

# Взаимодействие метеоритного вещества с Землей



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

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
МЕТЕОРИТНОГО  
ВЕЩЕСТВА  
С ЗЕМЛЕЙ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Новосибирск · 1980

УДК 523.51 : 523.53

**Взаимодействие метеоритного вещества с Землей.**—  
Новосибирск: Наука, 1980. 243 с.

Сборник объединяет работы по влиянию мелких космических объектов (метеоров, метеоритов) на Землю. Описываются наблюдения метеоров и болидов. Приводятся расчеты разрушающих параметров ударных волн крупных метеоритов. Рассматриваются вопросы химического состава и изотопных отношений в метеоритах.

Часть работ посвящена новым результатам исследований Тунгусского метеорита.

Сборник рассчитан на специалистов в области астрономии, геохимии и смежных специальностей.

Редакционная коллегия:

*А. П. Бояркина, Н. В. Васильев, Г. М. Иванова, С. А. Разин*

Ответственный редактор

д-р геол.-мин. наук проф. *Ю. А. Долгов*

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТЕОРИТНОГО ВЕЩЕСТВА С ЗЕМЛЕЙ**

Ответственный редактор *Юрий Александрович Долгов*

Утверждено к печати Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

Редактор издательства *Н. Г. Рязанова*. Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*.

Художник *Н. А. Пискун*. Технический редактор *А. В. Семкова*.

Корректоры *В. В. Борисова, О. А. Макеева*.

---

ИБ № 10668

Сдано в набор 23.08.79. Подписано к печати 29.10.80. МН-05607. Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бумага типографская № 2. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Усл. печ. л. 15.  
Уч.-изд. л. 18,5. Тираж 1000 экз. Заказ № 653. Цена 3 руб.

---

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

В 20805 — 868  
055(02) — 80 71.80.1904030000.

© Издательство «Наука», 1980.

## К ИТОГАМ РАБОТ КОМИССИИ ПО МЕТЕОРИТАМ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ СО АН СССР

Ю. А. ДОЛГОВ

Происхождение Солнечной системы изучается астрономией, астрофизикой, метеоритикой и планетологией. Многие другие науки, такие как гидродинамика, механика, физика, математика, химия, геохимия, биология и другие, вносят свой вклад в решение важнейшей проблемы естествознания — происхождение Солнечной и Галактической систем. Весь научно-технический потенциал, которым располагает человечество, вовлечен сейчас в изучение системы мироздания.

Система визуального и косвенного изучения планет и межпланетного космического вещества уступила место непосредственному изучению планет Солнечной системы (Луна, Марс, Венера).

Подлинный переворот во многих областях землеведческих наук принесли наблюдения Земли из Космоса, по результатам которых делаются сегодня многие глобальные прогнозы. Изучение других планет и спутника Земли — Луны уже требует специализированных подходов к каждому объекту. В США, например, действует Институт Луны.

Планетология превратилась в самостоятельную научную дисциплину со своими методами исследований после того, как в сферу непосредственного изучения попали Луна, Венера, Марс.

Метеоритика занимается исследованием самых древних остатков планетного вещества, попадающего на Землю. Метеоритное вещество старше самых древних пород на Земле и, надо думать, старше вещества любой из планет Солнечной системы.

Метеориты имеют различный состав, который, по одной из существующих концепций, относится к различным слоям распавшихся протопланет (если идея зонального концентрического строения планет справедлива и универсальна). В этом несомненное преимущество метеоритов перед нашими усилиями получить глубинное вещество Земли, Луны, а в будущем и других планет. Самые оптимистические проекты по бурению Земли еще долго будут ограничены глубинами до 15 км. Таким образом, изучение глубинных зон Земли идет путем косвенных исследований планетарной геофизики и путем аналогий с метеоритами — реальными образцами пород распавшихся протопланет.

Изучение вещественного состава метеоритов ведется методами минералогии, петрографии и геохимии. Этим, вероятно, объясняется то, что во главе русской и советской метеоритики стояли крупные геологи П. Н. Чирвинский, В. И. Вернадский, А. Н. Заварицкий, Л. Г. Кваша, А. П. Виноградов, А. Е. Ферсман, Л. А. Кулик.

На развитие метеоритики существенно влияли физики-космогонисты академики О. Ю. Шмидт и В. Г. Фесенков.

Много времени попадобилось, чтобы преодолеть барьер недоверия к возможности падения камней с неба. Например, на заявление иельских профессоров Спилмана и Кингсли в 1808 г. о падении метеорита в штате Коннектикут сенатор Том Джефферсон заявил: «Легче поверить в то, что профессора янки лгут, чем в то, что камни могут падать с неба». Академик В. И. Вернадский обращал внимание на влияние недоверия к метеоритам как на причину утраты многих древних метеоритов и на причину осторожного и ограниченного обсуждения метеоритных падений. Еще в XIX в. многие ученые, чтобы иметь незапятнанной свою научную репутацию, старались не обсуждать метеоритных проблем и выбрасывали метеориты из своих коллекций.

Сейчас метеоритика объединяет самые различные направления изучения метеоритов и их воздействия на планеты:

1. Изучение движения метеорных тел в атмосфере Земли (предмет исследований метеорной астрономии).
2. Исследование геокосмических импактных структур (метеоритные кратеры и астроблемы).
3. Изучение метеоритного вещества (метеориты, тектиты, космическая пыль, твердые компоненты планет).
4. Изотопные и хронологические исследования.

Каждая из организаций по исследованию космического вещества делает свой вклад, обычно опираясь на хорошо развитые новые методы исследований, которые могут принести новую информацию о происхождении планетной системы.

Комиссия по метеоритам и космической пыли Сибирского отделения АН СССР была образована в 1962 г. по инициативе академика В. С. Соболева и при участии главным образом сотрудников СО АН СССР, Томского университета и других организаций. Работы КМКП часто выходили за региональные пределы, и она стала всесоюзным центром по обсуждению широких проблем. Библиографический список работ КМКП, публикуемый в этом сборнике, насчитывает около 300 наименований и отражает весьма широкий спектр исследований.

## ПОИСКИ МЕТЕОРИТОВ

В настоящее время на Земле выпадает ежегодно более 500 метеоритов, но только 4 из них доходят до исследователей. В мировом каталоге насчитывается около 1000 метеоритов, падения которых наблюдались, и около 1000 случайно найденных.

## Метеориты Сибири и Дальнего Востока

| № по каталогу СССР | Название метеорита       | Дата падения или находки | Тип метеорита   | Коллич. экземпляров | Общий вес, кг |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------|
| 1                  | Палласово Железо         | Нах. 1749                | Железо-каменный | 1                   | 687           |
| 4                  | Доронииск                | Пад. 6/IV 1805           | Каменный        | 2                   | 4,3           |
| 15                 | Тунка                    | Пад. 1/III 1824          | »               | 1                   | Ок. 2         |
| 20                 | Петрозавловский Прииск   | Нах. 1841                | Железный        | 1                   | 7,2           |
| 25                 | Нуро                     | Нах. 1854                | »               | 1                   | 14,248        |
| 38                 | Сыромотово               | Нах. 1873                | »               | 1                   | 217,085       |
| 41                 | Нохтуйск                 | Нах. 1876                | »               | 1                   | 0,008         |
| 55                 | Тубил                    | Нах. 1891                | »               | 1                   | 22            |
| 63                 | Горин-Шибир              | Нах. нач. XX в.          | »               | 1                   | 0,003         |
| 66                 | Великоиколаевский Прииск | Нах. 1902                | »               | 1                   | 24,267        |
| 68                 | Телеутское Озеро         | Пад. 22/V 1904           | Каменный        | Несколько           | 0,025         |
| 71                 | Бодайбо                  | Нах. 1907                | Железный        | 1                   | 15,873        |
| 75                 | Демина                   | Пад. 6/IX 1911           | Каменный        | 1                   | 1,189         |
| 76                 | Тарбагатай               | Нах. 1912                | »               | 1                   | 0,370         |
| 77                 | Чинье                    | Нах. 1912                | Железный        | Несколько           | 80            |
| 80                 | Егоуславка               | Пад. 18/X 1916           | »               | 2                   | 256,78        |
| 84                 | Лебединский Прииск       | Нах. 1925                | »               | 1                   | 0,410         |
| 86                 | Орловка                  | Нах. 1928                | Каменный        | 1                   | 40,543        |
| 88                 | Хмелевка                 | Пад. 1/III 1929          | »               | Несколько           | 6,109         |
| 90                 | Кузнецово                | Пад. 26/V 1932           | »               | Дождь               | Ок. 7         |
| 96                 | Сунгач                   | Пад. 10/IV 1935          | »               | 1                   | 0,637         |
| 99                 | Ичкала                   | Пад. 29/V 1936           | »               | 1                   | 4,033         |
| 109                | Чебанкол                 | Нах. 1938                | Железный        | 2                   | 128           |
| 111                | Большая Корта            | Нах. 1939                | Каменный        | 1                   | 2,5           |
| 112                | Мальдяк                  | Нах. 1939                | Железный        | 1                   | 0,992         |
| 113                | Бургавли                 | Нах. 1941                | »               | 1                   | 24,9          |
| 116                | Юдома                    | Нах. 1946                | »               | 1                   | 7,4           |
| 117                | Сихотэ-Алинь             | Пад. 12/II 1947          | »               | Дождь               | Ок. 27000     |
| 120                | Венгерсво                | Пад. 11/X 1950           | Каменный        | 2                   | Ок. 10        |
| 127                | Сусуман                  | Нах. 1957                | Железный        | 1                   | 18,8          |
| 128                | Эльга                    | Нах. 1959                | »               | 1                   | 28,8          |
| 133                | Будулан                  | Нах. 1962                | Железокаменный  | 1                   | 110           |
| 139                | Сеймчан                  | Нах. 1967                | Железный        | 1                   | 323           |
| 140                | Марковка                 | Нах. 1967                | Каменный        | 1                   | 8,8           |
| 142                | Апрельский               | Нах.                     | Железный        | 1                   | 54,6          |
| 143                | Эвекинот                 | Нах. 1970                | »               | 1                   | 8             |
| 144                | Тобычан                  | Нах. 1971                | »               | 1                   | 52,1          |
| 145                | Полуямкп                 | Нах. 1971                | Каменный        | 3                   | 13,429        |
| 146                | Ракиты                   | Нах.                     | »               | 1                   | 11,4          |
| 147                | Кифкафсяган              | Нах. 1972                | Железный        | 1                   | 18,75         |
| 153                | Алискерово               | Нах. 1978                | »               | 1                   | 58,4          |

Примечание. Летом 1978 г. в Сибири найден еще один метеорит — хондрит Новосибирск весом 11,410 кг.

