробы отбирались до расстояния 200 км от эпицентра). Как вблизи, так и на больших удалениях от него, в зоне прогнозируемых выпадений содержание естественных радиоизотопов в почвах не имеет каких-либо особенностей [11].

Изложенный материал показывает, что решение этого вопроса требует дальнейших исследований, однако создается впечатление о наличии в районе эпицентра взрыва небольшого участка с более высокими показателями радиоактивности почв.

Термолюминесценция траппов. Усиление термолюминесценции горных пород в результате облучения жесткой радиацией дало основание для постановки соответствующих работ в районе Тунгусской катастрофы. Отбор проб проводился нами летом 1966 г. на площади 15×40 км на междуречье Хушмо и Кимчу. На востоке площадь имеет границу, проходящую по долине р. Угакит, на западе — вдоль истоков р. Хушмо. Всего было взято и исследовано 185 проб. Методика камеральной обработки проб и автоматической записи термолюминесцентного свечения траппов описана в статье [2]. Там же изложены результаты предварительного изучения термолюминесценции траппов этого района, проведенного в 1965 г. Обработка проб и замеры термолюминесценции плагиоклазов, отсепарированных из траппов, проведены в ИГГ СО АН СССР под руководством В. Б. Василенко.

В результате анализа кривых высвечивания были определены светосумма максимумов термолюминесценции, интенсивность в каждом из максимумов свечения, температуры максимумов.

На рис. 3 представлено территориальное распределение интенсивности термолюминесценции во втором максимуме. Размещение проб с повышенными значениями интенсивности термолюминесценции в целом имеет статистический характер: рядом с пробами, имеющими высокие значения, могут находиться почти нулевые пробы. Однако в правой части рисунка можно довольно четко разграничить точки с сильным и слабым свечением, причем граница обрисовывает два выступа — на СВ и ЮВ. Ее очертания очень напоминают «двухлепестковую» структуру ожога, однако граница находится всего в 4—7 км от эпицентра (для ожога — 9—14 км). Очень похожая схема

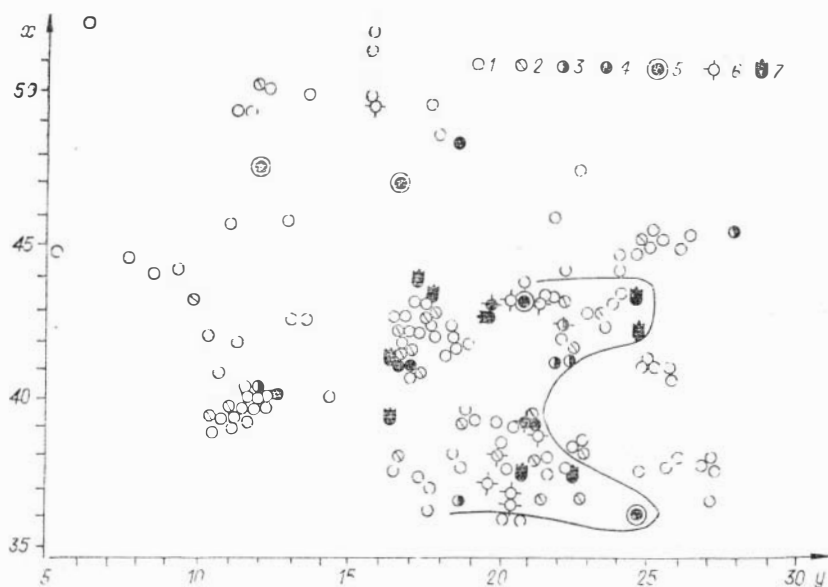


Рис. 3. Территориальное распределение проб трапхов с различной интенсивностью второго температурного максимума термолюминесценции в районе Тунгусской катастрофы.

1 — максимума нет; 2 — величина максимума менее 5 усл. ед.; 3 — 5 + 10; 4 — 10 + 20; 5 — Ш 20; 6 — содержание U в образце $3 \cdot 10^{-4}\%$; 7 — наличие в пробе только второго максимума термолюминесценции. Система координат по В. Г. Фасту [19].

получается также для территориального распределения общей светосуммы термолюминесценции. Территориальное распределение интенсивности в первом температурном максимуме вообще не обнаруживает никакого сходства с двухлепестковой формой.

Разумеется, можно допустить, что дугообразная форма восточной границы больших светосумм получилась случайно, а высокие значения интенсивностей и светосуммы термолюминесценции являются результатом случайных колебаний естественного радиоактивного фона, из которого основной вклад в термолюминесценцию дает α -излучение U. Для проверки последнего предположения в образцах, исследованных на термолюминесценцию, было определено также содержание U. Анализы проведены люминесцентно-перловым методом. Их результаты приведены в таблице и на рис. 3.

Оказалось, что в трапхах обследованного района содержание U не выходит за пределы фоновых. Тем не менее в трапхах, отобранных в окрестности эпицентра (в круге с радиусом около 3 км), содержание статистически достоверно выше (см. таблицу), чем в образцах, отобранных на периферии. На первый взгляд может показаться, что усиление термолюминесценции в центре

Результаты исследования термолюминесценции плагиноклазов из районов
Тунгусского падения

x	y	t_1	I_1	t_2	I_2	t_3	I_3	S	$U \cdot 10^{-4}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
48,4	18,7	250	12	320	11			92	1,1
48,8	18,0					346	4	18	2,7
49,6	17,7					330	7	40	1,6
50,3	17,2					346	4	15	2,8
62,3	16,2					370	20	10,5	1,4
52,1	15,9					360	12	45	1,4
51,3	15,6					350	5	32	1,3
49,8	15,7					330	7	30	2,3
37,4	19,8					350	5	24	7,6
36,7	20,6	267	66			330	52	550	13,0
36,1	20,9					355	9	37	
36,8	21,0					330	10	57	1,5
36,9	21,6			320	5	360	4	25	1,4
37,0	22,8			300	4,75			21,5	1,3
36,2	20,3					355	8	4,1	1,2
36,6	17,8					330	9	37	1,3
36,8	18,7			275	8	330	7	64	1,4
37,1	17,9					370	30	12	1,6
37,5	17,4					360	10	55	5,8
37,9	16,5					365	8	41	1,8
38,2	16,6			290	3			6	1,5
39,5	16,4			300	11			64	1,1
44,0	17,2			280	5			20	2,3
46,0	22,0					330	4,5	20	2,3
41,0	22,6					370	6	21	1,0
41,5	22,5	235	6	315	10			78	1,1
43,0	23,6			290	5			14	1,2
43,0	23,6	270	16			370	50	275	1,2
36,4	24,7	240	64	295	120			860	1,5
37,8	24,8					330	8	43	1,3
37,8	25,4					330	6	38	1,8
37,8	27,3					350	7	36	1,0
37,8	27,0					340	6,5	32	1,0
38,1	27,1					340	6	35	0,8
36,8	27,1			320	4,5			33	1,2
36,9	27,6					360	15	98	
38,1	28,5	250	100			350	83	890	42,5
40,9	25,9					350	7	30	1,6
41,1	25,6					350	8	50	1,2
43,4	9,8			280	3			5	1,7
39,3	19,3					350	6	25	1,5
39,1	18,9			280	3			6	1,6
38,4	18,6					360	10	56	1,5
38	18,9					360	12	72	2,4
41,4	22,1			300	9	360	10	74	2,0
41,8	22,7			290	4	370	10	48	1,6
42,2	22,2					360	72	560	1,7
42,2	22,2			285	7	360	12	76	3,0
43,2	22,3			280	5	350	7	41	1,4
43,5	22,0					360	7	23	1,9
43,6	21,8					330	7	41	2,7

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
43,2	21,5	250	13,5			335	6	96	3,1
43,3	21,0			290		350	15	176	3,2
43,4	20,6					350	6	26	3,1
39,8	11,5	270	11			340	26	197	1,5
39,8	11,5	260	11,5			330	8,5	93	1,6
40,0	11,5					360	120	920	1,0
40,0	11,5	270	9			370	15	100	1,6
40,1	11,5			280	6	335	5,5	42	1,4
40,1	11,5			290	19	340	23	170	1,3
40,1	11,9					340	6,5	33	1,4
40,2	12,1					360	184	1360	1,7
40,2	12,1			305	10,5	340	13	78	1,5
39,2	10,5	250	37			340	62	665	1,5
39,2	10,5			320	5			25	1,5
39,3	10,8	260	23			330	28	212	1,6
39,3	10,8					350	41	270	
39,4	11,1					340	30	192	1,4
39,5	11,3	270	58,5			360	41	400	1,5
39,5	11,3			315	2,8			18	1,6
40,2	14,4					340	4,5	27	2,0
42,9	17,7			325	4,5			20	3,4
42,9	17,7					335	3	42	2,3
42,9	17,7			320	4			17	2,4
42,9	17,7			325	10			65	2,5
43,4	17,7			280	28	330	23	261	1,9
42,9	17,7			320	5			33	1,6
42,9	17,7			280	13	330	13	106	1,6
42,9	17,7					350	5	15	
42,0	17,7	260	4	325	8			48	1,5
40,9	17,5			280	5			17	1,4
40,9	17,5					350	11	65	1,5
41,7	16,9			320	5			41	1,8
41,7	16,9			290	12	330	9	94	2,3
41,7	16,9					350	5	22	2,2
41,7	16,9	270	40			335	34	308	2,2
41,7	16,9			315	12,5			82	2,4
41,7	16,9			300	2,5	360	5	20	1,8
41,7	16,9	265	3	320	3,8			19	2,2
41,7	16,9	195	12,5	285	41	350	27	316	2,2
42,3	16,8			310	4,2			24	2,2
45,8	11,0					370	136	780	1,5
42,7	13,0					340	7	35	1,3
42,7	13,0			310	5			21	1,3
42,4	12,8			290	30	355	19,5	242	3,2
41,6	18,4					350	3	15	1,7
41,6	18,4					350	3	15	2,8
41,9	19,0			315	14	345	18	100	2,7
42,2	18,6					360	15	70	
42,2	18,6			280	8	350	8	71	
42,2	18,8			280	3	360	6	32	
42,2	18,8					330	3	8	1,5
41,9	19,0					355	5	15	2,7
37,8	20,4					340	6	32	1,8
38,4	26,0					370	15	62	1,3
38,2	20,1			310	5	350	5	24	3,0

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
38,2	20,1					340	43	315	1,7
44,0	21,0					312,5	138	850	4,2
39,2	20,7					332	10,5	56	3,6
39,2	20,9			275	14,2	352	20,5	186	3,4
39,3	21,4	260	24			330	23	230	3,7
39,3	21,4	250	23	310	32			300	3,7
39,4	21,2			280	4			8	2,2
38,1	21,7					340	3	17	2,5
38,1	21,7			320	5			23	2,5
37,7	21,9					340	7	35	2,3
37,7	21,9			325	6			38	2,3
37,7	22,4			320	6			33	1,9
37,7	22,4					350	8	70	1,8
33,5	22,9			290	4			13	2,0
38,5	22,9					330	5	25	1,9
38,5	22,9	270	4			330	5	27	1,7
42,3	17,1					330	7	41	1,8
42,3	17,1					330	4	23	2,0
42,3	17,1					345	6	35	1,9
42,3	17,1					355	5,1	20	1,8
39,9	19,0					330	14,5	103	1,5
44,4	9,3					370	57	227	1,3
44,3	8,5					370	18	140	1,4
42,2	10,3					380	13	77	1,5
42,0	11,3	250	9,5			370	52	312	1,5
41,0	10,6	270	60			360	57	605	1,9
46,0	2,7	260	26			345	14	184	1,8
45,8	3,1					340	6	25	1,7
46,8	0,7					340	13	86	1,6
45,7	3,7			290	9	360	10	86	
45,0	5,3					330	11	70	1,3
44,8	7,7					350	6	25	1,6
42,6	23,7					350	16	95	1,4
42,6	24,1					350	5	20	4,3
42,5	24,9			300	4			61	3,0
41,7	25,4			315	10				7,8
41,7	25,4					350	9	66	2,4
41,4	25,8					350	7	38	
43,2	24,0					340	4	11	
43,6	24,6					360	9	55	2,0
43,7	24,3			320	6			35	1,8
44,4	24,1					345	11	75	1,9
44,8	24,1					350	8	46	1,8
45,4	24,9					370	36	158	2,0
45,4	24,9			300	5	340	9	39	2,9
45,4	25,2	270	21			350	32	280	4,1
47,6	22,7					350	15	80	
44,3	22,4					355	7	50	1,8
45,4	24,9					339	6	40	1,9
45,2	24,6					370	22	115	1,6
45,4	25,2					340	3,5	15	1,7
45,4	25,6					330	7	35	1,5
45,5	26,5	250	3			360	6	36	1,7
45,7	27,9			325	6			35	1,9
46,0	32,0	260	360			330	300	3600	3,1
44,3	36,7	253	580			330	300	5000	4,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
43,8	36,6	270	480			350	200	4000	3,7
43,4	36,6	240	360			330	180	3000	6,6
42,9	19,8			320	9			65	4,2
43,2	19,8			235	14,5	340	14	124	3,6
47,2	16,1			280	30	370	44	300	1,3
49,8	15,7					340	11	34	3,0
50,6	13,6					330	5	23	2,7
49,1	11,7					335	9	35	2,0
49,5	11,4					358	26	221	1,5
47,8	12,0			275	24	365	51	325	1,3
46,0	13,0					340	9,5	60	2,0
45,7	-0,8					340	19	155	1,9
45,9	-1,4	240	2,5	310	9,5			83	2,2
51,2	1,6					340	15,5	120	1,7
52,4	6,2					330	11	89	2,2
50,1	12,3			320	3			9	16,0
50,2	12,0			290	5			18	1,8
45,2	26,0					340	8	47	1,5

Примечание. t_1, t_2, t_3 — температура первого, второго и третьего максимумов термоллюминесценции, °С; I_1, I_2, I_3 — интенсивности максимумов, усл. ед.; S — светосумма термоллюминесценции, усл. ед.; U — концентрация урана, вес. %; x — координата направления Ю—С; y — то же, z — z (система координат по В. Г. Фасту и др. [18])

района может быть объяснено обнаруженным повышением содержания U . Однако более внимательный анализ показывает, что это не так. В самом деле, из 47 проб, характеризующихся относительно высоким (100 усл. ед.) значением светосуммы, содержание U оказывается относительно высоким только в 12 пробах. И, наоборот, относительно высокому содержанию U (21 случай) повышенная светосумма соответствует далеко не всегда (12 совпадений).

Статистическая обработка данных по светосумме термоллюминесценции для проб в ближней зоне подтверждает наличие достоверного повышения термоллюминесценции с центром вблизи вывала. Обработка всего поля приводит к заключению, что этот эффект маскируется более мощным эффектом ослабления термоллюминесценции в дугообразной области, охватывающей эпицентр и имеющей ось симметрии, совпадающую с направлением проекции траектории. Последний эффект, очевидно, обусловлен действием ударной волны, обычно приводящим к понижению термоллюминесценции. Причина локального усиления термоллюминесценции вблизи эпицентра остается неясной.

Из сказанного вытекает, что светосумма термоллюминесценции в районе эпицентра Тунгусского взрыва выше, чем на его периферии; области повышенных значений светосуммы и интенсивности второго температурного максимума имеют характерную для некоторых других показателей Тунгусского взрыва

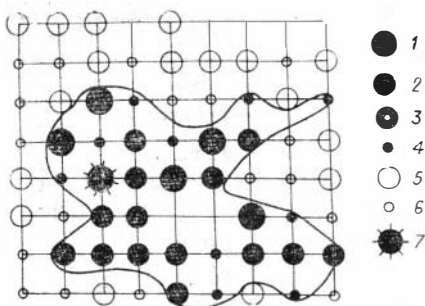


Рис. 4. Схема распространения треххвойности у сосны в районе Тунгусского взрыва.

1 — более 1100 треххвойных пучков на пробной площади; 2 — 901 + 1100; 3 — 701 + 900; 4 — 201 + 700; 5 — 51 + 200; 6 — 0 + 50; 7 — пробная площадь у горы Кларк.

структуру — двухлепестковый контур на востоке; указанные эффекты не могут быть сведены к случайно повышенному содержанию U в горных породах района.

О возможном влиянии Тунгусского взрыва на мутационный фон у сосны. Работами Г. Ф. Привалова, показано, что воздействие ионизирующей радиации на семена сосны *Pinus silvestris* приводит к изменению ряда ее морфологических признаков, в частности, к увеличению частоты встречаемости треххвойных лучков. Основываясь на этих данных,

Г. Ф. Плеханов и др. [16] провели изучение этого признака у сосны в районе падения Тунгусского метеорита и в других районах Сибири. На рис. 4 представлена схема распространения треххвойности сосны в районе падения Тунгусского метеорита. В данном случае в качестве критерия использовано суммарное число треххвойных пучков на данной пробной площади по всем годичным приростам 1964—1967 гг. Анализ рисунка показывает следующее.

Контур фигуры характеризуется двумя лепестками, ориентированными на СВ и ЮВ. Между ними видна глубокая выемка, входящая до восточной кромки Южного болота. В западной части контур области также имеет небольшую выемку.

Наиболее богатыми оказываются пробы в районах гор Стойкович, Фаррингтон и особенно Кларк; последняя является местом пересечения поверхности Земли с продолжением траектории Тунгусского метеорита при допущении, что угол входа составлял 40° . ЮВ выступ контура развит сильнее, чем СВ. Внутри контура встречается несколько бедных площадей. За пределами очерченной области идет ровный бедный фон.

С теми или иными нюансами этот факт воспроизводится из года в год: пробная площадь, находящаяся в точке района, где траектория Тунгусского метеорита встретила с земной поверхностью, остается в числе наиболее богатых. Контрастность этого эффекта ярче в те годы, когда треххвойность в изучаемом районе проявляется в целом слабее; отчетливее видны также восточная выемка и выступы на СЗ и ЮВ.

На рис. 5 сопоставлена также интенсивность проявления треххвойности с некоторыми метеорологическими показателями, регистрируемыми в пос. Ванавара. Самые «богатые» годы —

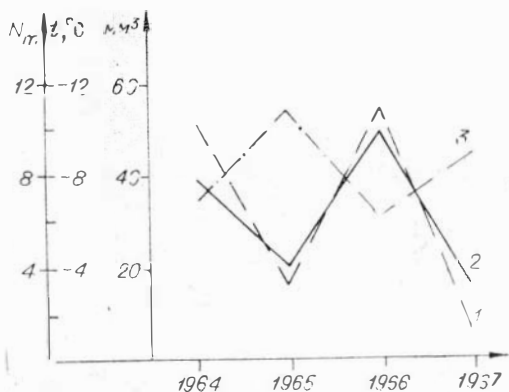


Рис. 5. Влияние экологических условий на динамику треххвойности сосны по годам.

Динамика треххвойности сосны (1) и апрельских температур (2) по годам; 3 — динамика атмосферных осадков в мм³.

это в то же время годы с наиболее низкими апрельскими температурами, относительно сухие и холодные: средняя температура за период с апреля по сентябрь составила в 1964 г. $+7,8^{\circ}$; в 1965 г. $+8,2^{\circ}$; в 1966 г. $+7,4^{\circ}$; в 1967 г. $+9,1^{\circ}$.

Как правило, сосны с повышенной треххвойностью — это процветающие экземпляры, дающие значительные приросты по высоте и диаметру ствола. На рис. 6 представлены результаты изучения возрастного состава деревьев с повышенной треххвойностью в районе эпицентра взрыва и в контрольном районе на хр. Чувар в районе Западного вывала. Нетрудно заметить сходство врих в обоих случаях.

Во время дополнительных исследований распределения повышенной треххвойности у сосны, проведенных в 1971 г., в эпицентре (на одном из островов на Южном болоте) было обнаружено несколько экземпляров сосен с необычно сильной аво-

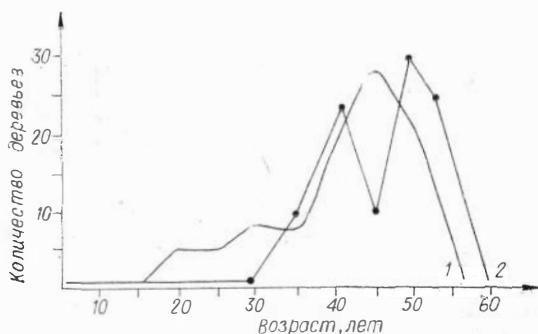


Рис. 6. Возрастная структура сосен с повышенным процентом треххвойности в районе эпицентра (1) и на Западном вывале (2).

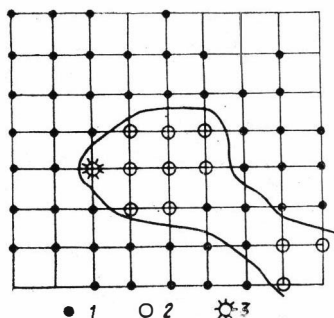


Рис. 7. Территориальное распределение молодых сосен с повышенным числом треххвойных пучков.

1 — фон; 2 — 2 фона и более;
3 — пробная площадь у горы Кларк.

хвойности у молодых сосен, которая тянется с ВСВ на ЗСЗ, обрываясь к западу от Заимки Кулика в районе горы Кларк.

Таким образом, эффект и сейчас прослеживается у второго поколения послекатастрофных деревьев, а это может иметь два объяснения: треххвойность сосны в изучаемом районе — это истинный мутационный признак, передающийся по наследству; данный признак выступает результатом фенотипирования (развития морфоза). В последнем случае мы должны прийти к заключению о том, что фактор, вызывающий эффект, продолжает действовать до настоящего времени.

Вопрос о причине треххвойности сосны в плане исследований биологических последствий Тунгусской катастрофы представляет второстепенный интерес, поскольку и мутация, и морфозы суть различные по механизму, хотя и сходные по внешним признакам реакции организма на одну и ту же группу экстремальных факторов. Как мутация, так и морфоз могут быть вызваны действием ионизирующей радиации.

Другими возможными экстремальными факторами могут быть воздействие некоторых химических веществ, особенно канцерогенов, а также температурный фактор (термомутации). Однако объяснить мутации влиянием возникшего после Тунгусского взрыва пожара и прогревом семян в подстилке вряд ли возможно. Наложение границ области наблюдаемого эффекта на карту пожара 1908 г. [13] показывает отсутствие между ними даже приблизительного сходства. Возможность мутагенеза в результате образования канцерогенов в ходе сухой перегонки древесины полностью исключить нельзя, но и здесь следовало бы ожидать совпадения границ области повышенной встречаемости треххвойности и следов лесного пожара 1908 г.

малей — более половины всех пучков на дереве оказались треххвойными.

Если повышенная треххвойность представляет собой результат мутационного эффекта, следует ожидать, что этот признак должен проявиться и у деревьев второго поколения. В связи с этим мы специально исследовали частоту встречаемости треххвойности у молодых (не старше 22 лет) сосен. Очевидно, что они представляют собой второе, если не третье, поколение деревьев, выросших после 1908 г. Из рис. 7 следует, что до настоящего времени существует узкая полоса повышения трех-

То обстоятельство, что область рассматриваемого эффекта, как и область повала деревьев ударной волной Тунгусского метеорита, имеет два лепестка — СВ и более развитый ЮВ, наводит на мысль о связи этих различных по своей природе эффектов. В то же время нет оснований считать причиной эффекта непосредственное действие ударной волны, так как очертания зон не являются геометрически подобными.

Границы аномалии не повторяют изодинам вывала. Усиление эффекта в районе горы Кларк также не может быть объяснено действием ударной волны, поскольку в этом районе аэродинамический напор был значительно слабее, чем по ряду других направлений.

Очевидно, необходимо дальнейшее исследование морфологических аномалий у растений и животных в данном районе. В связи с этим летом 1969 г. В. Г. Дмитриенко (Институт леса и древесины СО АН СССР) провела полевые сборы муравьев в различных точках района Тунгусского взрыва для энтомологического исследования. Анализ этого материала, проведенный для шести точек, показал, что по крайней мере одна из них — на горе Кларк — выделяется рядом морфологических признаков муравьев, которые статистически значимо отличаются от муравьев того же вида в окрестностях гор Стойкович и Фаррингтон, на оз. Чеко и в других местах. Например, у муравьев в районе горы Кларк и оз. Чеко средняя длина головы в миллиметрах соответственно $1,38 \pm 0,079$ и $1,47 \pm 0,121$; длина груди $2,07 \pm 0,143$ и $2,16 \pm 0,141$; ширина головы $1,22 \pm 0,085$ и $1,31 \pm 0,129$; длина скапуса $1,54 \pm 0,103$ и $1,64 \pm 0,106$. Эти исследования являются предварительными, однако они дают основание для постановки работ по поискам аномалий у животных и растений в исследуемом районе.

Резюмируя приведенный материал, следует отметить три группы явлений, могущих быть следствием ядерной природы Тунгусского взрыва: наличие в окрестностях эпицентра повышенного фона радиоактивности почвы и растений, термлюминесценции горных пород и частоты некоторых биологических аномалий. На основании имеющегося фактического материала можно считать эти факты достоверными. Возникает вопрос о природе этих аномалий и их возможной связи с Тунгусской катастрофой. Природа повышения радиоактивного фона вблизи эпицентра недостаточно исследована и ее связь с Тунгусским метеоритом проблематична. Что же касается термлюминесценции и биологических эффектов, то их связь с Тунгусским метеоритом представляется нам весьма вероятной.

Симметричная двухлепестковая форма как механических разрушений, так и эффектов, вызванных, по-видимому, излучением в различных участках электромагнитного спектра, могла возникнуть в результате резкой анизотропии, выделения механической и электромагнитной энергии в зоне взрыва, связанной

со структурой источника (диаграмма направленности имела двухлепестковую осесимметричную форму, нашедшую отражение в наблюдаемых на поверхности Земли эффектах), либо взаимодействия баллистической и взрывной волн; источником электромагнитного излучения послужил раскаленный фронт ударной волны, когда он находился еще достаточно высоко над землей.

Что бы ни было источником изучения — зона взрыва или фронт ударной волны, значительная часть ожоговых поражений веток деревьев была вызвана видимым и инфракрасным участками спектра. Для возникновения же высокотемпературной термолюминесценции и биологических эффектов мутационного типа необходимы кванты более высоких энергий (ультрафиолет, рентген, γ -излучение).

При ядерном взрыве в тропосфере рентгеновское излучение поглощается воздухом на расстоянии менее 1 м [5] и, следовательно, не может быть причиной термолюминесценции или мутаций. Для создания достаточно жесткого теплового рентгеновского излучения требуется сверхвысокая температура источника, явно несоизмеримая с наблюдаемым термическим действием Тунгусского взрыва.

Вероятно, механизм взрыва или разрушения Тунгусского метеорита был более сложным, чем это считалось до сих пор. Не исключено, что рассмотренные эффекты указывают на действие принципиально новых физических или космохимических явлений.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность академику Г. И. Будкеру, профессорам Н. В. Тимофееву-Ресовскому, Г. Ф. Привалову и Н. Н. Карташевой за ценные консультации, а также кандидату геолого-минералогических наук В. Б. Василенко — за руководство исследованиями по термолюминесценции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М., Воениздат, 1960, 230 с.
2. Василенко В. Б., Демин Д. В., Журавлев В. К. Термолюминесцентный анализ пород из района Тунгусского падения. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 227—231.
3. Виноградов А. П., Девирц А. Л., Добкина Э. И. Концентрация C^{14} в атмосфере во время Тунгусской катастрофы и антивещество. «Докл. АН СССР», 1966, т. 168, № 4, с. 900—903.
4. Воробьев В. А., Демин Д. В. Новые результаты исследований термических поражений лиственных в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Успехи метеоритики. Изд-во Томского ун-та, 1975, с. 35—40.
5. Действие ядерного оружия. М., Воениздат, 1963, с. 596.
6. Демин Д. В. Алгоритм статистической оценки параметров Тунгусского падения по данным паземных наблюдений. — В кн.: Проблема

Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 235—237.