Коллекция метеоритов СССР на 1 января 1979 г. насчитывала 155 метеоритов, собранных за 200 лет. Из них только 42 с территории Сибири и Дальнего Востока (см. таблицу).

Каждый метеоритный каталог содержит графу «Вес метеорита». На учете каждый грамм метеоритного вещества, даже доли грамма (самый маленький метеорит мира — углистый хондрит Ревелсток — весит 0,17 г). Такое внимание к метеоритному веществу связано, во-первых, с тем обстоятельством, что каждый индивидуальный метеорит может содержать новую, еще неизвестную информацию, а во-вторых, с тем, что в настоящее время не хватает метеоритного вещества для осуществления комплекса исследований по уже разработанным методикам. Именно поэтому сейчас при исследовании метеоритов предпочтение отдается тем методам, которые требуют малого количества вещества.

Отыскание метеоритов по падениям составляет весьма трудную задачу, особенно на территориях, подобных Сибири. Находка каждого метеорита представляет собой событие первостепенной важности и обычно быстро обходит все газеты мира. Исследования всяких новых метеоритов непрерывно совершенствуются, и поэтому сохранение метеоритов в единых крупных коллекциях является совершенно необходимым, так как развитие новых методов исследований предполагает новые повторные изучения. На первом этапе сбора и первичного изучения необходима служба по проверке заявок о падениях, отысканию метеоритов, му исследованию.

Эти находки, занесенные в международные каталоги, служат мировым исследовательским фондом с неограниченными возможностями обмена, передачи материала на основе международного сотрудничества.

В 1967—1968 гг. в ряде районных газет Западной и Центральной Сибири были опубликованы КМКП популярные статьи о метеоритах, их значениях для науки и с обращением к населению оказывать содействие в розыске и сборе метеоритов. Результатом этих публикаций были многочисленные обобщения, наиболее информативные из них опубликованы в сборнике «Метеориты Сибири» (1971).

Вслед за этим неоднократно предпринимались попытки проверки метеоритных заявок, не всегда успешные, но необходимые хотя бы уже потому, что часть из них приносит удачу, а отличить перспективные сообщения от ошибочных без выезда на место невозможно.

За время существования КМКП были найдены, переданы в Геологический музей Института геологии и геофизики СО АН СССР и предоставлены для научного изучения три интереснейших метеорита.

В 1967 г. в степном Алтае близ с. Марковка при весенней пахоте трактористы вывернули плугом каменный метеорит весом 11 кг. Его в том же году отдали работавшим в том районе геологам Западно-Сибирского геологического управления. В Комиссию по

метеоритам Юн попал двумя годами позже, после опубликования в районных газетах Алтайского края обращения КМКП к населению о сборе метеоритов. Вес его к этому времени составлял 8,8 кг. Традиционными минералого-петрографическими методами было установлено, что метеорит относится к обыкновенным бронзит-оливиновым хондритам группы Н, по названию ближайшего к месту находки населенного пункта получил свое имя — Марковка.

В августе 1971 г. в бассейне северной р. Индигирки при промывке золота найден железный метеорит весом более 52 кг. Эта новость быстро облетела газеты, сначала местные, а затем центральные. Институт геологии и геофизики оперативно командировал в Усть-Неру, центр Оймяконского района Якутской АССР, сотрудника Комиссии по метеоритам Г. М. Иванову. Уже 25 октября метеорит был передан в Комиссию. Его вес в этот момент составлял 45,4 кг. Кусок драгоценного метеоритного вещества весом 6,7 кг остался у директора прииска «Маршальского» Н. С. Кнышенко. Своё имя — Тобычан — метеорит получил по названию реки.

Метеорит оказался грубоструктурным октаэдритом довольно редкого химического класса ПЕ. Сейчас известно всего 12 метеоритов этого класса (из примерно 1000 железных). Их химические характеристики совпадают, из чего делается вывод об их общем родоначальном источнике.

Метеорит Тобычан интересен ассоциацией акцессорных силикатных минералов — кварц + космохлор (юриит). Кроме того, космохлор ( $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$ ) сам по себе является редким космогенным пироксеном (в земных условиях он не известен), найденным до того времени только в 4 метеоритах мира.

Во время поездки в Якутию за метеоритом Тобычан Г. М. Ивановой неожиданно было обнаружено, что в пос. Усть-Нера находится еще один метеорит — Эльга. Этот железный метеорит был найден еще в 1959 г. при разработке россыпного золота и описан в литературе. В каталоге «Метеориты СССР» местом его хранения ошибочно назван Якутский геологический музей. Оказалось, что в 1959 г. от метеорита весом 28,8 кг был отпилен кусочек в 62 г и передан в Северо-Восточное геологоразведочное управление (г. Магадан) для минералого-петрографического описания. В 1961 г. пластина весом 888,5 г передана в Москву, в метеоритную коллекцию СССР. Сам же метеорит остался в Усть-Нере, со временем меняя владельца и место хранения. Время от времени от метеорита отрезали кусочки «на сувениры». К 1971 г. от метеорита сохранилось меньше половины — 13 кг. Этот остаток передал в Комиссию по метеоритам СО АН СССР главный геолог Верхнеиндигирской геологоразведочной экспедиции О. В. Степанов. Метеорит занял место в музейной витрине благодаря его «второй находке» или случайному спасению.

Эльга — тонкоструктурный октаэдрит с силикатными включениями необычного для метеоритов состава: анортоклаз, хромдиоп-

сид, бронзит, К—Na маскелинит. Метеорит несет следы ударного метаморфизма и термальных изменений. В метеоритных коллекциях мира насчитывается 4 метеорита с подобными особенностями состава, но только один подобен Эльге по степени метаморфизма.

В последние годы (1977—1978) сделана попытка поисков метеорита, который упал в 1936 г. в Тасеевском районе Красноярского края. К поискам привлекаются силы добровольцев Комплексной самостоятельной экспедиции. Используются все доступные современные средства — дешифрирование аэрофотоматериалов, магнитометрические работы на ограниченных участках, широкий поиск миноискателями. Сложность работы в том, что обследованию подлежит слишком большой участок тайги — примерно  $10 \times 4$  км — тайги буреломной, с горящими и ветровалами, характерными для Енисейского кряжа. Как скоро принесет успех эта трудоемкая и, можно сказать, беспрецедентная работа, должно показать будущее.

Пока три оригинальных метеорита закончили свою историю в Новосибирске, в музейной витрине. Каждый из этих метеоритов на своем «земном» пути терял в весе. Метеорит Эльга потерял больше половины, около 15 кг. В списке сибирских метеоритов есть метеорит Юдома, местопребывание которого неизвестно. В свое время в метеоритную коллекцию Советского Союза был прислан образец этого метеорита весом 4 г. С тех пор след этого метеорита затерялся.

Важно не только найти метеорит, но и сохранить его по возможности целым и невредимым. Это еще одна задача КМКП. Она решается постоянной пропагандой метеоритики в периодической печати, по радио и телевидению. С этим у нас дело обстоит достаточно хорошо. Нужно, чтобы каждый человек, случайно нашедший метеорит, знал, что он имеет дело с научной ценностью, что нарушать его нельзя, знал, куда и как направить находку.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

В работе Комиссии долгое время главное место занимали систематически проводимые на протяжении 20 лет исследования природы Тунгусского метеорита. Начиная с 1959 г., в районе падения Тунгусского метеорита было организовано 18 экспедиций. Весьма значительный фактический материал, собранный за эти годы, обобщен в пяти тематических сборниках, монографии и ряде публикаций в советской и зарубежной печати. В результате этих исследований дана полная характеристика разрушений, вызванных взрывом Тунгусского метеорита (повал леса, ожог деревьев), установлена траектория полета Тунгусского метеорита, высота и тротиловый эквивалент его взрыва, доля выхода энергии в лучистую вспышку, описаны геофизические эффекты, сопровождавшие Тунгусское падение, охарактеризованы биологические последствия взрыва. В 1960—1965 гг. проведен полный сбор геофизических ма-

териалов, относящихся к лету 1908 г., во всех сохранившихся в настоящее время архивах советских и зарубежных геофизических, метеорологических и астрономических обсерваторий.

Важным этапом в разработке Тунгусской проблемы явилось обнаружение в 1969 г. в «катастрофном» слое торфа вблизи района падения повышенной концентрации силикатной и металлической метеорной пыли, являющейся, по-видимому, остатками Тунгусского космического тела. С 1974 г. эти исследования сочетаются с проводимыми совместно с Институтом геохимии и физики минералов АН УССР исследованиями элементного и изотопного состава различных слоев торфа в районе Тунгусской катастрофы.

Состав Тунгусского метеорита, по-видимому, существенно отличался от обычных каменных и железных метеоритов. В частности, выделенные из слоя торфа 1908 г. сферулы обогащены цинком, натрием, в них присутствуют следы серебра, селена и редких земель. Металлическая фракция пыли маркируется повышенным содержанием никеля и кобальта. По предварительным данным, в катастрофном слое произошел сдвиг изотопных соотношений свинца.

В целом на основании перечисленных работ вырисовывается следующая картина: около 7 часов по местному времени 30 июня 1908 г. в атмосферу Земли в междуречье Лены и Нижней Тунгуски вторглось крупное космическое тело, которое, двигаясь с ВЮВ на ЗСЗ, пересекло Нижнюю Тунгуску, проделало в атмосфере Земли путь около 700 км. Пролет закончился взрывоподобным разрушением на высоте 5—8 км в точке, расположенной в 60 км к ССЗ от пос. Ванавара на междуречье Подкаменной Тунгуски и Чупи ( $\varphi = 60^{\circ}53'09''$ ;  $\lambda = 101^{\circ}53'40''$ ). Угол наклона траектории полета к горизонту по разным оценкам от 15 до 20°. Энергия взрыва составила по последним подсчетам  $7 \cdot 10^{23}$  эрг. При этом 10% световой энергии ушло в лучистую вспышку. Взрывная волна повалила деревья в тайге на площади  $2150 \pm 50$  км<sup>2</sup>, вызвала сейсм, зарегистрированный в Иркутске, Ташкенте, Тбилиси, Слудке, Йене, обогнула земной шар и была зарегистрирована всеми обсерваториями, работавшими в то время. Вероятно, приход ее в ионосферу явился причиной магнитной бури, последовавшей тотчас после Тунгусского взрыва, отмеченной Иркутской обсерваторией.

Падения крупных частей метеорита, по-видимому, не происходило. Во всяком случае, различного рода воронки, депрессии, ямы и т. п., неоднократно принимаемые за метеоритные кратеры, оказывались на поверку чисто земными образованиями, не имеющими к Тунгусскому метеориту ни малейшего отношения. Это относится к Южному болоту и к термокарстовым воронкам северного торфяника. Вероятно, большая часть массы Тунгусского метеорита или даже все тело полностью было переведено в мелкодисперсное состояние, выброшено после взрыва восходящими токами воздуха в стратосферу — образовалось облако космического аэрозоля, которое, дрейфуя по ходу стратосферного ветра, постепенно оседало

в СЗ направлении от района катастрофы. Эта картина хорошо согласуется с результатами космохимической съемки по торфу, о чем говорилось выше, а также с результатами поисков космического вещества в почвах района, проведенных в 1961—1962 гг. экспедицией Комитета по метеоритам АН СССР под руководством К. П. Флоренского.

После находки первых сферул, являющихся остатками Тунгусского тела, в лаборатории минералообразующих растворов ИГиГ СО АН СССР был проведен анализ газовых включений в них. Индивидуальные вакуоли имели размер 25—100 мк. Составы газов исследовались оригинальным методом, разработанным в лаборатории. Получены интересные результаты.

Все газовые смеси многокомпонентны. Обращает на себя внимание экзотичность этих смесей, отсутствие воздушной компоненты и присутствие водорода. В исследованных шариках и осколках стекла лунного грунта все включения содержали водород.

После исследования газов в вакуолях тунгусских сферул было высказано мнение, что Тунгусский феномен — взрыв небольшой кометы в атмосфере, т. е. произошел возврат к ранним представлениям, которые поддерживал академик В. Г. Фесенков. Сам факт находки сферул Тунгусского тела и сферул, возникших при его воздействии, анализ газов, некоторые расчеты, показывающие невысокую плотность Тунгусского тела (снежный ком академика Г. И. Петрова), и появившиеся в последнее время данные по элементному и изотопному составу сферул позволяют конкретизировать наши представления о Тунгусском теле как о небольшой своеобразной комете. Своеобразие состоит в том, что комета представляла собой довольно рыхлый ком замерзших низкокипящих газов с вкрапленными твердыми компонентами.

Помимо перечисленного, Тунгусский взрыв вызвал ряд эффектов в районе падения, которые не получили до настоящего времени удовлетворительной интерпретации. К ним относятся перемагничивание почв в радиусе 30 км от эпицентра взрыва, резкое увеличение мутационного фона у деревьев, ускоренный после 1908 г. прирост леса.

Особо следует сказать о световых явлениях в атмосфере Земли, последовавших после Тунгусского взрыва. Анализ собранных оптических явлений позволил сделать следующие выводы:

1. Оптические аномалии лета 1908 г. наблюдались на территории, ограниченной с востока Енисеем, с юга — линией Ташкент—Ставрополь — север Италии — Бордо, с запада — побережьем Атлантического океана.

2. Эти эффекты достоверно не наблюдались в Сибири восточнее Енисея, на территории США, в Африке и т. д.

3. Начало аномалий приходится на 23—25 июня 1908 г. Своего максимума они достигли в ночь с 30 июня на 1 июля и в дальнейшем очень быстро — в течение 2—3 суток — упали в интенсивности.

4. Оптические эффекты лета 1908 г. могут быть разделены на три категории: серебристые облака, яркие пестрые зори, свечение точного неба. Все они развивались параллельно друг другу.

5. Сопоставление их с другими периодами оптических аномалий выявило их близкое сходство с тем, что имеет место при попадании в атмосферу Земли космической пыли.

В 1908 г. Бушем был обнаружен поляриметрический эффект, позднее связанный с падением Тунгусского метеорита. Поляриметрический эффект был проанализирован и сопоставлен с другими поляриметрическими нарушениями вулканической или космической природы. Показано, что поляриметрическая аномалия лета 1908 г. имеет характер, резко выделяющий ее среди всех известных явлений подобного рода.

Изучение оптических аномалий привело к заключению, что летом 1908 г. в атмосферу Земли проникло мелкодисперсное космическое вещество. В то же время такие оптические аномалии не имели себе равных.

Все это побудило КМКП совместно с Томским отделением Всесоюзного астрономо-геодезического общества провести наблюдения за серебристыми облаками. С 1963 г. в Томске организовано регулярное патрулирование за ними. Наблюдения продолжаются до настоящего времени. Изучение серебристых облаков стало большой самостоятельной темой в исследованиях Комиссии. Регулярные однотипные пятнадцатилетние наблюдения по единой методике в Томске позволили получить некоторые выводы относительно активности серебристых облаков и их климатологических особенностей. Комиссией были собраны материалы наблюдений со всего земного шара за период с 1885 по 1977 г. Общий анализ материала по появлению серебристых облаков в различные годы позволил выделить наиболее существенные числовые характеристики их активности и выявить взаимосвязь между ними. «Каталог появлений серебристых облаков по мировым данным» позволил существенно уточнить и дополнить представления о климатологии серебристых облаков.

Падение Тунгусского метеорита — явление исключительное. Поэтому его изучение заслуживает большого внимания и стимулирования. Особенно важен вопрос сохранения площади эпицентра взрыва от антропогенных и индустриальных влияний для продолжения исследований рассеяния и состава космического вещества и влияния Тунгусского взрыва на развитие растительного и животного мира. Исследования зоологов и ботаников в эпицентре взрыва указывают на значительные изменения у растений, насекомых. Такие наблюдения уникальны, как и уникально само явление Тунгусского феномена. Имея согласие многих организаций, заинтересованных в сохранении геокосмического полигона и его изучении, а также председателя Сибирского отделения АН СССР академика Г. И. Марчука на организацию заказника, можно полагать, что организация заказника на территории эпицентра Тун-

гусского взрыва становится реальным делом, а наблюдения на этой уникальной территории дадут новые важные космогеологические и космобиологические материалы. Комплексная самостоятельная экспедиция (КСЭ), которая чаще пользовалась только моральной поддержкой КМКП и имела ограниченную материальную поддержку от Комиссии, проделала значительную работу, результаты исследований экспедиции сейчас имеют не только всесоюзную, но и мировую известность. Комплексную самостоятельную экспедицию следует поддержать и сохранить как один из важных рабочих органов КМКП не только для последующих работ на территории заказника, но и для работ с взрывными кратерами и импактитами, тектитами, космической пылью и метеоритами.

### ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОРИТНЫХ КРАТЕРОВ И АСТРОБЛЕМ

Исследования Луны и других планет Солнечной системы — Марса, Венеры, Меркурия показали, что общей характерной особенностью их поверхности является большое количество кратеров, которым раньше приписывали вулканическое происхождение. Возможно, некоторые из них и вулканического происхождения, но большинство — кометно-метеоритного. Поскольку Луна не защищена атмосферой, то микрометеоры достигают ее поверхности и образуют микрократеры. На поверхности Луны имеется бесчисленное множество кратеров — микроскопических и гигантских. Поверхность Земли интенсивно выветривается, а продукты выветривания накапливаются в виде осадков на континентах и в океанах. Микрометеориты сгорают в атмосфере, не достигая поверхности Земли (метеоры). При рассмотрении поверхности Земли из Космоса видно, что процессы выветривания не только разрушают метеоритные кратеры, но и погребают их под толщей продуктов выветривания. Только в немногих районах сохранились отчетливо видимые кратерные структуры или полустертые выветриванием остатки кольцевых структур.

Изображения поверхности Земли на спутниковых фотографиях позволяют наметить кратерные объекты для наземных поисков. Сибирское отделение АН СССР имеет комплекты снимков из Космоса районов Сибири и Казахстана. Изучение кратеров и астроблем имеет большое фундаментальное и прикладное значение.

Начиная с 1962 г. Комиссией проводятся систематические разработки, направленные на изучение кольцевых структур на Земле и Луне. Изучен ряд вопросов статистики лунной (планетной) поверхности в связи с ударным кратерообразованием: насыщение планетной поверхности кратерами, наслоение выбросов, динамика интенсивности кратерирования на Луне, поток вторичных частиц на поверхность Луны. В задаче о насыщении поверхности «чистыми» (неповрежденными) кратерами получены исчерпывающие статистические характеристики процесса для произвольного потока. В случае степенного закона распределения кратеров по раз-

мерам составлены подробные таблицы для вычисления статистических характеристик насыщенности. Показано, что показатель в степенном законе распределения диаметров видимых кратеров существенно меньше соответствующего показателя у исходного потока образующихся кратеров, что выбросы при кратерообразовании формируют четкую слоистую структуру (получены локальные статистические характеристики количества слоев). Интенсивность кратерирования на Луне достигла современной (диаметры кратеров  $> 2$  км)  $1,7 \pm 0,2$  млрд. лет назад, а до этого падала как двойной логарифм возраста поверхности. Рассмотрена задача о преобразовании потока метеороидов на поверхность Луны в поток осколков. Предложена модель кратерообразования и формирования осколков, позволяющая рассчитать распределение параметров осколков в зависимости от энергии удара первичной частицы.

Члены КМКП участвовали в экспедиционных работах в районах кратерных структур Патомского кратера в Иркутской области, Сихотэ-Алинских кратеров и Каалиярв (Эстония), Попигайской и Карской астроблем, метеоритного кратера Жамашиин на севере Аральского моря, а также принимали участие в исследовании пород из крупнейшего кратера Западной Европы — Нордлингер Рис (ФРГ). Исследования чешских тектитов и стекловатых пород кратера Рис являются примером международного сотрудничества, осуществляемого пока в порядке личной инициативы.

Фундаментальное значение изучения кратеров и астроблем заключается в решении основной задачи естествознания — познания возникновения и развития Солнечной и Галактической систем. Вся проблема многогранна и велика, поэтому КМКП СО АН СССР должна разрабатывать часть проблемы на глубину, опираясь в своих исследованиях на оригинальные методы, развитие в Сибирском отделении, и на уникальную аппаратуру.

Перспективы поисков новых кратеров и астроблем весьма обширны. Исходя из наблюдений над поверхностью других планет Солнечной системы, можно с уверенностью сказать, что эти поиски принесут успех на такой крупной территории, как Сибирь. Это обстоятельство и опыт, накопленный КМКП, кадры КСЭ и появление в этой области специалистов высокой квалификации позволяют рекомендовать энергичную организацию и финансирование этих работ. Объекты исследований — древние кратеры, обнаженные и погребенные, — названы нами геокосмическими и по существу исследований приведут к совместным работам с геологами. Сейчас было бы правильным сделать эти объекты главными в работе КМКП.