7. Журавлев В. К. К оценке световой энергии Тунгусского взрыва.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 120—122.
8. Зенкин Г. М., Ильин А. Г. О лучевом ожоге деревьев в районе взрыва Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1964, вып. 24, с. 129—140.
9. Золотов А. В. Новые данные о Тунгусской катастрофе 1908 г.— «Докл. АН СССР», 1961, т. 136, № 1, с. 84—87.
10. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. Минск, «Наука и техника», 1969, 202 с.
11. Кириченко Л. В., Гречушкина М. П. О радиоактивности почвы и растений в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 137—152.
12. Колесников Е. М., Лаврухина А. К., Фисенко А. В. Анализ образцов минеральной составляющей почв из района Тунгусской катастрофы 1908 г. на содержание Ag^{39} .— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 28—29.
13. Курбатский Н. П. О лесном пожаре в районе Тунгусского падения.— «Метеоритика», 1964, вып. 25, с. 168—172.
14. Мехедов В. Н. О радиоактивности золы деревьев в районе Тунгусской катастрофы.— Препринт-3311, ОИИИ, Дубна, 1967.
15. Плеханов Г. Ф. Предварительные итоги двухлетних работ комплексной самодеятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 3—15.
16. Плеханов Г. Ф., Плеханова Л. Г., Привалов Г. Ф. О мутационных последствиях Тунгусского взрыва 1908 года.— «Изв. СО АН СССР, сер. биол.-мед.», 1968, т. 5, с. 44—48.
17. Станюкович К. И., Шалимов В. И. О движении метеорных тел в атмосфере Земли.— «Метеоритика», 1961, вып. 20, с. 54—58.
18. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 62—104.
19. Auer S. Artificial simulation of micrometeoroides.— «AIAA J.», 1971, v. 3, p. 516—518.
20. Cowan C., Atluri C. R., Libbi W. F. Possible anti-matter content of the Tunguska meteor of 1908.— «Nature», 1968, v. 206, № 4987, p. 861—865.

Е. М. КОЛЕСНИКОВ, А. Ю. ЛЮЛЬ, Г. М. ИВАНОВА

НЕЙТРОНОАКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СИЛИКАТНЫХ ШАРИКАХ ИЗ ТОРФА РАЙОНА ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Сотрудниками экспедиций АН СССР в 1961—1962 гг. в почвах района Тунгусского взрыва было обнаружено мелкодисперсное магнетитовое космическое вещество (шарики) и выявлен характер его распределения на местности. Предполагалось, что шарики представляют собой остатки Тунгусского метеорита

[20 21], однако доказать это со всей определенностью было невозможно, так как в верхнем слое почвы всегда концентрируется выпавшее на поверхность Земли космическое вещество. Методика выделения космической пыли из почв позволяла определять только магнетитовые шарики, а силикатная составляющая почти полностью терялась. Состав четырех силикатных шариков из почв на месте Тунгусского взрыва был изучен Глассом [30].

В последние годы проводились поиски космического вещества на месте Тунгусской катастрофы в слоях сфагнового торфа [3]. Горизонт торфяной залежи, относящийся к 1908 г, хорошо стратифицировался повышенной зольностью и содержал аномально высокое количество силикатных шариков размером от 15 до 120, иногда даже до 1400 мкм. Задачей дальнейших исследований является тщательное изучение химического состава вещества шариков разных типов и размеров.

Содержание главных элементов в трех шариках из торфа было исследовано с помощью рентгеноспектрального микрозонда [5]. Был проведен также вольюмометрический микроанализ газов из включений в шариках. Сделан вывод в том, что состав микросферул отличается от состава земных пород, метеоритов, тектитов, лунных пород, а также от состава силикатных шариков, выделенных из почвы в районе Тунгусского падения. В газовых включениях шариков обнаружены CO_2 , CO , H_2 . Не исключено поэтому, что шарики связаны с веществом Тунгусского метеорита. Однако в работе [5] удалось исследовать химический состав только крупных шариков (> 100 мкм), которые встречаются сравнительно редко. Перед нами стояла цель исследовать наиболее представительную группу шариков размером 30—80 мкм. Мы попытались использовать один из наиболее чувствительных методов исследования — нейтроноактивационный, который к тому же обладает определенными преимуществами с точки зрения возможности получения среднего содержания элементов в микросферулах, так как анализ можно было проводить одновременно на десятках и сотнях микросферул, что было невозможно при анализе на микрозонде, где изучается каждый отдельный шарик. Используя данный метод, невозможно получить информацию обо всех главных элементах вещества шариков, зато можно надеяться измерить содержание некоторых элементов-примесей.

Образцы силикатных шариков для исследования были выделены по методике Ю. А. Львова и др. [13] из пробы торфа № 2050, взятой в 30 км к югу от эпицентра взрыва. Послойная колонка была озолена в муфельной печи при температуре 600°C , после чего пробы промывались и просматривались под бинокулярным микроскопом; обнаруженные шарики отделялись вручную. Часть отобранных шариков была нагрета в предварительно откалиброванной печи, установленной

Образцы шариков, подвергнутые облучению в реакторе, их навески и вычисленная средняя плотность

Образец, №	Проба	Количество шариков; диаметр, мкм					Навеска, ка, 10 ⁻⁶ г	$\rho_{\text{ср}}$, г/см ³
		30—50	>50— —70	>70— —90	>90— —110	>110— —150		
2	Н-1, бесцветные промышленные			7	4	18	17,43	0,8
3	2050-13, бесцветные тунгусские	27	6	7	1		5,94	1,9
4	2050-13, серые тунгусские	28	11	12			8,41	2,0

на столике микроскопа. Температура их плавления оказалась равной 660—700°C. Нами анализировались сферулы из слоя торфа № 13, который особенно богат ими. Подобрано два наиболее распространенных типа шариков — бесцветные и серые. Количество шариков каждого типа и их распределение по размерам приведены в табл. 1.

Бесцветные шарики (обр. 3) представляют собой сферулы правильной и не очень правильной формы, колбочки, гантели; иногда к шарiku прилипают более мелкие частицы различной формы. Встречаются шарики с газовыми пузырьками, но чаще — без них. Последние — очень чистые, прозрачные, блестящие, иногда угловатые, с округленными углами. Микросферулы с газовыми пузырьками, вероятно, по этой причине совсем прозрачны. Серые шарики (обр. 4), как правило, имеют не очень правильную сферическую форму; встречаются также гантели, капли, спаянные шарики. Их грязно-серый цвет обусловлен тем, что в прозрачном бесцветном стекле встречаются темные неправильные включения. Изредка, когда включений много, шарики кажутся черными.

Контрольная индустриальная проба Н-1 (обр. 2) представляет собой городскую промышленную пыль, собранную на матерчатом фильтре в форточке окна. Из этой пробы были отобраны шарики, сходные по внешнему виду с тунгусскими — бесцветные прозрачные сферулы с газовыми включениями.

Каждый вид шариков был завернут в индивидуальный пакетик из чистой алюминиевой фольги, а каждый пакетик взвешивался до и после упаковки шариков. На внутренней стороне каждого развернутого пакетика с помощью стержня от шариковой ручки делалось по несколько углублений, в которые под микроскопом переносились шарики. Навески шариков были взяты М. Н. Петриковой (ГЕОХИ АН СССР) на ультрамикрoаналитических весах УМАВ-0,005-5, позволяющих взвешивать 10⁻⁶ — 10⁻⁷ г вещества с чувствительностью 10⁻⁸ — 10⁻⁹ г. Для взвешивания пакетиков была изготовлена специальная

тарная подвеска размером $3 \times 5 \times 1$ мм, также из алюминиевой фольги, в которую помещался пакетик и которая могла закрепляться на кварцевой нити весов.

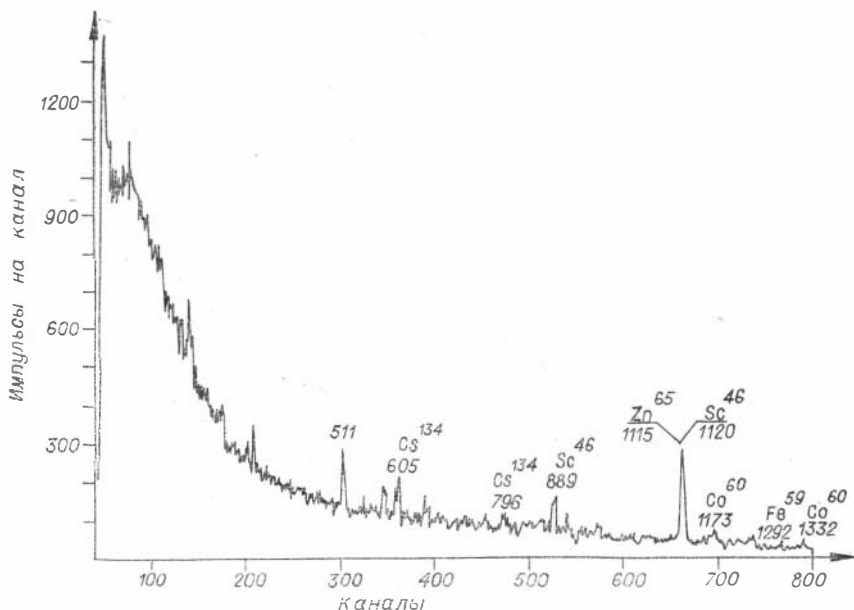
Величина навесок приведена в табл. 1. Там же указана средняя плотность вещества шариков каждого типа, рассчитанная исходя из средних размеров микросферул и величины навесок. Хотя эти данные являются приблизительными из-за неточности в определении размеров шариков, их следует обсудить, так как для тунгусских шариков они получены впервые.

По средней плотности бесцветные и серые шарики близки между собой и резко отличаются от промьшленных шариков. Плотность Тунгусских шариков оказалась ниже плотности метеоритов и основных типов земных пород ($2,5-3,4$ г/см³), по всей вероятности, из-за присутствия в шариках газовых пузырьков, но также и характерного химического состава с преобладанием легких элементов (см. ниже). Ближе всего по плотности Тунгусские шарики находятся к вулканическим стеклам (в среднем $2,40$ г/см³) — обсидианам ($2,35$ г/см³), липаритам ($2,26$ г/см³) [15], а также к тектитам (среднее значение плотности $2,4$ г/см³ [2]). Средняя плотность черных магнитных шариков равна $4,54$ г/см³ [7].

Упакованные в фольгу шарики дважды в течение года (по 2 месяца) облучались в центральном канале реактора в потоке нейтронов $3 \cdot 10^{13}$ н/см² с. Одновременно с пробами шариков облучалось $0,2059$ мг эталонной породы W-1 (диабаз), в которой во многих лабораториях мира различными методами было определено содержание элементов [27, 28, 31]. Интенсивности линий изотопов различных элементов в γ -спектрах активированных шариков сравнивались с интенсивностью соответствующих линий в спектре этой породы. После окончания второго облучения образцы переупаковывались в чистую полиэтиленовую пленку, и их активность измерялась при различных временах «остывания».

Спустя 20 ч образцы измерялись на сцинтилляционном γ -спектрометре с кристаллом NaI(Tl) размером 40×40 мм. По измеренным спектрам определялось содержание Na по изотопу Na^{24} ($T_{1/2} = 15,1$ ч, $E_\gamma = 1,37$ МэВ; здесь и далее у изотопов приведены только γ -линии, по которым рассчитывалось содержание; для идентификации изотопов использовались и другие линии).

После охлаждения в течение 2 месяцев активность образцов измерялась на γ -спектрометре с полупроводниковым детектором объемом 45 см³ и 800-канальным анализатором импульсов в течение нескольких часов. Наличие сильного тормозного излучения затрудняло обработку спектров, поэтому через 3 недели измерение было повторено. Для ослабления β -излучения применялся фильтр — $0,5$ мм свинца и 1 см плексигласа. Идентификация изотопов проводилась по энергиям фотопиков и срав-



α -спектр одного из образцов, активированных в реакторе силикатных тунгусских шариков (обр. 4, см. табл. 1).

Время остывания—3 мес, время измерения—5ч.

нению периодов полураспада отдельных линий. Один из спектров образца этой серии измерений приведен на рисунке. При данном времени охлаждения было измерено содержание Fe, Sc, Se — по Fe^{59} ($T_{1/2} = 46,5$ дней, $E_{\gamma} = 1,099$ и $1,292$ МэВ), Sc^{46} ($T_{1/2} = 83,9$ дня, $E_{\gamma} = 0,889$ и $1,120$ МэВ) и Se^{75} ($T_{1/2} = 120,4$ дня, $E_{\gamma} = 0,136$ и $0,265$ МэВ), а также Co, Zn и Cs по Co^{60} ($T_{1/2} = 5,3$ года, $E_{\gamma} = 1,173$ и $1,332$ МэВ), Zn^{65} ($T_{1/2} = 246$ дней, $E_{\gamma} = 1,115$ МэВ) и Cs^{134} ($T_{1/2} = 2,1$ года, $E_{\gamma} = 0,605$ и $0,796$ МэВ). Для определения площади линий Zn^{65} в спектрах на фоне линий Sc^{46} с $E_{\gamma} = 1,120$ МэВ (см. рисунок) в тех же условиях измерялся облученный эталон Sc, что дало возможность измерить отношение площадей линий Sc^{46} с $E_{\gamma} = 0,889$ и $1,120$ МэВ. Содержание Co, Zn и Cs было повторно определено через год после прекращения облучения.

В этой же серии были измерены Eu и Ag по Eu^{152} ($T_{1/2} = 12,7$ года, $E_{\gamma} = 0,122$ и $0,344$ МэВ) и Ag^{110m} ($T_{1/2} = 253$ дня, $E_{\gamma} = 0,658$ МэВ). Эта последняя серия измерений (при охлаждении 15 месяцев) была повторена в лаборатории ядерно-геохимических методов анализа ИГиГ СО АН СССР на γ -спектрометре с ППД и 4096-канальным анализатором импульсов. Высокая стабильность аппаратуры в этой лаборатории позволяет проводить многочасовые круглосуточные измерения. Каждый из

Содержание элементов в тунгусских силикатных микро

Образец	Si	Главные элементы, %					
		Al	Fe	Mg	Ca	Na	
№ 2		≤ 12,3	1,5±0,3				0,26± ±0 11
№ 3		≤ 19,5	≤ 0,8				2,5±0,6
№ 4		≤ 12,4	≤ 0,6				2,8±0,6
1 шарик [30]	28,0	9,2	2,6	1,4	4,2		1,1
Среднее из 3 шариков [30]	22,5	6,8	3,3	4,2	16,3		1,0
Среднее для 3 шариков [5]	33,1	3,3	1,7	0,3	1,4		9,2
Тектиты:							
молдавиты	36,9	5,9	1,9	0,9	1,5		0,4
индошиниты	34,2	6,7	3,9	1,3	1,6		1,1
австралиты	34,2	6,5	3,6	1,2	2,4		0,9
Траппы:							
наши данные			13,1		10,7		1,5
данные из [14]	23,0	8,1	9,5	4,0	7,5		1,7

образцов измерялся в течение суток, после чего из полученных спектров был вычтен фоновый спектр, снятый за такое же время. Это позволило значительно снизить ошибку измерения низких уровней активности радиоизотопов в образцах. Сходимость результатов для одних и тех же элементов по различным линиям и в различных сериях измерений хорошая, хотя для некоторых элементов чувствительности метода все же не хватило даже при столь длительном облучении образцов из-за их очень малых навесок. Так, для Fe удалось определить только верхний предел содержания.

Для определения Al и Mn (а также повторно Na) образцы облучались на пневмопочте в потоке тепловых нейтронов $6 \cdot 10^{12}$ н/см²·с в течение 2 мин. Время остывания 1,5 мин. Содержания Al и Mn определялись по изотопам Al²⁸ ($T_{1/2} = 2,3$ мин, $E_{\gamma} = 1,78$ МэВ) и Mn⁵⁶ ($T_{1/2} = 2,6$ ч, $E_{\gamma} = 0,847$ МэВ) на γ -спектрометре с кристаллом NaI (Tl).

Содержания элементов, которые были измерены в пробах шариков, приведены в табл. 2. Там же приведена ошибка измерений, которая определялась главным образом погрешностью в измерении интенсивности линий в γ -спектрах. В тех случаях, когда ошибка не указана, она $\geq 100\%$. Следует отметить, что для некоторых элементов все же удалось реализовать высокую чувствительность метода и получить достаточно надежные и точные результаты, хотя измерялись ультрамалые количества

сферулах, тектитах и траппах Сибирской платформы

		Элементы-примеси, 10^{-4} %						
K	Mn	Zn	Co	Sc	Ag	Cs	Se	Eu
	0,2	$\leq 1,2$	11 ± 2	$10,0 \pm 0,5$	$\leq 0,3$	$4,2 \pm 0,2$	$\leq 0,05$	$0,88 \pm 0,4$
	0,6	$172 \pm \pm 11$	$0,53 \pm \pm 0,07$	0,8	1,9	$0,5 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$0,06 \pm 0,01$
	0,3	$170 \pm \pm 9$	$0,56 \pm \pm 0,08$	0,5	0,8	$0,2 \pm 0,1$	0,1	$0,04 \pm 0,01$
7,1	0,2							
1,5	0,4							
1,5	0,01							
2,5	0,06	7,6	8	3	< 1			0,83
2,0	0,09	7,8	8,9	< 1				1,5
1,8	0,09	9,6	15	13	< 1	2,5		
1,0			53	47				
0,8	0,15							1,9

элементов: Eu $\simeq 4 \cdot 10^{-13}$ г; Co, Sc, Cs и Se $\simeq (2-5) \cdot 10^{-12}$ г; Zn $\simeq 5 \cdot 10^{-11}$ г.

Измерение изотопов среднего периода полураспада (с охлаждением образцов от нескольких дней до нескольких недель) по техническим причинам в наших опытах провести не удалось. В будущем оно, по-видимому, даст возможность измерить содержание значительно большего числа элементов.

Нам удалось определить содержание 11 элементов. В табл. 2 приведены также материалы ранее опубликованных работ [5, 30] по анализу силикатных Тунгусских шариков, данные о составе нескольких групп тектитовых стекол [22], среднее содержание элементов, полученные нами с помощью нейтронно-активационного анализа в четырех образцах траппов из района Тунгусского взрыва, и литературные данные о среднем содержании элементов в траппах Сибирской платформы [14].

Как видно из табл. 2, содержания элементов в бесцветных (обр. 3) и серых (обр. 4) шариках близки между собой и, как правило, сильно отличаются от состава промышленных шариков (обр. 2). Это может служить косвенным подтверждением правильности проведенного анализа.

Проанализированные нами Тунгусские микросферулы довольно значительно отличаются от ранее проанализированных на микронде шариков аналогичного типа из торфов, но большего размера [5]. Так, мы не нашли в них столь высокого со-

держания Na (9,2%), которое встретили предыдущие исследователи, хотя его содержание и по нашим данным все же весьма велико (2,5 и 2,8%). Напротив, Al в наших анализах примерно в 5 раз, а Mn — в 45 раз больше, чем в работе [5]. Маловероятно, чтобы это различие было вызвано большими систематическими ошибками анализов. Скорее всего, либо изучались шарики разного состава, либо они очень неоднородны по содержанию элементов в различных точках от поверхности к центру, что могло сказаться при анализах на микросзонде. Большую гетерогенность в содержании K, Fe, Na и отчасти Al наблюдал Гласс [30] в анализах на микросзонде силикатных тунгусских шариков размером 80—100 мкм, выделенных из почв с места взрыва.

Полученные нами данные о содержании Na весьма надежны. Этот элемент анализировался дважды — при длительном и коротком (на пневмопочте) облучении. Результаты обоих анализов хорошо совпали. Данные по Al, возможно, слегка завышены (поэтому у полученных значений стоит знак \leq). Завышение могло быть вызвано загрязнением поверхности микросферул от пакетиков из алюминиевой фольги. Однако ожидать значительных весовых загрязнений с поверхности все же не следует.

По содержанию Al, Na и Mn проанализированные нами шарики ближе к шарикам из почв, проанализированных Глассом [30], чем к шарикам из торфов, проанализированных Ю. А. Долговым и др. [5]. Наиболее близко наши данные соответствуют данным для одного шарика из работы [30], который отличался от трех других повышенным содержанием Si, Al, K и пониженным — Ca, Mg и Fe. Гласс сделал заключение, что из четырех проанализированных им шариков только этот близок по составу к микротектитам Австралии, отличаясь от них только повышенным содержанием K.

Проанализированные нами Тунгусские микросферулы как по содержанию элементов, так и по отношениям между ними не тяготеют ни к одной из генетических групп земных пород. Это видно также из приведенных анализов изверженных пород с места Тунгусского взрыва. В шариках по крайней мере на порядок меньше Fe, на полтора порядка — Eu и на два — Co и Sc, и, напротив, на порядок больше Ag и Cs. Таким образом, исследованные микросферулы не могли образоваться путем переплавления пыли, поднятой взрывом с поверхности Земли. Не могли они образоваться также и при сгорании в атмосфере метеорита обычного состава. В метеоритах в тысячу раз больше C_0 , в несколько десятков раз больше Fe и в несколько раз меньше Na и Al, за исключением богатых Ca ахондритов, где содержание Al может достигать 6,9% [36]; но и эта величина значительно меньше наблюдаемого содержания Al в микросферулах. Проведенные одним из автором настоящей статьи (Г. М. Ивановой) опыты по сжиганию вещества хондритов, ахондритов

и железо-каменных метеоритов в пламени вольтовой дуги с последующим анализом на микрозонде продуктов сгорания подтвердили это заключение. Аналогичный вывод сделали авторы предыдущих работ [5, 30].

Исследованные нами микросферулы сложены сильно дифференцированным веществом, резко обедненным сидерофильными элементами (Fe, Co), а также Sc, и обогащенным литофильными (Al, Na, Mn, возможно, также Se и Cs) и халькофильными (Zn, Ag, Se?) элементами. Содержание Eu в микросферулах ($\sim 5 \cdot 10^{-6}\%$) близко к его среднему содержанию в хондритах ($8 \cdot 10^{-6}\%$) [11]. Оно примерно в 5 раз больше, чем в ультраосновных породах ($10^{-6}\%$) и в 20 раз ниже, чем в базальтах ($10^{-4}\%$; данные по породам [4]) и в 60 раз ниже, чем в исследованных нами трапхах ($1,9 \cdot 10^{-4}\%$).

По мнению Ю. А. Долгова [6], Тунгусские микросферулы по составу газовой фазы, равно как и молдавиты, ливийское стекло и некоторые индошиниты, могли образоваться при падении на Землю кометы и смешении кометных газов с газами атмосферы с последующим захватом смеси расплавленным твердым материалом. По химическому составу, полученному на микрозонде, шарики из торфа также близки к тектитам, но отличаются от них повышенным содержанием Na и пониженным — Al. Проанализированные нами шарики по составу и удельному весу находятся ближе всего к тектитовым стеклам, несколько обедненным тяжелыми элементами — Fe, Co и Sc и особенно Eu и, напротив, обогащенным легкими и летучими элементами — Al, Na и Zn.

Мюллер и Гентнер [34] также наблюдали обогащение летучими элементами тектитов Муонг-Нонг из Лаоса. Если обычные индошиниты, филиппиниты, австралиты и молдавиты имеют довольно низкое содержание Cl (от 1 до $14 \cdot 10^{-4}\%$) и Br (от 0,015 до $0,15 \cdot 10^{-4}\%$) и почти постоянное отношение Cl к Br — от 80 до 120 [24], то тектиты Муонг-Нонг обладают аномально высоким — даже по сравнению с земными породами — содержанием Cl и Br (соответственно от 100 до $330 \cdot 10^{-4}$ и от 1,1 до $4,6 \cdot 10^{-4}\%$), а Cl/Br имеет величину 70—90, т. е. значительно ниже средней для тектитов. Определение содержания Zn, Cu и Ni показало обогащение тектитов Муонг-Нонг также Zn и Cu по сравнению с обычными индошинитами. По мнению Мюллера и Гентнера [34], по крайней мере часть этих элементов могла быть принесена большой кометой, богатой летучими элементами, которая явилась источником австралийско-азиатского поля рассеивания тектитов (в то же время они не отрицают возможности земного происхождения тектитов).

Эти данные коррелируют с аналогичными результатами американских ученых по исследованию лунных образцов «ржавой почвы» из окрестностей кратера Декарт [32] и «оранжевого грунта» с бровки кратера Шорти [33]. В обоих случаях наблю-

далось обогащение образцов летучими элементами по сравнению с окружающими породами. Так, для «ржавой почвы» (образец 66095) наряду с признаками кратковременного ударного воздействия была обнаружена повышенная концентрация Zn, Pb и Cl [26], что, вероятно, свидетельствует о падении на Луну ядра кометы или углистого хондрита I типа. Образование «оранжевого грунта» (образец 74220) также связывается с кометой, которая, по всей вероятности, явилась источником аномально высокого содержания Zn ($\sim 260 \cdot 10^{-4}\%$), Cu ($42 \cdot 10^{-4}\%$), Ni ($65 \cdot 10^{-4}\%$), а также Cl и других летучих элементов [25]. Размер частиц в этом образце ≤ 50 мкм. (Размер зерен обычного реголита составляет 70—80 мкм.) «Оранжевый грунт» на 90% состоит из сферических стеклянных частиц, окраска которых объясняется повышенным содержанием TiO_2 ; C и S в нем находятся в виде конденсата на поверхности частиц [29]. Следовательно, стеклянные сферулы «оранжевого грунта» — это продукт расплава обломков минеральных зерен при соударении с поверхностью Луны кометы [25].

Как уже отмечалось выше, вещество тунгусских микросферул было подвержено сильной дифференциации, что может служить одним из признаков их кометного происхождения. Действительно, если считать вещество комет продуктом поздних стадий дифференциации протопланетного облака, то наряду с присутствием в кометах огромного количества H_2 , углеводородов и других газов твердая составляющая вещества комет должна быть обогащена легкоплавкими и летучими элементами и соединениями. По мнению Уиппла [35], кометы должны были образоваться из летучих веществ, сконденсировавшихся во внешних районах солнечной системы.

Согласно Андерсу [23], при конденсации газа в остывающем протопланетном облаке солнечного состава (при общем давлении 10^{-4} атм) вначале конденсируются наиболее тугоплавкие вещества — такие как платиновые металлы, силикаты и шпинели, затем Fe, Ni и магниевые силикаты. И только при температурах ниже $1200^\circ K$ сконденсированное вещество обогащается металлами от Cu (избыток в тектитах Муонг-Нонг и «оранжевом грунте») до Al (проанализированные нами Тунгусские шарики). При еще более низких температурах конденсируются Cd, Te, Se (тунгусские шарики) и Zn (большой избыток в тектитах Муонг-Нонг, «ржавой почве», «оранжевом грунте» и тунгусских шариках), а также щелочные металлы (тунгусские шарики). Далее конденсируются Pb (обогащение «ржавой почвы»), Bi, Te и In. Самые низкотемпературные конденсаты должны содержать в большом количестве галогены и другие летучие компоненты.

Таким образом, данные о содержании и распределении элементов в тунгусских микросферулах не противоречат кометной гипотезе Тунгусского метеорита, которую поддерживает в на-

стоящее время большинство ученых [6, 8—10, 17—19].

Дальнейшая значительная дифференциация элементов могла произойти при испарении и обратной конденсации твердой составляющей кометного вещества во время Тунгусского взрыва. Это могло явиться причиной нового разделения вещества на высокотемпературную (магнетитовые шарики?) и низкотемпературную (силикатные шарики?) составляющие, что, вероятно, и привело к образованию силикатных шариков такого необычного состава. Если следовать теории Гольдшмидта о дифференциации элементов при охлаждении и кристаллизации вещества из высокотемпературной газовой фазы [15], то оказывается, что вещество силикатных тунгусских шариков должно быть обеднено элементами, выпадавшими в твердую фазу на первичной стадии кристаллизации (Fe, Co), что действительно наблюдалось в наших опытах, а также Mg, как это получили Ю. А. Долгов и др. [5] и Гласс [30] — один шарик из почвы, наиболее похожий на проанализированные нами шарики (см. табл. 2). Напротив, на средней и поздней стадиях кристаллизации вещество должно обогатиться Al, Na, Zn, Mn, Ag и Se, как это и наблюдалось в наших анализах, и K (тот же шарик в работе [30]).

Все вышесказанное позволяет заключить, что химический состав силикатных тунгусских шариков имеет признаки кометного происхождения. В дальнейшем, чтобы подтвердить этот вывод, очень важно измерить содержание в микросферах Cu, Pb, Te, In и галогенов, а также — с помощью высокочувствительного масс-спектрометра — содержание и изотопный состав инертных газов. Последнее является весьма сложной экспериментальной задачей, но может дать очень ценные сведения о природе Тунгусского космического тела.