### **ОЦЕНКА ПРИТОКА МЕТЕОРНОГО ВЕЩЕСТВА НА ЗЕМЛЮ**

Начиная с 1962 г. проводятся систематические исследования по оценке притока метеорной материи на Землю. На протяжении 5 лет (1963—1968) отработывалась методика, позволяющая выделять космическое вещество из различных природных объектов:

почвы, снега, высокогорных льдов, древесной смолы, торфа. С этой целью в 1963—1965 гг. были предприняты экспедиционные выезды на ледники Актру и Белуха на Алтае, в 1963—1968 гг. систематически проводились работы в удаленных от населенных пунктов районах междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок. В 1963 г., кроме того, был организован выезд на сфагновые торфяники в междуречье Томь — Кеть. В итоге пятилетних работ к 1968 г. было показано, что оптимальным объектом для выделения метеорной пыли на большой территории является торф верховых сфагновых болот, исследование которого позволяет получать информацию о динамике выпадения сферической фракции метеорной пыли за время, измеряемое многими десятилетиями и даже веками.

В 1967—1977 гг. в ходе 8 экспедиций, предпринятых КМКП совместно с Томским отделением Всесоюзного астрономо-геодезического общества, проведена космохимическая съемка на площади более 10 000 км<sup>2</sup> в междуречье Подкаменной и Нижней Тунгусок (обследовано более 500 точек). Параллельно были постарлены соответствующие работы на севере Томской области, а также в отдаленных точках Тюменской, Ленинградской областей, в отрогах Пutorанских гор, в районе падения Сихотэ-Алинского метеорита. Обработка полученных результатов позволила количественно оценить ежегодный приток сферической фракции твердой пыли в диапазоне 15—200 мк за последние 300 лет. Ежегодный приток рассматриваемой фракции космического вещества на поверхность Земли составляет в среднем 2—3 тыс. т. За последние 300 лет скорость притока была относительно постоянной, хотя отдельные флуктуации в пределах порядка нельзя считать исключенными. По предварительным данным, интенсивность выпадения сферической фракции метеорной пыли в отдельных районах не везде одинакова. Создается, например, впечатление, что на территории Томской области до начала эпохи индустриализации ежегодное количество выпадавших метеорных сферул было в 2—3 раза выше, чем в центральной части Красноярского края. Полученные данные хорошо согласуются с данными метеорных наблюдений. Начиная с 1974 г. эта работа проводится в кооперации с Институтом геохимии и физики минералов АН УССР. В частности, начата работа с применением изотопных методик, целью которой является исследование флуктуаций притока космической пыли за последние 5—7 тыс. лет.

В настоящее время совместно с кафедрой геофизики Московского государственного университета ведется подготовка реализации программы торфяной космохимической съемки по всей территории Советского Союза к северу от 50-й параллели.

Таким образом, методика, предложенная первоначально для поиска вещества Тунгусского метеорита, нашла применение и для других целей. Кроме оценки притока метеорного вещества на Землю, она успешно используется в санитарии для оценки роста промышленного загрязнения в окрестностях больших городов и для этой же цели в охране окружающей среды.

КМКП СО АН СССР в меру своих довольно скромных возможностей ведет исследования доступными ей методами, используя по возможности новейшие оригинальные методики и аппаратную базу АН СССР и других организаций.

**Генетические особенности метеоритного вещества.** Для оценки генезиса метеоритного вещества были применены методы, развиваемые в лаборатории минералообразующих растворов (ИГиГ СО АН СССР). Были изучены коллекции метеоритов Минералогического музея им. А. Е. Ферсмана, отобраны минимальные количества крупнозернистых метеоритов, содержащих прозрачные минералы. В тонких пластинках этих минералов обнаружены вакуоли с минералообразующими средами. Как предполагалось, такими средами были расплавы. Капельки силикатного расплава захвачены в вакуоли кристаллов, растущих из расплава.

Прозрачные минералы метеоритов — оливин, плагиоклаз, пироксен — содержали вакуоли, заполненные газом (существенно газовые включения, включения с газом и стеклом, включения с твердой кристаллической фазой, стеклом и газом). Во время захвата содержимое включений было однородным, и только после обособления во включениях при остывании расплав кристаллизовался, отделился газ, и образовалось многофазовое включение. Для определения температур захвата расплава или минимальных температур минералообразования нужно, повышая температуру и одновременно ведя наблюдения под микроскопом за содержимым включения, привести эту микросистему в гомогенное состояние. Сначала при нагревании слегка подплавляются твердые фазы, затем они плавятся целиком — образуется система из расплава и газа. Дальнейшее нагревание приводит к расширению силикатной жидкости, росту давления и постепенному уменьшению газового пузырька. Газы под воздействием растущего давления постепенно растворяются в расплаве. Наконец, при определенной температуре газовый пузырек исчезает. В этот момент фиксируют минимальную температуру кристаллизации данного минерала из расплава. Для проверки достоверности полученных температур были составлены две системы: диопсидовая шихта с добавкой 5% CaF и шихта диопсид — анортит без минерализатора. Обе шихты были расплавлены при 1350°C и раскристаллизованы при 1300°C. Растущие кристаллики диопсида захватывали капельки остаточного расплава. При охлаждении расплав сжимался, появлялся газовый пузырек, далее включенная в стекло капелька расплава превращалась в двухфазовое включение из стекла со сферическим газовым пузырьком. Включения были обнаружены в тонких пластинках и гомогенизированы нагреванием. Температуры гомогенизации составляют  $1300 \pm 10^\circ\text{C}$ , что служит хорошей гарантией обратимости и воспроизводимости фазовых превращений. Расплавные включения достаточно точно показывают температуру захвата расплавов

во включения. Результаты измерения температур гомогенизации в энстатите метеорита Norton County 1400—1420°C.

Диаметры газовых пузырьков во включениях редко превышали 15 мк. В большинстве случаев газовая смесь во включениях находилась под давлением, которое немного превышало атмосферное (не более чем в 5—10 раз). Примерно третья часть включений после вскрытия уменьшала объем в 2—3 раза, что указывает на давление немного ниже атмосферного.

Таким образом, проведенные измерения впервые в практике изучения метеоритов дали возможность судить об условиях кристаллизации внутренних зон распавшейся протопланеты.

Применяя собственные оригинальные методы, мы определили состав газов в газовых пузырьках. Содержания CO и H<sub>2</sub> (12—30 об. %) указывают на восстановительную обстановку плавления. Кроме этих газов, обнаружены углекислота, азот с редкими газами и в энстатите метеорита Norton County — углеводороды (6,5—7,5 об. %). Такие исследования имеют большое значение для установления происхождения метеоритных пород протопланеты и условий их кристаллизации. Эти первые в научной практике результаты определения температур кристаллизации и состава летучих позволяют сделать предварительные выводы:

1. Первичные включения в метеоритах характеризуют эндогенные процессы распавшихся планет.

2. Обстановка кристаллизации по составу летучих в расплаве резко восстановительная.

3. Продукты глубинной кристаллизации расплавов во включениях содержат углеводороды. Этот факт подтверждает возможное неорганическое происхождение нефти.

Методы термометрических исследований метеоритов успешно развиваются. В ИГиГ СО АН СССР недавно сконструирована опытная высокотемпературная силитовая печь для работы под микроскопом в атмосфере инертного газа. Это позволит вести гомогенизацию включений в оливинах, пироксенах, полевых шпатах. Все эти минералы встречаются в метеоритах и содержат включения, которые в обычной атмосфере гомогенизировать нельзя из-за потемнения препаратов при нагревании. В атмосфере инертного газа нагревание препарата происходит без потемнения, и температуры гомогенизации расплавов и газов во включениях измеряются достаточно точно.

**Исследования тектитов.** Тектиты — проблематичные образования, которые находят в разных районах Земли. Они представлены стеклами в виде осколков и сложных форм, связанных с плавлением и движением с большой скоростью. Дискуссия о тектитах до сих пор не дала окончательных результатов об их происхождении. Изучение тектитов носит международный характер. В Советском Союзе изучением тектитов почти не занимались, так как отсутствовали их находки на территории СССР. Сейчас найдены первые тектиты СССР севернее Аральского моря, названные иргизи-

тами. Урочище Жаманшин имеет все признаки взрывного кратера — расплавление пород мишени и выбросы характерных выплавов стекла. Анализы стекол показывают, что они похожи на известные тектитовые стекла из других районов Земли. Нами предприняты генетические исследования иргизитов на основе исследования включений. Включения в иргизитах — чисто газовые. Состав газов проанализирован.

Близкое расположение взрывного кратера и рассеянных тектитовых стекол позволяет поставить работы по выявлению связи между ними. Существует предположение, что породы мишени по структуре и составу постепенно переходят в импактиты — жаманшиниты и дальше в тектиты — иргизиты. Все это рассматривается как результат воздействия на породы поверхности Земли метеоритного взрыва. Изучение атмосфер плавления по составу газовых смесей из включений может дать генетическую информацию. КМКП имеет опыт изучения состава газов во включениях тектитовых стекол и должна провести эти работы на достаточно представительном материале.

До того, как появились отечественные тектиты — иргизиты, в лаборатории минералообразующих растворов были исследованы практически все известные на Земле тектиты, полученные нами из разных стран. В результате появилась новая генетическая информация. Эта информация опиралась на изучение состава и плотности газов из включений в тектитовых стеклах.

Газы из включений индошинитов, австралитов, бедиазитов, филиппинитов состоят почти во всех случаях из углекислоты. Захватенные микропорции атмосфер плавления во включениях однозначно указывают на то, что эти атмосферы были почти чисто углекислыми. На основании этой новой информации можно сделать предположение, что эти стекла выплавлялись в атмосфере, очень напоминающей венерианскую. Для более уверенных утверждений необходимо сделать значительно большее количество анализов на более представительном материале.

Анализы газов из включений молдавитов, ливийского стекла, светлых тунгусских микросферул и лунного грунта характерны присутствием значительных количеств водорода. Низкокипящие газы в газовых смесях из включений могут быть приняты за кометные.

Водород — характерный газ космического пространства. Все 48 анализов газов из включений в лунных стеклах без исключения показали значительные содержания водорода. Это дало нам возможность предположить, что большое количество частиц, из которых составлен лунный грунт, — кометного происхождения. Сейчас нам кажется возможным добавить, что это материал «рыхлых» комет, а также осколков лунной мишени, метеоритной и космической пыли и т. д.

Возвращаясь к обсуждению происхождения упомянутых выше стекол и стеклянных сферул, можно предположить, что они вып-

лавлялись в смешанных атмосферах, но с обязательным присутствием водорода. Для молдавитовых стекол известно некоторое сходство их нелетучего вещественного состава с отдельными участками пород мишени на площади взрывного кратера Рис (ФРГ), из которого предполагается выброс молдавитов. Водород мог присутствовать в смешанной земно-кометной атмосфере и захватывался вместе с другими газами этой атмосферы выплавками стекла из пород мишени. В другом варианте стекла могли быть не связаны с породами кратера Рис, а представляли рой стеклянных обломков, пришедших из Космоса и не связанных с импактиками кратера. События эти могли быть близкими во времени (расхождение до 1 млн. лет).