В заключение авторы выражают благодарность профессору Н. В. Васильеву и А. К. Лаврухиной за предоставленную возможность выполнить анализы и полезное обсуждение результатов; Т. И. Холодковской и Ю. А. Стахееву за помощь в работе; Г. П. Вдовыкину и М. Б. Ширяевой за просмотр рукописи и ценные замечания; М. Н. Петрковой за взвешивание образцов шариков; В. А. Боброву, Г. П. Варварину и В. С. Пархоменко за контрольные измерения на γ -спектрометре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С. Большой Тунгусский метеорит. — «Природа», 1951, № 2, с. 23—32; № 3, с. 13—23.
2. Бейкер Дж. Форма и скульптура тектитов. — В кн.: Тектиты. М., «Мир», 1966, с. 11—41.
3. Васильев И. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски мелкодисперсного космического вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита. — «Метеоритика», 1973, вып. 32, с. 141—146.
4. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. — «Геохимия», 1962, № 7, с. 555—571.

5. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1973, вып. 32, с. 147—149.
6. Долгов Ю. А. Исследование состава газов из включений в тектитах и космической пыли.— «Метеоритика», 1974, вып. 33, с. 121—129.
7. Иванова А. В., Флоренский К. П. Мелкодисперсное космическое вещество на Земле.— «Астрон. вестник», 1971, т. 5, № 1, с. 6—15.
8. Идлис Г. М., Карягина З. В. О кометной природе Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1961, вып. 21, с. 32—43.
9. Колесников Е. М. Сочетание, посвященное проблеме Тунгусского метеорита.— «Земля и Вселенная», 1972, № 1, с. 54—55.
10. Колесников Е. М., Лаврухина А. К., Фисенко А. В. Экспериментальная проверка гипотез аннигиляционного и термоядерного характера Тунгусского взрыва 1908 г.— «Геохимия», 1973, № 8, с. 1115—1121.
11. Колесов Г. М. Содержание редкоземельных элементов в пяти обыкновенных хондритах.— «Метеоритика», 1974, вып. 33, с. 42—46.
12. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. М.— Л., Изд-во АН СССР, 1949, 195 с.
13. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В. и др. Обнаружение космического вещества в некоторых природных объектах. Новосибирск, изд. ИГГ СО АН СССР, 1971, 8 с.
14. Масайтис В. Л., Абрамович П. И., Додин Д. А., Смыслов А. А. Уран в траппах Сибирской платформы.— «Геохимия», 1966, № 5, с. 511—524.
15. Мняки Я. Основы геохимии. Л., «Недра», 1969, 327 с.
16. Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, 214 с; вып. 2, 1967, 238 с.
17. Фесенков В. Г. О кометной природе Тунгусского метеорита.— «Астрон. жур.», 1961, т. 38, вып. 4, с. 577—592.
18. Фесенков В. Г. О природе Тунгусского метеорита.— «Метеоритика», 1961, вып. 20, с. 27—31.
19. Фесенков В. Г. Тунгусское падение и связанные с ним проблемы.— «Метеоритика», 1968, вып. 28, с. 107—113.
20. Флоренский К. П. Предварительные результаты Тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г.— «Метеоритика», 1963, вып. 23, с. 3—29.
21. Флоренский К. П. Проблемы космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита.— «Геохимия», 1963, № 3, с. 284—296.
22. Шнетцлер К., Пинсон У. Химический состав тектитов.— В кн.: Тектиты, М., «Мир», с. 137—188.
23. Anders E. Chemical processes in the early solar system, as inferred from meteorites.— «Acc. Chem. Res.», 1968, v. I, № 10, p. 289—298.
24. Becker V. J., Manuel O. K. Chlorine, bromine, iodine and uranium in tektites, obsidians and impact glasses.— «J. Geophys. Res.», 1972, v. 77, № 32, p. 6353—6359.
25. Brown G. M., Holland J. G., Peckett A. Orange soil from the Moon.— «Nature», 1973, v. 242, № 5399, p. 515—516.
26. El Goresy A., Ramdohr P., Pavicevic M., Medenbach O., Müller O., Gentner W. Zinc, lead, chlorine, and Fe-OOH-bearing assemblages in the Apollo 16 Sample 66095: origin by impact of a comet or a carbonaceous chondrite?— «Earth and Planet. Sci. Lett.», 1973, v. 18, № 3, p. 411—419.
27. Filby R. H., Haller W. A., Shah K. R. Determination of 32 elements in rocks by neutron activation analysis and high resolution gamma-ray spectrometry.— «J. Radioanal. Chem.», 1970, v. 5, № 2, p. 277—290.
28. Fleischer M. Summary of new data on rock samples G-I and W-I, 1962—1965.— «Geochim. et Cosmochim. Acta», 1965, v. 29, № 12, p. 1263—1284.

29. Gibson E. K., Jr. Moore C. B. Variable carbon contents of lunar soil 74220.— «Earth and Planet Sci. Lett.», 1973, v. 20, № 3, p. 404—408.
30. Glass B. P. Silicate spherules from Tunguska impact area.— «Science», 1969, v. 164, № 3879, p. 547—549.
31. Gordon G. E., Randle K., Goles G. G., Corliss J. B., Beeson M. H., O'Leary S. S. Instrumental activation analysis of standard rocks with high — resolution — ray detectors.— «Geochim. et Cosmochim. Acta», 1968, v. 32, N 4, p. 369—396.
32. Gregory W. H. Apollo samples point to comet impact.— «Aviat. Week and Space Technol.», 1972, v. 97, № 15, p. 18—20.
33. Harrison S. H. Apollo 17 report on the valley of Taurus — Littrow.— «Science», 1973, v. 182, № 4113, p. 681—690.
34. Müller O., Gentner W. Enrichment of volatile elements in Muong Nong— type tectites: clues for their for formation history?— «Meteoritics», 1973, v. 8, № 4.
35. Whipple F. L. The origin of comets.— In: Motion, Evolution, Orbits, and Origin Comets. Dordrecht, 1972.
36. Wood J. A. Physics and chemistry of meteorites.— In: The solar system, v. IV. The Moon, meteorites and comets. Univ. Chicago Press, 1963, p. 337—401.

В. К. ЖУРАВЛЕВ, Д. В. ДЕМИН

К ВОПРОСУ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

Несмотря на большие успехи, достигнутые в последние годы в исследовании аэродинамических, оптических и магнитных эффектов Тунгусской катастрофы, а также вызванных ею последствий в биоцере, вопрос о химическом составе вещества метеорита до сих пор не решен. В данной статье мы рассмотрим результаты спектрального анализа проб почвы, отобранных экспедицией ТГУ и Комиссией по метеоритам и космической пыли СО АН СССР в 1966 г. в СЗ секторе района Тунгусской катастрофы.

Целью работ экспедиции был поиск распыленного вещества Тунгусского метеорита на конечном участке проекции траектории, над которым происходило его разрушение. Был применен метод металлометрической съемки, несколько модифицированный применительно к задаче поисков космохимической аномалии. Подробное описание методики отбора проб, их спектрального анализа, машинной обработки данных приведено в [7]. Краткое изложение результатов дано в [8], сейчас же целесообразно рассмотреть эти результаты более подробно, с учетом некоторых новых данных по исследованию космической пыли.

Полуколичественный спектральный анализ 1280 проб почвы из района площадью 6×12 км к СЗ от эпицентра показал наличие 30 химических элементов из 50, на которые проводился анализ. Ни один из обнаруженных элементов не образует ярко выраженной аномалии по содержанию в почве. Такой результат может говорить как об отсутствии предполагаемой косми-

ческой аномалии, так и о том, что естественные процессы вымывания и рассеяния выпавшего вещества, действовавшие 58 лет, уничтожили или сгладили аномалию.

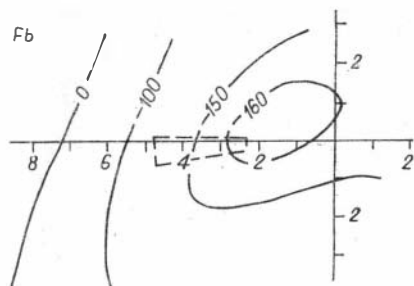
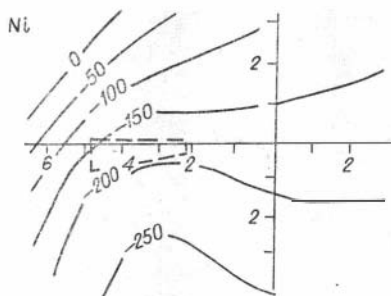
В связи с этим нами была сделана попытка выявить космохимическую аномалию путем математической обработки результатов с помощью алгоритма, предложенного в [5]. Выделение аномалии на фоне «естественного шума» опиралось на гипотезу, что выпадение вещества в зоне разрушения космического тела происходило таким образом, что пространственная структура аномалии отражала структуру действовавших аэродинамических сил. Это допущение представлялось вполне правдоподобным, так как ряд других следов катастрофы (вывал, ожог, термолюминесценция, биологические аномалии) образует структуры с осевой или центральной симметрией, несомненно, связанные с геометрией взрыва.

Таким образом, в качестве критерия космогенности того или иного химического элемента мы приняли наличие определенной территориальной структуры содержания этого элемента и степень ее подобия или соответствия структурам зоны разрушения. Разумеется, в таких случаях нельзя полностью исключить возможность случайного совпадения.

Территориальное распределение обнаруженных в пробах химических элементов за вычетом случайного фона было получено по методу линейной корреляционной интерполяции на ЭЦВМ М-220. На составленных на этой основе схемах проведены изолинии, соединяющие точки одинаковых значений коэффициента корреляции, отражающих содержание элемента в данной точке. Начало координат на картах совпадает с особой точкой вывала леса, которую мы для краткости будем называть эпицентром. В проведенном расчете отрицательные значения коэффициентов корреляции соответствовали обогащению территории элементом, положительные — обеднению по сравнению с условным нулевым уровнем. Мерой концентрированности химического элемента являлось значение экстремума поля корреляции.

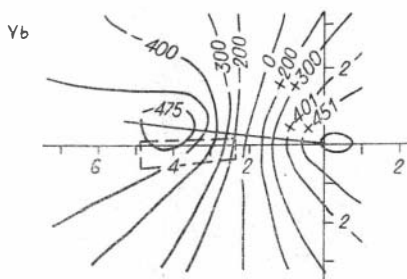
На рисунке показана схема изокоррелят исследованного района для Ni. Из нее видно, что на обследованной территории содержание Ni повышается с СЗ на ЮВ; начинающийся формироваться экстремум по максимуму концентрации расположен за пределами полигона. Сходные структуры образуют Fe, Co, Cr. Этот факт отражает, по-видимому, естественные геохимические корреляции. Никакой связи с направлением траекторий или эпицентром для этих элементов не наблюдается.

Наиболее отчетливо связь обнаружена для Yb, La и Pb (см. рисунок). Yb и La имеют структуры с осесимметричным распределением относительно направления траектории. Pb концентрируется в области, охватывающей эпицентр и район выпадения вещества, рассчитанный в качестве прогноза Д. Ф. Анфи-



Распределение Ni, Yb, Pb в зоне траектории.

Штрихом обозначен район Д. Ф. Анфиногенова [2]. Горизонтальная ось совпадает с Траекторной просекой. Цифры на осях координат — расстояние в километрах от эпицентра. Цифры на изолиниях — значения коэффициента корреляции.



ногеновым [2]. С этим районом совпадает максимум морфологических аномалий сосны (см. статью Н. В. Васильева и др. в настоящем сборнике).

Рассмотрим подробно нетривиальные особенности структуры (см. рисунок). Минимум концентрации Yb с точностью до 0,2 км совпадает с эпицентром взрыва. Максимум концентрации, образуя локальное пятно с поперечником около 1 км, имеет очень крутой ЮВ «склон» (со стороны эпицентра) и вытянутый в виде «шлейфа» СЗ «склон». Пятно максимальной концентрации пересекает район Д. Ф. Анфиногенова. Еще одна особенность структуры — прямая, соединяющая экстремумы, является одновременно осью симметрии всей структуры изокоррелят этого элемента. Эта прямая имеет азимут 296° СЗ, совпадая с осью симметрии кривизны изоклин повала деревьев (азимут $295 \pm 2^\circ$), отождествляемой с проекцией траектории [6, 12].

Распределение La образует более сложную структуру, у которой, однако, также имеется характерное осесимметрическое строение. Азимут оси симметрии совпадает с направлением траектории с точностью не хуже $\pm 4^\circ$. Анализ на другие редкоземельные элементы не проводился.

Особая структура территориального распределения Yb и La, обнаруженная путем машинной обработки проб, взятых по густой сетке в локальном районе на конце траектории в 1966 г., хорошо согласуется со схемой распределения редкоземельных элементов по данным спектрального анализа проб, отобранных нашей экспедицией 1960 г., хотя система отбора проб была иной. Анализ проб почв, взятых в 1960 г. на всей тер-

ритории вывала по радиальным направлениям от эпицентра, привел к выводу, что La, Ce, Yb на указанной территории встречаются, как правило, только вокруг эпицентра и по северо-западному радиусу [9].

Из других химических элементов, анализировавшихся в 1966 г., обращают на себя внимание также Mn и Ag. Они имеют структуры с локальным максимумом в створе траектории приблизительно в 10 км от эпицентра.

Таким образом, из 30 обнаруженных элементов только Yb, La, Pb и с меньшей уверенностью Ag и Mn могут быть отнесены к числу возможных компонент распылившегося космического тела, — на основании принятого критерия космогенности.

Объединение элементов, столь различных как по химическим, так и геохимическим свойствам, содержащихся в известном космическом веществе лишь в виде ничтожных примесей, представлялось ничем не обоснованным, поэтому в работе [7] мы сделали вывод, что указанные аномалии, скорее всего, не связаны с Тунгусским метеоритом. В противном случае химический состав Тунгусского метеорита должен отличаться от состава всех известных космических тел.

Данные ракетных исследований околоземного пространства [13] заставляют вернуться к рассмотрению результатов экспедиции 1966 г. На мадридской сессии КОСПАР были доложены результаты рентгеноспектральных исследований частиц, собранных ловушками типа «Пандора» в американо-шведском эксперименте по зондированию мезосферных облаков в Кируне (Швеция) и в штате Нью-Мексико в 1970 и 1971 гг. [13].