Помимо двух композиций газовых смесей (углекислой и водородной), обнаружены тектитовые стекла, содержащие в вакуолях газы с воздушной компонентой. Этот тектит — дарвиново стекло — содержит углекислоту, а также кислород и азот в воздушных соотношениях. Пока об этом тектите можно сказать, что имелись выплавки стекла в воздушной атмосфере. Все ли дарвиново стекло земного происхождения — сказать трудно. Оно может содержать часть космического стекла и часть земного. Для решения этого вопроса нужна более обширная коллекция этих австралийских стекол.

Экспериментальные выплавки стекол при 1 атм из шихт тектитового состава показывают очень близкие составы углекисло-воздушных смесей из включений дарвинова стекла и искусственных выплавок.

Состав газов из включений в тектитах и им подобных образованиях позволил подойти к идее о захвате атмосфер плавания в смешанных кометно-земных атмосферах. В процессе анализов газов из вакуолей тектитовых стекол установлены их малые плотности. Вскрытие включений в тектитах при давлении в 1 атм всегда приводило к сокращению объема газовых смесей часто на значительную величину (до 6000 раз). Многие включения при вскрытии уменьшались более этой величины и выходили за пределы разрешающей способности микроскопа. Сложный состав газов и полное отсутствие воздушных компонент указывают на герметичность включений и отсутствие диффузии через тектитовое стекло во включения и из включений, несмотря на большой возраст тектитовых стекол — 0,5; 15; 35 млн. лет. Этот факт пока необъясним, так как земные технические стекла всегда проницаемы для сравнительно быстрой диффузии газов.

Исследования тектитов весьма обширны, и их результаты представлены в многочисленных статьях. Несмотря на это, наши исследования газовых смесей во включениях тектитовых стекол принесли новые результаты, позволившие создать новые генетические концепции.

**Лунный грунт.** С исследованиями вещества метеоритных кратеров на Земле единой логической нитью связаны исследования лунного грунта. Эта связь обусловлена прежде всего единством

причины возникновения взрывных кратеров. Визуальные исследования кратеров дают возможность сформулировать предварительные выводы. Свечение кратеров — веский довод о существовании вулканов на Луне. Вместе с этими относительно крупными кратерами на Луне существует большое количество кратеров малых размеров, происхождение которых, несомненно, взрывное (кометы, метеориты). Лунный материал предоставил исследователям возможность убедиться в существовании бесчисленного количества микрократеров. Таким образом, нужны критерии для определения вулканической эндогенной природы крупных кратеров или их экзогенного импактного происхождения за счет ударов космических тел о поверхность Луны.

Исследования лунного материала дают нам пока возможность изучить лунный грунт из областей морей. Он представляет собой скопление большого количества частиц, имеющих вид обломков, шлакообразных частиц, стеклянных шариков, кристалликов минералов или их обломков. Таким образом, даже визуальный осмотр свидетельствует, что материал лунного грунта разнообразен не только по виду, но, по-видимому, и по происхождению.

Для исследования включений в стеклянных шариках и осколочках, по размеру не превышающих 500 мк, применялся волюмометрический метод, разработанный в лаборатории минералообразующих растворов.

Включения в стеклянных частичках имели сферическую или эллипсоидальную форму. Предшествующие нашим исследованиям обычных газов из лунного грунта ограничены полуколичественными данными для азота и водорода. При изучении трекров при нагревании среди продуктов разрушения были обнаружены Н, Не, Ne, Ar, N и следы Kr и Xe. Наблюдались и обычные газы: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, HCl, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> и др. Нашим методом проделано 18 анализов из индивидуальных включений. Одна вакуоль была расчленена микротрещиной и содержала только воздух.

Из анализов вытекают следующие предварительные выводы:

1. Газовые смеси во включениях имеют двухкомпонентный (CO<sub>2</sub> + кислые газы), трехкомпонентный [CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + (N<sub>2</sub> + р. г.)] или [кислые газы + H<sub>2</sub> + (N<sub>2</sub> + р. г.)] и четырехкомпонентный составы [(H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + (N<sub>2</sub> + р. г.)].

2. Весьма характерно присутствие водорода во всех анализах.

3. Азот и редкие газы присутствуют во всех анализах.

4. Воспроизводимость характеризуется анализами двух совершенно одинаковых по объему и форме пузырьков из шарика; расхождения незначительны.

5. Сокращения газа при вскрытии включений незначительны и в целом значительно меньше, чем у некоторых тектитов (в 2,32—54,5 раза).

Два газовых пузырька находились под давлением выше атмосферного (увеличение пузырька при вскрытии в 2,5—2,64 раза).

Самым неожиданным оказалась сравнительно высокая плот-

ность газов, резко отличающаяся от плотности лунной атмосферы. Можно предположить, что для данного слоя лунного грунта происходило в основном накопление частиц нелунного происхождения.

Разнообразие состава газов во включениях различных частиц указывает на различие источников частиц лунного грунта. На Луну, так же как и на Землю, падает самый различный космический материал, в котором содержится кометное, метеоритное, протопланетное (пыль) и собственно лунное вещество.

Сейчас в работе находится более обширный материал лунного грунта, доставленный советскими автоматическими станциями «Луна-16» и «Луна-20», а также американскими космонавтами. Развитие работ сдерживается отсутствием исследователей в КМКП, систематически работающих над этой проблемой.

**Импактиты.** Минералого-петрографическое изучение сравнительно недавно опознанных пород ударно-метаморфического происхождения, являющихся индикаторами крупных метеоритных кратеров (астроблем) — импактитов, дало существенно новую информацию об условиях их образования. Выполнены следующие исследования.

1. Охарактеризованы диаплектические минералы и стекла в импактитах, а также обнаружены и изучены высокобарические полиморфы кремнезема в этих стеклах — коэсит и стишовит (последний впервые найден в СССР). Находки этих минералов являются важными индикаторами ударных нагрузок в приповерхностных условиях.

2. Предварительно охарактеризованы включения в мономинеральных и смешанных импактных стеклах, возникших при селективном или полном плавлении пород мишени. Во флюидных включениях из этих стекол определены состав и давление газов, которые в стеклах смешанного состава из зювитов характеризуют параметры атмосферы взрыва в султанах выбросов взрывного облака. Эта атмосфера обладала восстановительным составом и существенно отличалась от земной. Что касается флюидных включений в мономинеральных и смешанных стеклах из «донных» импактных брекчий, то дальнейшие исследования могут показать, являются ли они новообразованными или же это специфически модифицированные при ударном сжатии включения исходных минералов пород мишени.

Минералого-генетические исследования в ударных кратерах дали интереснейшие фундаментальные результаты, определяющие некоторые практические перспективы. Кроме того, исследования импактитов позволили установить, что в крупных кратерах атмосфера взрыва характеризуется восстановительным составом и, возможно, имеет космогенный источник вещества (метеорит или, что наиболее вероятно, кометоподобное тело).

Краткая информация о научных исследованиях КМКП показывает, что, кроме изучения Тунгусского феномена силами Комплексной самостоятельной экспедиции, за истекшие 8 лет были исследова-

ны и другие космические и космогенные объекты. Работы КМКП вписались в общесоюзные координационные планы исследований, а также вышли на международный уровень кооперации, в том числе: 1) первичные исследования метеоритов для международных каталогов; 2) совместные с учеными ЧССР исследования тектитов и импактітов; 3) сбор и изучение силикатных и металлических шариков космического происхождения из глубоководных осадков мирового океана; 4) изучение лунных пород в рамках СЭВ и международной координации. Стало невозможным поддерживать эти важнейшие работы за счет усилий добровольных организаций и сверхплановых работ.

Опираясь на имеющиеся достижения и используя новейшие методы и аппаратуру, следует усилить КМКП и сделать ее способной выполнять оригинальные исследования, которые уже начаты. Для этого КМКП необходимо иметь собственную программу работ и на первых порах минимальный штат, способный осуществлять эту программу.

В программе работ КМКП большое место займут экспедиционные работы (поиски метеоритов, исследования кратеров, проверка заявок и т. д.), для которых требуются транспортные возможности.

**БИБЛИОГРАФИЯ РАБОТ КОМИССИИ  
ПО МЕТЕОРИТАМ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ  
СО АН СССР  
(1960—1978)**

*Г. М. ИВАНОВА, Н. П. ФАСТ*

1. Алексеева К. Н., Васильев Н. В., Ковалюх Н. Н., Смирнова А. В., Ольховик Ю. А., Чебаненко С. И. Свинец из торфов в районе Тунгусского явления. — В кн.: Космическое окружение и Земля. Киев, Наукова думка, 1977, с. 125—128.

2. Алексеева К. Н., Ковалюх Н. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В., Шаркин О. П., Стеченко С. Б. Элементарный состав магнитных частиц с места падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое окружение и Земля. Киев, Наукова думка, 1977, с. 122—125.

3. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В., Разин С. А., Сарычева Т. И., Темиршаева Л. Б., Шнитке В. Э. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 19—24.

4. Антонов И. В. Магнитные сферические частицы из проб почв района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 5—6.

5. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 20—22.

6. Ардаков Г. Л., Васильев Н. В., Ваулин П. П., Дулова М. П., Львов Ю. А., Меньяцева Т. А., Миляева Н. А. Еще раз о «сибирской тьме» 18 сентября 1938 г. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 142—143.

7. Арнаутов Н. В., Киреев А. Д. Спектрографическое исследование металлических шариков, найденных в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 149—150.

8. Арнаутов Н. В., Киреев А. Д. Микроспектральный метод исследования металлических шариков из района падения Тунгусского метеорита. — Геол. и геофизика, 1968, № 12, с. 130—132.

9. Афримзон А. Ф., Васильев Н. В. О некоторых перспективных для поисков метеоритов районах Сибири. — В кн.: Метеориты Сибири. Новосибирск, 1971, с. 18—25.

10. Афримзон А. Ф., Владимиров Е. И., Васильев Н. В., Иванов Г. М. О некоторых неразысканных метеоритах Сибири. —

В кн.: XIV метеоритная конференция, 14—18 декабря 1970 г., Москва. М., 1970. с. 52—54.

11. Бережной В. Г., Драшкина Г. И. Изучение аномального прироста леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 162-169.

12. Бояркина А. П., Бронштэн В. А. Об энергии взрыва Тунгусского метеорита и учете неоднородности атмосферы.— Астроном. вестн., 1975, т. IX, № 3, с. 172—178.

13. Бояркина А. П., Бронштэн В. А. Ответ на замечание В. П. Коробейникова, П. И. Чушкина и Л. В. Шуршалова по нашей статье.— Астроном. вестн., 1977, т. XI, № 1, с. 70—71.

14. Бояркина А. П., Сидорас С. Д. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита.— Геол. и геофизика, 1974, № 3, с. 79—84.

15. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Назаренко М. К. О притоке метеорной материи на Землю.— В кн.: Тезисы докладов, представленных на Симпозиум «Взаимодействие космической пыли с атмосферой», 8—11 октября 1974 г., Ашхабад. М., 1974, с. 8—9.

16. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Назаренко М. К. Количественный анализ сферических микрочастиц по материалам сбора их в сфагновых торфах.— В кн.: Метеоритика. Вып. 35. М., Наука, 1976, с. 69—72.

17. Бояркина А. П., Демин Д. В., Фаст В. Г. О статистической характеристике повала леса в районе взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Доклады Второй сибирской конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1962, с. 155.

18. Бояркина А. П., Разина Г. К., Фаст В. Г. О численном моделировании насыщения планетной поверхности кратерами.— В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. Ч. 1. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 89.

19. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Резчиков В. И., Тюлюпо Е. Б. Нейтронно-активационный анализ торфа как свидетеля техногенного загрязнения атмосферы.— В кн.: Труды НИИ ядерной физики, электроники и автоматики. Вып. 7. М., Атомиздат, 1977, с. 76—81.

20. Бояркина А. П., Демин Д. В., Зоткин И. Т., Фаст В. Г. Изучение ударной волны Тунгусского метеорита по вызванным ею разрушениям леса.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 112—128.

21. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П., Грязнова С. Н., Львов Ю. А. К оценке притока силикатной метеорной пыли на поверхность Земли.— В кн.: Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 120—121.

22. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Кривякова Э. Н., Николаев А. В., Тюлюпо Е. Б. О накоплении никеля и ванадия в окрестностях промышленных центров.— Гигиена и санитария, 1978, № 2, с. 91—94.

23. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Николов А. В., Резчиков В. И., Тюлопо Е. Б. О загрязнении техногенными отходами почв окрестностей промышленных центров по данным снеговой и торфяной съемки.— В кн.: Экспресс-информация. «Гидрология». Вып. 3(47). Обнинск, 1976, с. 22—24.

24. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Резчиков В. И., Тюлопо Е. Б., Шелудько С. И. Изучение загрязнения атмосферы и почв путем нейтронно-активационного анализа снега как свидетеля.— В кн.: Тезисы IV Всесоюзного совещания по активационному анализу. Тбилиси, 1977, с. 215.

25. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Меняйцева Т. А., Резникова Т. Н., Тюлин А. М., Федорова О. П. К оценке вещества Тунгусского метеорита в районе эпицентра взрыва.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 8—15.

26. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Наливайко Н. Г., Резчиков В. И., Тюлопо Е. Б., Шелудько С. И. О закономерностях формирования искусственных биогеохимических провинций в окрестностях больших городов и возможные последствия этого процесса для неспецифической резистентности организма.— В кн.: Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции по адаптации человека к различным географическим, климатическим и производственным условиям. Т. IV. Новосибирск, 1978, с. 27—28.

27. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Глухов Г. Г., Наливайко Н. Г., Резчиков В. И., Тюлопо Е. Б., Шелудько С. И. Изменение элементного состава окружающей среды в окрестности промышленных городов на примере г. Томска.— В кн.: Опыт и методы экологического мониторинга. Пуцдино, Изд-во АН СССР, 1978, с. 157—161.

28. Бояркина А. П., Васильев Н. В., Ваулин П. П., Иванова Г. М., Львов Ю. А., Меняйцева Т. А., Мпляева Н. А., Шульга Н. П. К оценке выпадения космической и индустриальной пыли на больших площадях.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 4. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 45—53.

29. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Распространение воздушных волн Тунгусского метеорита с учетом неоднородности атмосферы.— В кн.: Материалы Пятой научной конференции по математике и механике. Ч. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1975, с. 148—149.

30. Бронштэн В. А., Бояркина А. П. Расчёты воздушных волн Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 47—63.

31. Василенко В. Б., Демин Д. В., Журавлев В. К. Термолюминесцентный анализ пород из района Тунгусского падения.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 227—231.

32. Василенко В. Б., Журавлев В. К., Лысаков В. С. Термолюминесцентный анализ пород из района Тунгусского падения.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 4.

33. Васильев Н. В. Тунгусская катастрофа 1908 года и ее влия-

ние на здоровье населения Тунгусско-Чунского района Красноярского края.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 134—139.

34. Васильев Н. В. Основные итоги и дальнейшее направление изучения Тунгусского падения Комплексной самодеятельной экспедицией при Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 14—15.

35. Васильев Н. В. О влиянии пожара, вызванного падением Тунгусского метеорита, на лес.— В кн.: Горение и пожары в лесу. Красноярск, 1973, с. 223—227.

36. Васильев Н. В. Состояние проблемы Тунгусского метеорита на начало 1974 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 3—12.

37. Васильев Н. В. Проблема Тунгусского метеорита.— Земля и Вселенная, 1975, № 1, с. 29—35.

38. Васильев Н. В. Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы астрономии и геодезии. М., 1977, с. 88—106.

39. Васильев Н. В. Послесловие.— В кн.: Вронский Б. И. Тропой Кулика. М., Мысль, 1977, с. 210—220.

40. Васильев Н. В., Батищева А. Г. Влияние Тунгусской катастрофы на мутационный фон у сосны.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 7—9.

41. Васильев Н. В., Батищева А. Г. О связи ускоренного возобновления леса с траекторией падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 149—160.

42. Васильев Н. В., Бояркина А. П. О проблеме притока метеорной материи на Землю.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, Дониш, 1975, с. 87—92.

43. Васильев Н. В., Ковалевский А. Ф. О путях дальнейшего изучения проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 3—15.

44. Васильев Н. В., Львов Ю. А. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— Природа, 1974, № 3, с. 99—101.

45. Васильев Н. В., Фаст Н. П. О связи появления серебристых (мезосферных) облаков со свечением ночного неба.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 1. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1970, с. 91—93.

46. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Новые материалы о «светлых ночах» лета 1908 г.— В кн.: Физика мезосферных (серебристых) облаков. Рига, Зинатне, 1970, с. 95—101.

47. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Новые материалы об оптических аномалиях лета 1908 года.— В кн.: Современное состояние пробле-

мы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 12.

48. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Космофизические связи мезосферных облаков.— В кн.: Физика мезосферных облаков. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 10—11.

49. Васильев Н. В., Фаст Н. П. О связи мезосферных облаков с некоторыми геофизическими явлениями.— В кн.: Симпозиум по серебристым облакам МАМФА/МАГА, МГГС, 15-я Генеральная ассамблея. М., 1971, с. 14—15.

50. Васильев Н. В., Фаст Н. П. О связи мезосферных облаков с некоторыми космофизическими явлениями.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 64—72.

51. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Космофизические связи мезосферных облаков.— В кн.: Тезисы докладов, представленных на Симпозиум «Взаимодействие космической пыли с атмосферой», 8—11 октября 1974 г., Ашхабад. М., 1974, с. 5—6.

52. Васильев Н. В., Фаст Н. П. Границы зон оптических аномалий лета 1908 года.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 112—113.

53. Васильев Н. В., Филимонова В. А. Библиография литературы о Тунгусском метеорите.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 187—209.

54. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Ковалевский А. Ф. Об аномальных оптических явлениях лета 1908 г.— Бюл. ВАГО, 1965, № 36, с. 60—65.

55. Васильев Н. В., Иванова Г. М., Львов Ю. А. Новое о веществе Тунгусского метеорита.— Природа, 1973, № 7, с. 99—101.

56. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Кривякова Э. Н., Николаев А. В. Некоторые методические аспекты выявления техногенных загрязнений биосферы и возможности их использования для санитарно-гигиенических оценок.— В кн.: Материалы съезда гигиенистов и санитарных врачей. Баку, 1975, с. 122—123.

57. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Василенко В. Б., Демин Д. В. О возможных радиационных эффектах, связанных со взрывом Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 9—11.

58. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Львов Ю. А., Плеханов Г. Ф. Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 5—20.

59. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Блохина К. Ф. О накоплении техногенных загрязнений в торфяной залежи северных районов Сибири.— В кн.: Тезисы докладов VII симпозиума «Биологические проблемы Севера». Петрозаводск, 1976, с. 33—35.

60. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Ефремов В. Н., Ковалевский А. Ф., Коржинская С. В. Некоторые результаты статистической обработки частоты появления мезосферных облаков и процесса выпадения космической пыли.— В кн.: Тезисы докладов 1-го

Всесоюзного симпозиума по оптическим исследованиям верхней атмосферы. Тбилиси, Мецниереба, 1975, с. 21.

61. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Назаренко М. К., Апанасенко В. В., Ефремов В. Н. Динамика притока сферической фракции метеорной пыли на поверхность Земли.— *Астроном. вестн.*, 1975, № 3, с. 178—183.

62. Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К., Львов Ю. А., Фаст В. Г. Состояние проблемы Тунгусского метеорита на 1971 г.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 3—5.

63. Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К., Львов Ю. А., Фаст В. Г. Современное состояние исследований Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 4—14.

64. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Демин Д. В., Аммосов А. Д., Батищева А. Г. О некоторых аномальных эффектах, связанных с падением Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 71—87.

65. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Журавлева Р. К., Козалевский А. Ф., Плеханов Г. Ф. Ночные светящиеся облака и оптические аномалии, связанные с падением Тунгусского метеорита. М., Наука, 1965, 112 с.

66. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Львов Ю. А., Плеханов Г. Ф., Фаст В. Г. Изучение проблемы Тунгусского метеорита Комплексной самостоятельной экспедицией.— В кн.: Итоги исследований по математике и механике за 50 лет. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 137—149.

67. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Ошаров А. Б., Ерочкина А. И., Трухачев Г. А. Гипотеза профессора П. Л. Драверта в свете результатов экспедиции 1960 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 173—176.

68. Васильев Н. В., Бояркина А. П., Гольдин В. Д., Гришин Ю. А., Грязнова С. Н., Меняйцева Т. А. Материалы к оценке притока сферической фракции метеорной пыли на Землю.— В кн.: Проблемы космической физики. Вып. 10. Киев, Вища школа, 1975, с. 84—89.

69. Васильев Н. В., Журавлев В. К., Заздравных Н. П., Приходько Т. В., Демин Д. В., Демина Л. Н. О связи серебристых облаков с некоторыми параметрами ионосферы.— В кн.: Доклады Третьей сибирской конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1964, с. 302—303.