Сделан вывод, что микронные частицы, присутствующие в мезосферных облаках, содержат необычно большое количество тяжелых элементов, нетипичных для космической пыли, осадков ядерных испытаний и других аэрозолей. Кроме Si, Fe, Co, Cr, Ca, в уловленных частицах, по-видимому, в сравнимых количествах присутствуют элементы с высоким атомным номером (Hf, W, Pb и др.), в том числе многие редкоземельные элементы, например, La, Ce, Pr, Gd, Yb. К таким частицам отнесена примерно половина частиц, захваченных ловушками над территорией Швеции в 1970 г. и над территорией США в 1971 г. при прохождении ракет через наблюдаемые мезосферные облака.

Авторы [13] считают, что ядрами конденсации серебристых облаков является космическая пыль неизвестного состава. Однако гипотеза Хеменвея с соавторами о солнечном происхождении этой пыли представляется нам спорной. По нашему мнению, полученные при ракетном зондировании результаты можно согласовать с более традиционными представлениями об образовании мезосферных облаков на продуктах дезинтеграции кометных ядер [3]. Это предположение хорошо согласуется и с современными представлениями о дифференциации элементов в протопланетном облаке [10, 11].

В свете этих результатов вышеприведенные данные спектрального анализа почв из района разрушения Тунгусского метеорита не представляются странными. Действительно, ожидаемую территориальную структуру образовали именно тяжелые элементы: La, Yb, Pb, Ag. (Следует иметь в виду, что чувствительность анализа для большинства других тяжелых элементов в изложенной нами работе была недостаточной, а многие элементы, обнаруженные в пробах пыли из мезосферных облаков, в пробах почв из района Тунгусского падения не анализировались.)

Мощное развитие мезосферных облаков в ночь после падения Тунгусского метеорита, подробно проанализированное в монографии [4], является примечательным, если сопоставить данные о составе частиц из мезосферных облаков и особенностях распределения химических элементов на территории, над которой происходило разрушение космического тела в 1908 г.

Возможно, что изложенные данные подтверждают мнение, высказанное Х. Альвеном [1], о том, что ракетные исследования малых тел Солнечной системы с точки зрения космохимии и ядерной физики представляют большую ценность, чем исследование планет, поскольку они дают более прямую информацию об эпохе нуклеосинтеза. С этой точки зрения зондирование комет и мезосферных облаков с помощью космических аппаратов представляется чрезвычайно актуальным. В то же время можно полагать, что исследование материальных остатков ядра по крайней мере одной кометы может быть осуществлено без применения космической техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альвен Х. Физика плазмы, космические исследования и происхождение солнечной системы.— «Успехи физ. наук», 1971, вып. 4, т. 104, с. 529—537.
2. Анфиногенов Д. Ф. О тунгусском метеоритном дожде.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 20—22.
3. Бронштэн В. А., Гришин Н. И. Серебристые облака. М., «Наука», 1970, с. 204—291.
4. Васильев Н. В., Журавлев В. К. и др. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М., «Наука», 1965, 111 с.
5. Демин Д. В. Алгоритм статистической оценки параметров Тунгусского падения по данным наземных наблюдений.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 235—237.
6. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 года. Минск, «Наука и техника», 1969, 202 с.
7. Журавлев В. К., Демин Д. В. и др. Результаты шлихового опробования и спектрального анализа почв из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Успехи метеоритики. Изд-во Томского ун-та, 1975, с. 112—129.
8. Ильина Л. П., Сливина Л. М. и др. Результаты спектрального ана-

лиза проб почвы из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1971, с. 25—27.

9. Ковалевский А. Ф., Резников Н. В. и др. Некоторые данные о распределении химических элементов в почвах и растениях в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Изд-во Томского ун-та, 1963, с. 125—138.
10. Лаврухина А. К. О дифференциации элементов в протопланетном облаке.— «Метеоритика», 1973, вып. 32, с. 7—24.
11. Соботович Э. В. Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974, с. 26—41.
12. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала леса.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита, вып. 2. Изд-во Томского ун-та, 1967, с. 40—104.
13. COSPAR Space Research XIII. Berlin, Akademie Verlag, 1973, p. 1099—1125.

**С. В. КОРЖИНСКАЯ, А. Ф. КОВАЛЕВСКИЙ, Н. В. ВАСИЛЬЕВ,
А. К. МАРКОВА**

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ЧАСТОТОЙ ПОЯВЛЕНИЯ МЕЗОСФЕРНЫХ ОБЛАКОВ, ЭМИССИЯМИ НОЧНОГО НЕБА OH И NaD И ВТОРИЧНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Для сопоставления интенсивности вторичного космического излучения и появления мезосферных (серебристых) облаков нами использованы материалы, характеризующие активность мезонной и нейтронной компонент космического излучения за эпоху 1964, 1966 и 1968 гг. по 21 станции, расположенной в различных районах земного шара. Ряды наблюдений составлены из среднесуточных значений интенсивности, исправленных с учетом барометрического давления. Большая часть рядов наблюдений не имеет пропусков. Отсутствующие наблюдения (от 1 до 3 дней) заменены интерполированными значениями интенсивности.

В качестве исходного наблюдательного материала была взята частота появления мезосферных облаков по мировым данным из каталога [13]. Как это принято в большинстве работ по мезосферным облакам, критерием служило число станций, отметивших их образование в данную ночь.

На основе исходного наблюдательного материала построены графики временной зависимости интенсивности вторичного космического излучения и частоты появления мезосферных облаков (рис. 1). Путем расчета средних скользящих десятидневных значений интенсивности излучения и частоты возникновения облаков выявлены и графически представлены долгопериодические вариации в активности того и другого. Значения точек для кривых долгопериодических вариаций определялись как

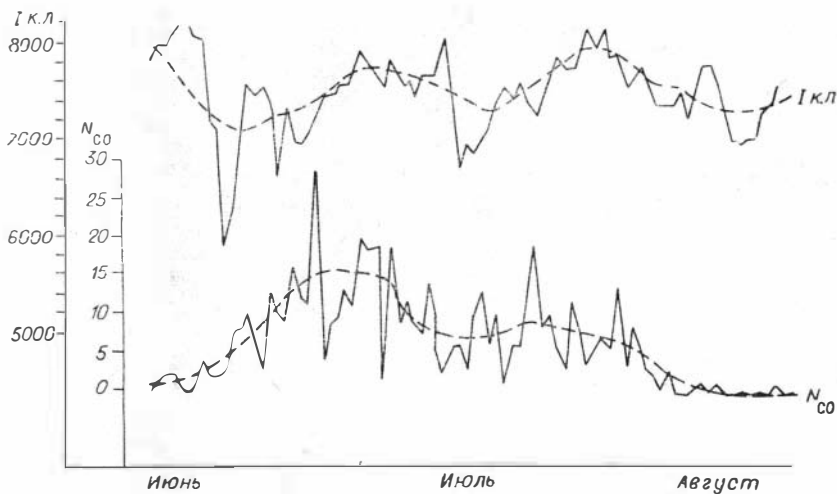


Рис. 1. Временная зависимость частоты появления мезосферных облаков и интенсивности вторичного космического излучения для станции Алерт (Франция), лето 1968 г.

средние значения интенсивности за десятидневку, отнесенные к середине периода. Таким образом, значения кривой для каждой даты определялись путем суммирования интенсивности излучения в эту дату и в четыре предыдущие и пять последующих дат, а также определения среднего из суммы. Просчитаны кросс-корреляционные функции для рядов с учетом и без учета долгопериодических вариаций. Учет вышеуказанных вариаций произведен путем преобразования первоначальных рядов наблюдений. Новые ряды были составлены из отклонений значений интенсивности и частоты от средних скользящих десятидневных значений.

Расчет кросс-корреляционных функций (рис. 2) проведен на ЭВМ по формуле

$$\rho[k] = \frac{1}{n - (i - k)} \cdot \frac{\sum \{ \alpha[l] - \alpha_{\text{ср}} \} \{ \beta[l + (i - k)] - \beta_{\text{ср}} \}}{\sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\beta}},$$

где α — интенсивность вторичного космического излучения; β — частота появления мезосферных облаков; n — размер массива; k — величина сдвига (в днях) частоты появления облаков по отношению к интенсивности космического излучения; σ_{α} и σ_{β} — среднеквадратические отклонения для рядов α и β ; l — порядковый номер члена ряда.

Необходимость проведения кросс-корреляционного анализа вызвана тем, что появления мезосферных облаков и изменение интенсивности космического излучения, как любые другие,

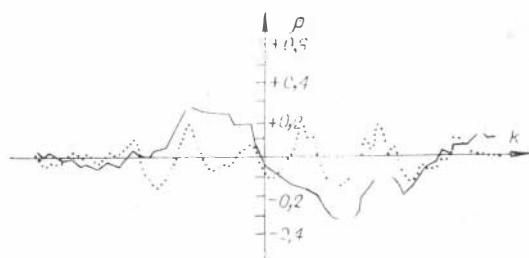


Рис. 2. Кросскорреляционная функция частоты появления мезосферных облаков и интенсивности вторичного космического излучения для ст. Алерт, лето 1968 г. Функция ρ с учетом (.....) и без учета (—) долгопериодических вариаций.

даже связанные между собой геофизические явления, могут быть разнесены во времени.

Визуальный анализ графиков временной зависимости интенсивности вторичного космического излучения и частоты появления мезосферных облаков (см. рис. 1) не выявил какого-либо отчетливого сходства тонкой структуры этих явлений. На рис. 1 представлены типичные графики временной зависимости явлений.

Анализ средних скользящих десятидневных кривых выявил отчетливые долгопериодические вариации в интенсивности вторичного космического излучения, укладывающиеся в 27-дневный цикл. Это явление в физике космических лучей довольно хорошо связано с вращением Солнца вокруг оси [8]. Отмечены также долгопериодические вариации в частоте появлений мезосферных облаков, в частности, июньско-июльский максимум. Сдвиг максимумов и минимумов долгопериодических вариаций в непретворенных рядах относительно друг друга при просчете кросскорреляционных функций придал последним синусоидальный вид с переходом от достоверной положительной к достоверной отрицательной корреляции и наоборот (см. рис. 2). Вполне естественно, что в разные годы долгопериодические составляющие рассматриваемых явлений могут находиться в различных фазах. Это и привело к различному взаимоположению плюс- и минус-ветвей кросскорреляционных функций относительно оси сдвига для наблюдений разных лет.

Таким образом, характер связи ежедневных изменений интенсивности космического излучения и частоты появления мезосферных облаков маскируется наличием долгопериодических вариаций в этих явлениях. Поэтому кросскорреляционные функции были просчитаны в дальнейшем с учетом этих вариаций. Результат расчета представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что значения кросскорреляционных функций для преобразованных рядов колеблются около нуля и ни при одном значении k не достигают сколько-нибудь заметного экстремума.

Изложенные результаты справедливы и для нейтронной, и для мезонной компонент космического излучения.

Анализ временных зависимостей между интенсивностью атмосферных эмиссий ночного неба $\text{OH}_\lambda = 6700 \text{ \AA}$ и $\text{NaD}_\lambda = 5900 \text{ \AA}$ и частотой появления мезосферных облаков выявил положительную их корреляцию в 1964 г.; то же — между частотой появления облаков и интенсивностью $\text{OH}_\lambda = 6700 \text{ \AA}$ -эмиссии, а также отсутствие однозначной зависимости с $\text{NaD}_\lambda = 5900 \text{ \AA}$ -эмиссии в 1966 г.; отсутствие однозначной зависимости интенсивности обеих эмиссий с частотой появления облаков в 1967 г.

Отклонения частоты появления мезосферных облаков от нормы (независимо от знака), как правило, сопровождаются отклонениями от нормы в значениях интенсивности эмиссий (тоже) независимо от знака. Отклонения интенсивностей эмиссий от нормы, не сопровождающиеся отклонениями от нормы частоты появления мезосферных облаков, наблюдаются обычно в начале и в конце лета, во время перестройки в мезосфере с зимней циркуляцией на летнюю и наоборот.

Корреляционной связи между интенсивностью вторичного космического излучения и частотой образования мезосферных облаков не выявлено. Это позволяет отвергнуть предположение о космическом излучении как дополнительном источнике внеземного водорода при образовании мезосферных облаков.

Окончательное выяснение вопроса о характере, степени и механизме связи атмосферных эмиссий с мезосферными облаками будет возможным лишь при получении материалов одно-временных регулярных наблюдений эмиссий ночного неба и патрулирования сумеречного неба в поясе наиболее частого появления мезосферных облаков.

В настоящее время наиболее вероятной гипотезой образования мезосферных облаков представляется метеорно-конденсационная. В соответствии с нею основной материал ядер конденсации поставляется метеорами. Неясным, однако, остается вопрос о природе молекул воды на высотах 80—85 км; проникновение туда достаточного их количества из нижних слоев атмосферы представляется сомнительным [11]. Еще в 1933 г. Вегардом была высказана идея об ответственности солнечного водорода за образование молекул воды мезосферных облаков, поддержанная впоследствии И. А. Хвостиковым [4].

К настоящему времени эта идея получила дальнейшее развитие. Сейчас можно считать установленным общий ход процесса, в соответствии с которым атомарный кислород, возникающий в ходе фотодиссоциации на высотах, близких к уровню появления мезосферных облаков, в соединении с атомарным водородом солнечного происхождения образует возбужденный OH^- . Из последних, в свою очередь, могут образовываться молекулы воды.

В молекулы воды могут превращаться также некоторые другие соединения водорода с кислородом: H_2O_2 , HO_2 , H_3O_2 и т. п. Все они неустойчивы в условиях земной поверхности, однако при некоторых температурах и давлениях могут существовать длительное время. Так, H_3O_2 обнаружен в облаках ионосферы на высоте около 100 км [7]. Гидроксил может образовываться также в результате фотодиссоциации водяного пара. Но каким бы путем ни образовывался гидроксил, его наличие, устанавливаемое по соответствующей эмиссии в свечении атмосферы, указывает на присутствие водяного пара в зоне появления мезосферных облаков.

Исходя из локализации и гипотезы о происхождении мезосферных облаков, неоднократно предпринимались попытки обнаружения связи между ними и гео- и космофизическими явлениями. Если солнечный ветер поставляет водород для образования гидроксила и молекул воды, то естественно искать связь частоты появления облаков с солнечной активностью. В этом направлении было выполнено несколько работ, которые не позволяют пока прийти к окончательному заключению [1, 5]. Было также несколько попыток установить связь между частотой появления, высотой и электронной концентрацией спорадического слоя F_s , с одной стороны, и частотой появления и интенсивностью мезосферных облаков — с другой [1, 3, 6, 12]. Полученные данные также выявляют сложную картину, не поддающуюся однозначной интерпретации.