70. Васильев Н. В., Вронский Б. И., Демин Д. В., Журавлев В. К., Иванова Г. М., Львов Ю. А., Меняйцева Т. А. Силикатные сферулы в торфах района падения Тунгусского метеорита.— *Докл. АН СССР*. 1971, т. 199, № 6, с. 1400—1402.

71. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И., Ваулин П. П., Грязнова С. Н., Меняйцева Т. А., Иванова Г. М. Поиски вещества

Тунгусского метеорита в 1968—1970 гг.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 11—12.

72. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Антонов И. В., Ваулин П. П., Вронский Б. И., Гришин Ю. А., Грязнова С. Н., Менявцева Т. А. О сборе и изучении мелкодисперсного космического вещества в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: XIV метеоритная конференция, 14 — 18 декабря 1970 г., Москва. М., 1970, с. 20—21.

73. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И., Гришин Ю. А., Иванова Г. М., Менявцева Т. А., Грязнова С. Н., Ваулин П. П. Поиски мелкодисперсного космического вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 141—146.

74. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Гришин Ю. А., Вронский Б. И., Иванова Г. М., Менявцева Т. А., Ваулин П. П., Грязнова С. Н. Поиски вещества Тунгусского метеорита в торфах района междуречья Подкаменной и Нижней Тунгусок.— В кн.: Проблемы космохимии. Киев, Наукова думка, 1974, с. 60—69.

75. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Иванова Г. М., Гришин Ю. А., Шульга Н. П., Салина А. С., Грязнова С. Н., Менявцева Т. А. Новые данные о предполагаемом космическом веществе в районе Тунгусской катастрофы.— В кн.: Проблемы космической физики. Вып. 9. Киев, Вища школа, 1974, с. 79—83.

76. Васильев Н. В., Собонович Э. В., Алексеева К. Н., Бояркина А. П., Ковалюх Н. Н., Разин С. А., Смирнова А. В., Шнитке В. Э. Метеорное вещество в торфах отдаленных районов Красноярского края.— В кн.: Всесоюзный симпозиум «Проблемы радиометеорных исследований атмосферы». Харьков, 1977, с. 25—26.

77. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Долгов Ю. А., Гришин Ю. А., Вронский Б. И., Ваулин П. П., Менявцева Т. А., Иванова Г. М., Грязнова С. Н., Шульга Н. П. Поиски предполагаемого кометного вещества в районе взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Тезисы докладов, представленных на XIII пленум Комиссии по кометам и метеорам, 1—5 ноября 1971 г., Киев, М., 1971, с. 3—4.

78. Васильев Н., Демин Д., Ероховец А., Журавлев В., Журавлева Р., Кандыба Ю., Колобкова Г., Краснов В., Кувшинников В., Матушевский В., Плеханов Г., Шикалов Л. По следам Тунгусской катастрофы. Томск, 1960. 160 с.

79. Вестфаль А. Р., Фаст В. Г. К выявлению полей видимости мезосферных облаков математическим методом.— В кн.: Физика мезосферных облаков. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. II.

80. Вестфаль А. Р., Устинов Ю. К., Фаст В. Г. О вероятности разрушения кратеров при ударном кратерообразовании.— В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 89—91.

81. Вишневский С. А. Некоторые рудные минералы в импактных стеклах Попигайской структуры.— В кн.: Методология и методика

геологических и геофизических исследований в Сибири. Новосибирск, 1975, с. 105—115.

82. Вишневский С. А. О происхождении обогащенного никелем троилит-пирротина в импактитах Попигойской структуры.— Геол. и геофизика, 1976, № 7, с. 110—112.

83. Вишневский С. А., Пальчик Н. А. Графит в породах Попигойской структуры: разрушение и переход в другие фазы системы углерода.— Геол. и геофизика, 1975, № 1, с. 67—75.

84. Вишневский С. А., Ковалева Л. Т., Пальчик Н. А. Козсит в породах Попигойской структуры.— Геол. и геофизика, 1974, № 6, с. 140—145.

85. Вишневский С. А., Маслов М. А., Пальчик Н. А., Пономарев Г. Я. Козсит в породах Карской структуры.— Докл. АН СССР 1977, т. 232, № 2, с. 446—448.

86. Вишневский С. А., Доильницын Е. Ф., Долгов Ю. А., Перцева А. П. Изотопный состав углерода графитов и алмазов из пород Попигойской структуры.— В кн.: Тезисы докладов V Всесоюзного симпозиума по геохимии стабильных изотопов. Ч. II. М., 1974, с. 167—168.

87. Вишневский С. А., Долгов Ю. А., Ковалева Л. Т., Пальчик Н. А. Стишовит в породах Попигойской структуры.— Докл. АН СССР, 1975, т. 221, № 5, с. 1167—1169.

88. Вишневский С. А., Долгов Ю. А., Ковалева Л. Т., Пальчик Н. А. Стишовит в породах Попигойской структуры.— Геол. и геофизика, 1975, № 10, с. 149—156.

89. Владимиров Е. И. Падение метеорита Тасеево в 1936 году.— В кн.: Метеориты Сибири. Новосибирск, 1971, с. 12—17.

90. Вопросы метеоритики (проблема Тунгусского метеорита). Сб. статей. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976. 176 с.

91. Воробьев В. А., Демин Д. В. Новые результаты исследования термических поражений лиственниц в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 13—15.

92. Воробьев В. А., Демин Д. В. Новые результаты исследования термических поражений лиственниц в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 58—63.

93. Воробьев В. А., Ильин А. Г., Шкута Б. Л. Изучение термических поражений веток лиственниц, переживших Тунгусскую катастрофу.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 110—117.

94. Вронский Б. И. Тайна Тунгусской катастрофы. Падение метеорита или ядерный взрыв?—Природа, 1960, № 3, с. 88—91.

95. Вронский Б. И. Кто он, таинственный пришелец?— Вокруг света, 1960, № 8, с. 1—7; № 9, с. 39—43; № 10, с. 22—25.

96. Вронский Б. И. Краткий обзор исследований внеземной пыли.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 41—50.

97. Вронский Б. И. Тропой Кулика. М., Мысль, 1968. 254 с.

98. Вронский Б. П. Тропой Кулпка (повесть о Тунгусском метеорите). Изд. 2-е, доп. М., Мысль, 1977. 222 с.

99. Глухов Г. Г., Резчиков В. И., Бояркина А. П. Изучение загрязнения атмосферы и почв путем анализа торфов нейтронно-активационным методом.— В кн.: Тезисы IV Всесоюзного совещания по активационному анализу. Тбилиси, 1977, с. 216.

100. Демин Д. В. О среднем квадратичном отклонении азимутов поваленных деревьев как параметре вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 94—96.

101. Демин Д. В. Алгоритм статистической оценки параметров Тунгусского падения по данным наземных наблюдений.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 235—237.

102. Демин Д. В. Об одном методе исследования слабых аномалий поля измерений.— В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 92—93.

103. Демин Д. В., Журавлев В. К., Демина Л. Н. К вопросу о геомагнитном эффекте, вызванном Тунгусским метеоритом.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 26.

104. Долгов Ю. А. Исследование состава газов из включений в тектитах и космической пыли.— В кн.: Метеоритика. Вып. 33. М., Наука, 1974, с. 122—129.

105. Долгов Ю. А. Атмосферы плавления во включениях импактных земных и космических объектов.— В кн.: Тезисы докладов на V Всесоюзном совещании по термобарогеохимии. Уфа, 1976, с. 16.

106. Долгов Ю. А., Вишневецкий С. А. Включения в ударно-метаморфизованном кварце из пород Попигайской структуры.— В кн.: Минералогия эндогенных образований. Новосибирск, 1974, с. 51—64.

107. Долгов Ю. А., Вишневецкий С. А. Высокобарические минералы и включения в импактитах.— В кн.: Генетические исследования в минералогии. Новосибирск, 1976, с. 12—16.

108. Долгов Ю. А., Шугурова Н. А. Результаты исследования газов из включений в лунных стеклах.— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М., Наука, 1974, с. 356—362.

109. Долгов Ю. А., Шугурова Н. А. Изучение тектитов по включениям.— В кн.: Генетические исследования в минералогии. Новосибирск, 1976, с. 16—21.

110. Долгов Ю. А., Шугурова Н. А. Включения в стеклянных шариках и осколках лунного грунта (Луна-16).— В кн.: Генетические исследования в минералогии. Новосибирск, 1976, с. 22—25.

111. Долгов Ю. А., Вишневецкий С. А., Шугурова Н. А. Предварительное изучение газово-жидких включений в стекловатых и оплавленных породах Попигайской впадины.— В кн.: Тезисы докладов IV Регионального совещания по термобарогеохимии процес-

сов минералообразования. Ростов-на-Дону, 1973, с. 197—198.

112. Долгов Ю. А., Вишневский С. А., Шугурова Н. А. Включения газов в импактитах.— В кн.: Термобарогеохимия и генетическая минералогия. Новосибирск, 1975, с. 129—140.

113. Долгов Ю. А., Погребняк Ю. Ф., Шугурова Н. А. Состав и давления газов во включениях тектитов.— Геохимия, 1969, № 5, с. 603—609.

114. Долгов Ю. А., Погребняк Ю. Ф., Шугурова Н. А. Состав газов и их давления во включениях некоторых тектитов и силикаглоссов.— Докл. АН СССР, 1971, т. 198, № 1, с. 202—205.

115. Долгов Ю. А., Шугурова Н. А., Погребняк Ю. Ф. Газовые включения в тектитах (молдавитах).— Докл. АН СССР, 1969, т. 184, № 6, с. 1405—1408.

116. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А., Лаврентьев Ю. Г., Гришин Ю. А., Львов Ю. А. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М.; Наука, 1973, с. 147—149.

117. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А., Львов Ю. А., Лаврентьев Ю. Г., Гришин Ю. А. Химический состав силикатных шариков из торфов района падения Тунгусского метеорита.— Докл. АН СССР, 1971, т. 200, № 1, с. 201—204.

118. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А., Менявцева Т. А., Гришин Ю. А., Журавлев В. К. О химическом составе силикатных микросферул в торфах района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: XIV метеоритная конференция, 14—18 декабря 1970 г., Москва. М., 1970, с. 21—22.

119. Долгов Ю. А., Гришин Ю. А., Шугурова Н. А., Лаврентьев Ю. Г., Журавлев В. К., Иванова Г. М. О химическом составе сферул из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 49.

120. Долгов Ю. А., Базаров Л. Ш., Бакуменко И. Т., Гибшер Н. А., Чупин В. П., Чупина Л. Ю., Вишневский С. А., Шугурова Н. А. Газовожидакие и расплавные включения в минералах и их генетическое значение.— В кн.: Геохимия. Минералогия. Петрография. (Доклады советских геологов на XXV сессии Международного геологического конгресса). М., Наука, 1976, с. 251—261.