Предполагая солнечное происхождение воды (точнее — водорода) мезосферных облаков, логично искать связь характеристик облаков с магнитной активностью. Из сопоставления Ч. И. Виллмана как будто следует, что облака предпочтительно появляются в дни с повышенной магнитной активностью ($K' — индекс \geq 5$) [1].

Статистически установлен факт одновременного появления полярных сияний и мезосферных облаков [1, 10]. Одним из источников может служить космическое излучение, частицы которого обладают высокой проникающей способностью не только в высоких, но и, в отличие от H^+ солнечного ветра, также в средних и низких широтах. H^+ космических лучей могут переходить в нейтральные атомы водорода и вступают в соединения с атомарным кислородом. Космические лучи могут создавать в верхней атмосфере и другие эффекты, влияющие на условия образования мезосферных облаков (например, увеличение числа ионов, могущих служить ядрами конденсации, разогрев мезопаузы и др.) [8]. Поскольку с точки зрения метеорно-конденсационной гипотезы необходимым условием образования мезосферных облаков является наличие достаточного количества ядер конденсации, то представляется естественным описанием Боуэном совпадение дат появления мезосферных облаков с датами метеорных потоков [1]. Напомним также, что образовавшие

ем ярких мезосферных облаков на огромной площади проявила себя Тунгусская катастрофа 1908 г. [2]. Это можно объяснить тем, что начиная с 20-х чисел июня 1908 г., Земля проходила через облако космической пыли (возможно, связанное с кометой). Наиболее мелкодисперсная составляющая этого облака на высотах 80—85 км и послужила ядрами конденсации для мощного развития мезосферных облаков.

С точки зрения метеорно-конденсационной гипотезы интересным представляется поиск связи мезосферных облаков с атмосферными эмиссиями ночного неба $\text{OH}_\lambda = 6700 \text{ \AA}$ и $\text{NaD}_\lambda = 5900 \text{ \AA}$. Основное излучение этих эмиссий возникает на высотах 70—100 км — там же, где отмечаются мезосферные облака.

Интенсивность линии Na могла бы указать на количество ядер конденсации, если предположить метеорное его происхождение. Интенсивность же гидроксильной линии может быть связана с количеством гидроксила и молекул воды. К сожалению, связь между интенсивностью излучения и количеством излучающего вещества довольно сложна. Возникновение упомянутых эмиссий может происходить в результате нескольких фотохимических реакций, каждая из которых имеет свою скорость. Поэтому возбуждение эмиссии различными механизмами может дать при одной и той же концентрации излучающего вещества различные соотношения интенсивности. Это обстоятельство позволяет нам лишь в какой-то степени судить о количестве Na и OH по значениям интенсивностей соответствующих эмиссий.

Для проблемы мезосферных облаков атмосферные эмиссии интересны еще и тем, что на высотах 70—95 км они могут вносить дополнительный охлаждающий эффект: часть поглощаемой солнечной энергии может быть потеряна для нагревания из-за высвечивания возбужденных состояний атомов и молекул, получаемых при фотодиссоциации. Г. М. Шведт считает [15], что по сравнению с другими эмиссиями именно свечение OH является существенным фактором охлаждения атмосферы вблизи мезопаузы.

Подобного рода сопоставление уже предпринималось. Так, Н. Н. Шефов в результате единичных наблюдений за эмиссиями ночного неба и одновременно за появлением мезосферных облаков в Звенигороде пришел к заключению о прямой зависимости между возникновением облаков, с одной стороны, и эмиссиями ночного неба в области OH, NaD и кислородной линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ — с другой [16, 17]. В эти периоды им были обнаружены характерные вариации гидроксильного излучения. Оказалось, что в ночи с облаками интенсивность излучения увеличивалась, а после их исчезновения уменьшалась до значений

Соотношение «пиков» по мезосферным облакам и эмиссии ночного неба

«№ пи-ков» по СО	Знак «пика» по СО	Знак «пика» по ОН	Время наблюдения «пиков» по ОН	Знак «пика» по NaD	Время наблюдения «пиков» по NaD
1	2	3	4	5	6

Наблюдения 1964 г.

1	+	+	Та же ночь	+	Та же ночь
2	+	+	» »	+	Последующая ночь
3	+	0	Та же и соседние ночи	+	» »
4	+	+	Предшествующая ночь	+	Предшествующая ночь
5	+	0	Та же и соседние ночи	+	Та же ночь
6	+	-	Предшествующая ночь	+	» »
7	+	+	» »	+	Предшествующая ночь
8	+	+	Последующая ночь	+	Последующая ночь
9	-	0	Та же и соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
10	-	+	Последующая ночь	+	Предшествующая ночь
11	-	-	Две соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
12	-	0	Та же и соседние ночи	0	» »
13	-	0	» »	+	Предшествующая ночь

Наблюдения 1966 г.

14	+	0	Та же и соседние ночи	-	Последующая ночь
15	+	0	» » »	-	Та же ночь
16	+	0	» » »	0	Та же и соседние ночи
17	+	+	Та же ночь	0	» » »
18	-	0	Та же и соседние ночи	-	Та же ночь
19	-	0	» » »	-	Предшествующая ночь
20	-	0	» » »	+	Та же и предшествующая ночь
21	-	-	Та же ночь	-	Та же ночь
22	-	-	Предшествующая ночь	-	Предшествующая ночь
23	-	0	Та же и соседние ночи	+	» »
24	-	0	» » »	0	Та же и соседние ночи
25	-	0	» » »	0	» » »
26	-	0	» » »	-	Та же ночь
27	-	-	Та же ночь	-	Предшествующая ночь
28	-	-	» »	0	Та же и соседние ночи
29	-	-	» »	0	» » »
30	-	-	» »	0	» » »
31	-	-	Предшествующая ночь	0	» » »

1	2	3	4	5	6
<i>Наблюдения 1967 г.</i>					
32	+	+	Последующая ночь	—	Последующая ночь
33	+	+	Та же ночь	—	Та же ночь
34	+	+	» »	+	» »
35	+	0	Та же и соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
36	+	0	» » »	0	» » »
37	+	0	Та же и соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
38	+	—	Та же ночь	—	Та же ночь
39	+	—	Предшествующая ночь	—	Предшествующая ночь
40	+	0	Та же и соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
41	+	—	Предшествующая ночь	—	Предшествующая ночь
42	—	+	Последующая ночь	+	Последующая ночь
43	—	+	Предшествующая ночь	0	Та же и соседние ночи
44	—	+	Та же ночь	+	Та же ночь
45	—	+	Предшествующая ночь	+	Предшествующая ночь
46	—	0	Та же и соседние ночи	0	Та же и соседние ночи
47	—	0	» » »	0	» » »
48	—	0	» » »	0	» » »

меньше среднего уровня интенсивности. Сходный результат, но на большем наблюдательном материале получили Н. В. Васильев и Н. П. Фаст [4]. Они использовали данные о свечении ночного неба летом 1964 г. (обсерватория Мишель в Верхнем Провансе, Франция) и сведения о мезосферных облаках в Западной Европе. В результате был сделан вывод, что появление мезосферных облаков сопровождается увеличением свечения в области линий OH и NaD . Связь с эмиссией $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ выявлена не была.

Указанные работы, приведшие к обнадеживающим результатам, не дают окончательного доказательства наличия связи мезосферных облаков с эмиссией ночного неба, хотя бы в силу малой использованной статистики наблюдений. Какие-либо данные относительно сопоставления динамики мезосферных облаков и вторичного космического излучения отсутствуют. В нашем распоряжении имелись материалы наблюдений свечения ночного неба ряда советских и зарубежных станций, полученные из Международного центра сбора геофизических данных Б-2 (Москва). Однако мы смогли использовать лишь данные обсерватории Мишель за летние месяцы 1964, 1966, 1967 гг. На этой станции наблюдения эмиссий NaD и OH проводились

довольно регулярно в периоды наибольшей активности мезосферных облаков. В материалах остальных станций за летние месяцы имеются лишь очень короткие отрывочные ряды наблюдений. В качестве исходного наблюдательного материала по мезосферным облакам был взят каталог наблюдений по мировым данным [15].

На основе имеющегося материала (табл. 1) были проанализированы временные зависимости числа появлений мезосферных облаков и интенсивности эмиссий OH и NaD , сопоставлялись отклонения от нормы сравниваемых величин. За норму интенсивности эмиссии было принято среднее значение ее из ряда летних наблюдений \pm среднеквадратичное отклонение σ_x , за норму частоты появления мезосферных облаков — десятидневное значение \pm среднеквадратичное отклонение σ_y . Использование средних скользящих десятидневных значений вызвано необходимостью исключения крупнопериодической вариации, связанной с циркуляционными условиями в мезосфере. Выяснилась довольно сложная картина связи этих явлений.

В 1964 г. во время патрулирования сумеречного и ночного неба выявилось 8 ночей с числом наблюдений облаков выше нормы, причем в пяти случаях по наблюдениям эмиссии OH интенсивность была выше нормы в ту же или в соседнюю ночь. По наблюдениям эмиссии NaD из восьми упомянутых случаев установлено 7 ночей с интенсивностью эмиссии выше нормы в ту же или соседнюю ночи и одна — в пределах нормы в ту же ночь и ниже — в следующую (см. табл. 1, пункт 2). С частотой появления мезосферных облаков ниже нормы отмечено 5 ночей, 4 из них сопровождались интенсивностью эмиссии OH ниже нормы или в ее пределах и 1 — в пределах нормы в ту же ночь и выше — в соседнюю (см. табл. 1, пункт 10). Интенсивность эмиссии NaD в эти ночи была в пределах нормы и выше — в предшествующие ночи.

Вообще, из 22 наблюдавшихся в 1964 г. отклонений от нормы интенсивности OH и NaD эмиссий лишь 3 (начало июня и середина августа) не сопровождались отклонениями числа наблюдений мезосферных облаков от нормы (в таблицу эти случаи не внесены). Таким образом, анализ временных зависимостей частоты появления мезосферных облаков и интенсивности атмосферных эмиссий OH и NaD за лето 1964 г. показал отчетливую положительную корреляцию между этими явлениями.

В 1966 г. (июнь — август) отмечено лишь 4 ночи с числом наблюдений мезосферных облаков выше нормы (см. табл. 1): по наблюдениям эмиссии OH было 3 случая значений в пределах нормы и 1 — выше, а по NaD — ниже нормы или в ее пределах. С частотой появления облаков ниже нормы установлено 14 ночей. Все они по наблюдениям эмиссии OH имели значения ниже нормы или в ее пределах. По эмиссии NaD ниже и в пределах нормы было 12 случаев, выше — 2. Из 24

отклонений от нормы интенсивности эмиссий ОН и NaD лишь 9 не сопровождалась отклонениями от нормы числа наблюдений мезосферных облаков. Все они относятся к началу июня и концу августа. Таким образом, для лета 1966 г. обнаруживается отчетливая положительная корреляция появления этих облаков лишь с интенсивностью эмиссии ОН. Для NaD-эмиссии отклонения любого знака в числе появления облаков сопровождалась низкими значениями интенсивности эмиссии.

В 1967 г. установлено 10 ночей с числом наблюдений облаков выше нормы (см. табл. 1). В 7 из них отмечена интенсивность ОН эмиссии выше нормы и в ее пределах, в 3 — ниже нормы в те же или соседние ночи. Наблюдения же эмиссии NaD в 9 из рассмотренных случаев дали значения ниже нормы или в ее пределах и лишь в одном — выше. 7 ночей с числом наблюдений облаков ниже нормы сопровождалась или нормой интенсивности обеих эмиссий, или положительными отклонениями от нее. Всего летом 1967 г. наблюдалось 28 случаев отклонения интенсивностей эмиссий от нормы, причем 16 из них не сопровождалась колебаниями числа наблюдений мезосферных облаков. Эти случаи, как и в 1964 и 1966 гг., относятся к началу июня и к августу. Таким образом, наблюдения 1967 г. не выявили сколько-нибудь отчетливой зависимости между рассматриваемыми явлениями. Хорошо прослеживается лишь тенденция к почти синхронным отклонениям от нормы частоты появления мезосферных облаков и интенсивности эмиссий ОН и NaD, независимо от знака.

Подобный же анализ с использованием наблюдений облаков и эмиссий лишь в Западной Европе не изменил полученную картину. Нами были построены также корреляционные графики рядов наблюдений мезосферных облаков и интенсивностей эмиссий ОН и NaD. Однако это не дало определенных результатов, вероятно, по причине слабой корреляции между явлениями.

Были получены коэффициенты корреляции для сдвига 0 и ± 1 сутки (табл. 2), причем расчеты проведены отдельно для рядов частоты появления облаков по наблюдениям в Западной Европе и по мировым данным. Коэффициенты корреляции вычислялись по формуле [6]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{(n-1) \sigma_x \sigma_y},$$

где x — интенсивность эмиссии, y — частота появления мезосферных облаков, σ_x и σ_y — соответствующие дисперсии, n — размер массива. Была также определена достоверность вычисленных коэффициентов. Однако их расчет не подтвердил выводов анализа временной зависимости, а некоторые даже противоречат им. Например, по наблюдениям эмиссии ОН летом 1967 г.

Коэффициенты корреляции между частотой появления мезосферных облаков и интенсивностью эмиссии OH 6700 Å и NaD 5900 Å

Характеристика сдвига	Эмиссия	1964 г.		1966 г.		1967 г.			
		По мировым данным		По Зап. Европе		По мировым данным		По Зап. Европе	
		По мировым данным	По Зап. Европе	По мировым данным	По Зап. Европе	По мировым данным	По Зап. Европе		
Сдвиг в наблюдаемых по СО на 1 день вперед	OH	+0,136	+0,257	+0,185	-0,043	+0,330	+0,177		
	NaD	+0,09	+0,177	+0,110	-0,015	+0,058	+0,189		
	OH	+0,011	+0,147	+0,056	+0,194	+0,205	+0,251		
	NaD	-0,083	+0,228	-0,290	-0,035	+0,002	+0,095		
Сдвиг в наблюдаемых по СО на 1 день назад	OH	+0,016	+0,156	+0,102	+0,020	+0,133	+0,401		
	NaD	+0,282	+0,119	+0,033	+0,197	+0,057	+0,189		

получены коэффициенты корреляции $r = +0,401$ и $+0,330$, анализ же временной зависимости для этого года не дал никакой определенной зависимости.

Имеющиеся у нас ряды наблюдений как по свечению ночного неба, так и по мезосферным облакам имеют ряд недостатков, которые могли существенно исказить результаты вычисления коэффициентов корреляции. Действительно, они очень короткие, причем составлены в свою очередь из еще более коротких рядов по 10—15 дней в каждый из летних месяцев. Кроме того, пропуски наблюдений эмиссии 1—2 ночей заменялись интерполированными значениями, которые могут существенно отличаться от истинных. Наконец, не учитывалась нестационарность процессов, т. е. не были исключены крупнопериодические вариации, которые, например, в рядах наблюдений атмосферных эмиссий выделить невозможно из-за отсутствия регулярных наблюдений.

Отрицательной чертой проведенных сопоставлений является то, что мы вынуждены сравнивать частоту появления мезосферных облаков с интенсивностью эмиссий по наблюдениям станции, где никогда или почти никогда не наблюдались облака. Интенсивность же атмосферных ночных эмиссий испытывает значительные широтные и долготные вариации. Тем не менее, как видно из представленных материалов, между рядами наблюдений мезосферных облаков и эмиссий ночного неба прослеживается реальная связь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Броштан В. А., Гришин Н. П. Серебристые облака. М., «Наука», 1970, 359 с.
2. Васильев Н. В., Журавлев В. К. и др. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М., «Наука», 1965, 111 с.
3. Васильев Н. В., Журавлев В. К. и др. О связи серебристых облаков с некоторыми параметрами ионосферы.— В кн.: Докл. III Сибирской конфер. по математике и механике. Изд-во Томского ун-та, 1964, с. 302—303.
4. Васильев Н. В., Фаст Н. П. О связи появления мезосферных облаков со свечением ночного неба.— В кн.: Астрономия и геодезия. Изд-во Томского ун-та, 1970, вып. 1, с. 91—93.
5. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Корреляционные связи мезосферных облаков с некоторыми космофизическими явлениями.— В кн.: Астрономия и геодезия. Изд-во Томского ун-та, 1973, вып. 2, с. 64—72.
6. Гришин Н. И. Исследования мезосферных облаков.— «Вест. АН СССР», 1970, № 9, с. 23—32.
7. Деригольц В. Ф. Вода во Вселенной. М., «Недра», 1971, 220 с.
8. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса. М., Изд-во АН СССР, 1963, 1027 с.
9. Лакин Г. Ф. Биометрия. М., «Высшая школа», 1968, 287 с.
10. Мартынкевич Г. М. О природе мезосферных облаков.— «Метеорология и гидрология», 1971, № 12, с. 44—52.
11. Мегрелишвили Т. Г., Хвостиков И. А. Атомарный водород, кислород и молекулы H_2O в высоких слоях атмосферы и некоторые проблемы геофизики и физики околоземного пространства.— В кн.: Физика мезосферных (серебристых) облаков. Рига, «Зинатне», 1970, с. 9—22.
12. Фаст Н. П. К изучению метеорологических и ионосферных условий появления серебристых облаков в Сибири.— В кн.: Метеорологические исследования. Серебристые облака. М., «Наука», 1966, № 12, с. 106—110.
13. Фаст Н. П. Каталог наблюдений серебристых облаков по мировым данным. Изд-во Томского ун-та, 1972, 194 с.
14. Хвостиков И. А. Свечение ночного неба. М., Изд-во АН СССР, 1948, 496 с.
15. Шведт Г. М. О роли свечения неба в охлаждении атмосферы вблизи мезопаузы.— «Геомагнетизм и аэрономия», 1972, № 3, 564—565.
16. Шефов Н. Н. Эмиссия верхней атмосферы и серебристые облака.— В кн.: Полярные сияния и свечение ночного неба. М., 1965, № 11, 48—51.
17. Шефов Н. Н. Поведение эмиссии верхней атмосферы в период метеорной активности.— В кн.: Полярные сияния и свечение ночного неба. М., Изд-во АН СССР, 1967, с. 187—188.

СОДЕРЖАНИЕ

Н. В. Васильев, А. Ф. Ковалевский. О путях дальнейшего изучения проблемы Тунгусского метеорита	3
А. П. Бояркина, Н. В. Васильев, Т. А. Меняцева, Т. Н. Резинкина, А. М. Тюлин, О. П. Федорова. К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва	8
М. А. Левченко, А. А. Терентьева. Предварительные результаты спектрального определения примесей в пробах торфа района взрыва Тунгусского метеорита	16
К. А. Алексеева, А. В. Смирнова, Н. В. Васильев, С. А. Разин, Т. И. Сарычева, Л. Б. Темиршаева, В. Э. Шнитке. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита	19
И. П. Пасечник. Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим микробарографическим данным	24
В. П. Коробейников, П. И. Чушкин, Л. В. Шуршалов. О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита	54
С. А. Разин. Оценка координат источника ожоговых повреждений по распределению интенсивности поражающего воздействия в районе падения Тунгусского метеорита	66
Н. В. Васильев, В. К. Журавлев, Д. В. Демин, А. Д. Аммосов, А. И. Батищева. О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита	71
Е. М. Колесников, А. Ю. Люль, Г. М. Иванова. Нейтроноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита	87
В. К. Журавлев, Д. В. Демин. К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита	99
С. В. Коржинская, А. Ф. Ковалевский, Н. В. Васильев, А. К. Маркова. Исследование связи между частотой появления мезосферных облаков, эмиссиями ночного неба OH и NaD и вторичным космическим излучением	104

О путях дальнейшего изучения проблемы Тунгусского метеорита. **Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф.** Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 3—7.

Главными чертами катастрофы 1908 г., определяющими выбор дальнейших путей исследования, являются надземный характер взрыва, отсутствие заметного количества вещества и комплекс световых атмосферных аномалий. В дальнейшем необходимо провести математическое или физическое моделирование, которое позволит объяснить взрыв или взрывоподобное дробление в атмосфере крупного тела; разработку методик поиска и анализа вещества, предположительно относящегося к Тунгусскому метеориту; интерпретацию геофизических эффектов Тунгусского взрыва, в частности свечения ночного неба.

Библ. 11.

УДК 523.161 (571.512)

К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва. **Бояркин А. П., Васильев Н. В., Меняева Т. А., Резинкина Т. Н., Тюлин А. М., Федорова О. П.** Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 8—15.

Приводятся результаты статистической обработки концентрации сферических микрочастиц размером 7—100 мкм и более в различных слоях торфяной залежи района падения Тунгусского метеорита. С помощью метода корреляционной интерполяции в окрестности эпицентра взрыва и в северном направлении от него установлено наличие локальных структур, свидетельствующих об обогащении слоев, сопоставимых к событию 1908 г., опавленным мелкодисперсным материалом, морфологически сходным с метеорной пылью. Часть массы вещества Тунгусского метеорита, осевшего в окрестности эпицентра взрыва, можно оценить в 3,5 т.

Ил. 1, табл. 3, библ. 10.

УДК 523.161 : 551.312.2(571.512)

Предварительные результаты спектрального определения примесей в пробах торфа района взрыва Тунгусского метеорита. **Левченко М. А., Терентьева А. А.** Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 16—19.

Апробирована методика спектрального определения примесей Mn, Fe, Pb, Cr в пробах торфа. Ее чувствительность 10^{-3} — $10^{-4}\%$. Послойный анализ семи колонок торфа позволил наблюдать распределение этих элементов по годам.

Ил. 1.

УДК 523.161 : 551.312.2(571.512)

Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. **Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В., Разин С. А., Сарычева Т. И., Темириаева Л. Б., Шнитке В. Э.** Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 19—24.

В результате изучения химического состава торфа из района падения Тунгусского метеорита показано, что в ряде точек вблизи центра района катастрофы в торфе, отвечающем времени падения метеорита, имеет место превышение над фоном содержания Ni, Pb, Yb, Ag, Ti и некоторых других элементов.

Ил. 2, библ. 5.

УДК 523.51 : 550.34 : 551.54

Оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита по сейсмическим и микробарографическим данным. **Пасечник И. П.** Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 24—54.

По известным сейсмическим и микробарографическим данным сделаны оценки параметров Тунгусского взрыва и вызванного им землетрясения. Время в очаге землетрясения равно $00\text{ ч } 14,5 \pm 0,8$ мин, его магнитуда M_s . Н составляла $4,5 \div 5,0$. По энергии воздушных волн с учетом их затухания на пути распространения тротилового эквивалент взрыва Q оценивается в 20 мтг, что несколько расходится с его значениями, определенными другими авторами по площади вывала леса в эпицентре и по интенсивности записей воздушных волн. По значениям M_s , Н и Q сделаны следующие оценки высоты взрыва h

M_s , Н=4,5 и	Q=30 мтг —	h=от 6,2 до 7,3км
4,5	50	7,3 — 9,2
5,0	30	2,5 — 4,4
5,0	50	3,3 — 5,2

Ил. 12, табл. 7, библ. 53.

УДК 523.51

О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 54—65.

Метод моделирования взрыва крупных метеоритных тел в атмосфере, основанный на расчете воздушной ударной волны, применен для определения энергетических траекторных характеристик метеоритов. Приводится математическая модель и способ расчета ударных волн, моделируемых взрывом полубесконечного цилиндрического заряда с удельной энергией, изменяющейся вдоль оси заряда по определенному закону. Проведен расчет ударной волны в атмосфере и ее отражения от поверхности Земли. Эта модель используется для решения некоторых задач, связанных с полетом и разрушением Тунгусского метеорита.

Ил. 3, табл., библи. 22.

УДК 523.503 (571.512)

Оценка координат источника ожоговых повреждений по распределению интенсивности поражающего воздействия в районе падения Тунгусского метеорита. Ракин С. А. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 66—71.

Рассматривается задача определения пространственного положения источника ожоговых повреждений ветвей лиственниц в районе падения Тунгусского метеорита. За оценку координат источника ожога принимались координаты точечного источника лучистой энергии, создающего на поверхности Земли распределение освещенности, наиболее точно соответствующее распределению интенсивности поражающего воздействия в момент Тунгусского взрыва. Произведенные расчеты не противоречат гипотезе лучистого ожога малопрозраженным источником лучистой энергии. Получена оценка высоты взрыва, которая заключена в пределах 5—6 км.

Ил. 3, библи. 7.

УДК 523.51 : 575.24(571.512)

О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Демин Д. В., Аммосов А. Г., Батищева А. И. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 71—87.

Рассматривается вопрос о некоторых биологических аномалиях в районе падения Тунгусского метеорита и о причинах, которые могли их вызвать. Отмечается наличие морфологических особенностей у поколения сосен, выросших после 1908 г. Анализируется естественный радиоактивный фон в районе эпицентра Тунгусского взрыва, термолуминесценция горных пород в этом районе и последствия световой вспышки. Указывается на некоторые особенности термолуминесценции горных пород в районе катастрофы, предположительно связанные с Тунгусским взрывом. Обсуждается природа флукуаций естественного радиоактивного фона в эпицентре катастрофы.

Ил. 7, табл. 1, библи. 20.

УДК 523.161(571.512)

Нейтронноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита. Колесников Е. М., Льюль А. Ю., Иванова Г. М. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 87—99.

Приводятся результаты нейтронноактивационного анализа силикатных шариков, выделенных из торфа района падения Тунгусского метеорита, а также промышленных стекол. По удельному весу Тунгусские шарики ближе всего к липаритовым стеклам, обсидианам, а по своему составу — к тектитовым стеклам. Исследованные шарики не могли образоваться в результате переплавления пыли, поднятой с поверхности земли в момент Тунгусского взрыва и при падении метеорита обычного состава. Полученные данные хорошо соответствуют кометной природе Тунгусского явления.

Ил. 1 табл. 2, библи. 36.

К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита. Журавлев В. К., Демин Д. В. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 99—104.

Металлометрическая съемка, проведенная в 1966 г. в районе проекции Тунгусского метеорита, не выявила явных аномалий химических элементов. Статистическая обработка результатов спектрального анализа 1280 проб почвы, проведенная с помощью специального алгоритма на ЭВМ, позволила назвать в качестве вероятных компонент космического тела Yb, La, Pb. Эти результаты сопоставляются с данными ракетного зондирования серебристых облаков в 1970—1971 гг., при которых была обнаружена космическая пыль необычного состава.

Ил. 1., библи. 13.

Исследование связи между частотой появления мезосферных облаков, эмиссиями ночного неба OH и NaD и вторичным космическим излучением. Коржинская С. В., Ковалевский А. Ф., Васильев Н. В., Маркова А. К. Космическое вещество на Земле (проблема Тунгусского метеорита). Новосибирск, «Наука», 1976, с. 104—115.

Изучение гидроксила на высотах мезосферных облаков указывает на присутствие там водяного пара, а интенсивность линий Na (в предположении метеоропного его происхождения) — на количество ядер конденсации. Была предпринята попытка исследования связи между частотой появления мезосферных облаков и эмиссиями гидроксила и Na в ночном небе по данным 1964, 1966, 1967 гг. Сделан вывод, что между рядами наблюдений мезосферных облаков и эмиссией ночного неба прослеживается реальная связь. Существует мнение, что вода мезосферных облаков может образовываться из атомарного кислорода, всегда присутствующего в верхней атмосфере, и атомов водорода солнечного и галактического происхождения. Проведенный авторами анализ не обнаружил корреляционной связи между интенсивностью вторичного космического излучения и частотой появления мезосферных облаков. Это позволяет отвергнуть предположение о космическом излучении как дополнительном источнике внеземного водорода при образовании мезосферных облаков.

Ил. 2, табл. 2, библи. 17.

КОСМИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО НА ЗЕМЛЕ
(проблема Тунгусского метеорита)

Ответственный редактор
Владимир Степанович Соболев

Редакторы *А. И. Лаурентьев, Е. Ф. Иванова*
Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*
Художник *В. И. Шумаков*
Технический редактор *Н. М. Бурлаченко*
Корректоры *Л. Л. Тычкина, А. М. Картавин*

Сдано в набор 8 декабря 1975 г. Подписано в печать 31 августа 1976 г. МН 02081.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. 7,5 печ. л., 8 уч.-изд. л. Тираж
1400 экз. Заказ № 732. Цена 80 коп.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99 Советская, 18.
4-я типография Издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.