121. Драгавцев В. А., Лаврова Л. А., Плеханова Л. Г. Эколого-генетический анализ линейного прироста сосны обыкновенной в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 132—141.

122. Емельянов Ю. М. Радиофотографическое исследование срезов деревьев из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 153—158.

123. Емельянов Ю. М. О загадочной «сибирской тьме» 18 сентября 1938 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 210—217.

124. Емельянов Ю. М. О распространении «сибирской тьмы». — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 168—169.

125. Емельянов Ю. М., Некрасов В. И. Об аномальном росте древесной растительности в районе падения Тунгусского метеорита. — Докл. АН СССР, 1960, т. 135, № 5, с. 1266—1269.

126. Емельянов Ю. М., Некрасов В. И. Радиофотография древесины из района падения Тунгусского метеорита. — Докл. АН СССР, 1963, т. 148, № 3, с. 1418—1421.

127. Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Некрасов В. И. Использование многофакторного дисперсионного анализа для оценки факторов, оказавших влияние на изменение хода роста древесной растительности в районе Тунгусского падения. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 134—136.

128. Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Шмырев И. К. О расположении зоны с увеличенным после 1908 года приростом старых деревьев в СЗ секторе района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 15—16.

129. Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Шмырев И. К. О расположении зоны с увеличенным после 1908 года приростом старых деревьев в СЗ секторе района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 161—165.

130. Ероховец А. Метеорит или звездный корабль? (Тунгусское диво). — Сибирские огни, 1960, № 10, с. 114—137; № 11, с. 131—157; № 12, с. 117—150.

131. Журавлев В. К. К вопросу об интерпретации геомагнитного эффекта 1908 года. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 195—197.

132. Журавлев В. К. О световой энергии Тунгусского взрыва. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 19—20.

133. Журавлев В. К. К оценке световой энергии Тунгусского взрыва. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 120—122.

134. Журавлев В. К., Демин Д. В. К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 99—104.

135. Журавлев В. К., Демин Д. В., Демина Л. Н. О механизме магнитного эффекта Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 154—161.

136. Журавлев В. К., Кошелев В. А., Васильев Н. В. Поиски Восточного вывала. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 163—167.

137. Журавлев В. К., Демин Д. В., Василенко В. Б., Лысков В. С. О термолюминесценции минералов в районе падения

Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 118—119.

138. Журавлев В. К., Демин Д. В., Вронский Б. И., Иванова Г. М., Егоршин А. О., Ильина Л. П., Сливина Л. М., Потехина Л. Н., Левченко М. Н. Результаты шлихового опробования и спектрального анализа почв из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 99—111.

139. Журавлев И. И. О возможной причине повреждения ветвей лиственницы в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 118—119.

140. Зенкин Г. М., Ильин А. Г. О лучевом ожоге деревьев в районе взрыва Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 129—140.

141. Зенкин Г. М., Ильин А. Г., Егоршин А. И., Бояркина А. П., Веняминов С. Е., Шикалов Л. Ф. Характеристика деревьев, переживших Тунгусскую катастрофу в ее эпицентре. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 84—86.

142. Иванова Г. М., Кузнецова И. К. Железный метеорит Тобычан. — В кн.: Метеоритика. Вып. 35. М., Наука, 1976, с. 47—52.

143. Иванова Г. М., Львов Ю. А. Результаты поисков мелкодисперсного космического вещества в районе Тунгусского падения. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 23—24.

144. Иванова Г. М., Брувер Р. В., Львов Ю. А., Боронтова Н. Н. О поисках вещества Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 145—148.

145. Иванова Г. М., Львов Ю. А., Ковалевский А. Ф. Новые опросные данные о падении Тунгусского метеорита, полученные в 1964 году. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 36—39.

146. Иванова Г. М., Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В. Выпадение космического вещества на поверхность Земли. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1975, 120 с.

147. Ильин А. Г., Воробьев В. А., Байер В. В. Связь параметров пораженных лиственниц со световой энергией. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 105—109.

148. Ильин А. Г., Воробьев В. А., Шкута Б. Л., Гордов Е. С. Световой ожог деревьев, вызванный Тунгусским метеоритом. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 18—19.

149. Ильина Л. П., Сливина Л. М., Демин Д. В., Журавлев В. К., Потехина Л. Н., Левченко М. Н., Вронский Б. И., Егоршин А. О., Иванова Г. М. Результаты спектрального анализа проб почвы из района Тунгусского падения. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 25—27.

150. **Кандыба Ю. Л.** Результаты опросных работ в некоторых районах Западной Сибири.— В кн.: Метеориты Сибири. Новосибирск, 1971, с. 31—34.
151. **Кандыба Ю. Л.** В стране огненного бога Огды. Кемерово, 1967, 119 с.
152. **Кандыба Ю. Л., Лисенков Э. И.** Неразысканные метеориты юга Сибири.— В кн.: Метеориты Сибири. Новосибирск, 1971, с. 26—30.
153. **Кандыба Ю. Л., Болесто Ю. Ф., Кротова З. А., Корзенникова А. А., Некрытов Н. И.** Экспедиция на Патомский кратер.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 218—220.
154. **Кириченко Л. В.** К вопросу образования локального следа выпадений от взрыва космического тела в 1908 году.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 28.
155. **Кириченко Л. В.** О проверке гипотезы «ядерного взрыва» Тунгусского метеорита по радиоактивности почв на следе выпадения продуктов взрыва.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 88—101.
156. **Кириченко Л. В.** К вопросу образования локального следа выпадений от взрыва космического тела в 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 111—126.
157. **Кириченко Л. В., Гречушкина М. П.** О радиоактивности почвы и растений в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 139—152.
158. **Кириченко Л. В., Николишин И. Я.** О возможности определения природы взрыва Тунгусского космического тела по следам нейтронной активации грунта в эпицентре взрыва.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 127—131.
159. **Ковалевский А. Ф.** К вопросу о механизме геомагнитных эффектов крупных взрывов.— В кн.: Труды Сибирского физико-технического института. Вып. 41. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 87—91.
160. **Ковалевский А. Ф.** Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 187—194.
161. **Ковалевский А. Ф.** Сихотэ-Алинский метеорит и магнитное поле Земли.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 166—167.
162. **Ковалевский А. Ф., Васильев Н. В.** К вопросу о свечении ночного неба летом 1908 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 198—202.
163. **Ковалевский А. Ф., Фаст В. Г., Иконникова Г. М., Некрасова Л. Н.** Магнитометрические работы в районе падения Тун-

гусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 113—124.

164. Ковалевский А. Ф., Резников И. В., Снопов Н. Г., Ошаров А. Б., Журавлев В. К. Некоторые данные о распределении химических элементов в почвах и растениях в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 125—133.

165. Коженкова З. П., Брок В. А., Федюшина Л. П., Носкова Г. Д., Трифонова Л. И., Пархоменко Л. М., Носкова Е. В. Синоптико-метеорологические условия лета 1908 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 179—186.

166. Колесников В. И. Аномальное возобновление древесной растительности в районе Тунгусской катастрофы.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 73—83.

167. Колесников Е. М., Люль А. Ю., Иванова Г. М. Нейтроноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 87—99.

168. Колесников Е. М., Люль А. Ю., Иванова Г. М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 года. II. Исследование химического состава силикатных микросферул.— Астроном. вестн., 1977, т. XI, № 4, с. 209—218.

169. Коломенский В. Д., Чупина Л. Ю., Иванова Г. М., Лаврентьев Ю. Г., Поспелова Л. Н. О включении в оливине палласита Брагин.— В кн.: Метеоритика. Вып. 37. М., Наука, 1978, с. 140—143.

170. Коненкин В. Г. Сообщения очевидцев о Тунгусском метеорите 1908 года.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 31—35.

171. Коржинская С. В., Ковалевский А. Ф., Васильев Н. В., Маркова А. К. Исследование связи между частотой появления мезосферных облаков, эмиссиями ночного неба OH и NaD и вторичным космическим излучением.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 104—115.

172. Космическое вещество на Земле. Сб. статей. Новосибирск, Наука, 1976, 120 с.

173. Кошелев В. А. Работы на озере Чеко и их предварительные результаты.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 168—170.

174. Кошелев В. А. О кратероподобном образовании в районе верховьев реки Верхняя Лакура.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 171—173.

175. Крейделев Ф. П. Заседание объединенного Ученого совета по геолого-географическим работам.— Геол. и геофизика, 1962, № 5, с. 140—141.

176. Кренделев Ф. П., Плеханов Г. Ф. Мутационное действие Тунгусского взрыва 1908 года и некоторых других факторов.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 27—29.
177. Кротова З. А., Кандыба Ю. Л. Исследование Патомского кратера.— В кн.: Метеоритика. Вып. 27. М., Наука, 1966, с. 134—138.
178. Кувшинников В. М., Колобкова Г. П. К вопросу о падении глыб Тунгусского метеорита в районе Лакурского хребта.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 159—162.
179. Кулик Л. А. Картина вывала и ожога в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 15—19.
180. Левченко М. А., Терентьева А. А. Предварительные результаты спектрального определения примесей в пробах торфа района взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 16—19.
181. Лисенков Э. И., Иванова Г. М. Новый сибирский метеорит Марковка.— В кн.: XIV метеоритная конференция, 14—18 декабря 1970 г., Москва. М., 1970, с. 45.
182. Лисенков Э. И., Иванова Г. М. Каменный метеорит Марковка, найденный в 1967 г. на Алтае.— Докл. АН СССР, 1971, т. 200, № 1, с. 205—207.
183. Лисенков Э. И., Иванова Г. М. О строении и составе каменного метеорита Марковка.— В кн.: Метеориты Сибири. Новосибирск, 1971, с. 5—11.
184. Лисенков Э. И., Иванова Г. М. Предварительные результаты исследования каменного метеорита Марковка.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 95—99.
185. Львов Ю. А. О возможности нахождения космического вещества в торфе.— В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 22—23.
186. Львов Ю. А. О нахождении космического вещества в торфе.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 140—144.
187. Львов Ю. А. Методика отбора и обработки торфа для выделения мелкодисперсной минеральной фракции.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 90—93.
188. Львов Ю. А., Васильев Н. В. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 53—57.
189. Львов Ю. А., Иванова Г. М. Провальные (термокарстовые) депрессии на крупнобугристых торфяниках района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 48—58.
190. Львов Ю. А., Карташев А. А. Новые данные о рыхлом кольце.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 27.

191. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Иванова Г. М. Метод исследования динамики выпадений промышленной пыли на больших площадях.— Гигиена и санитария, 1974, № 8, с. 97—98.

192. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Ваулин П. П., Грязнова С. Н., Менявцева Т. А. Зола в слое торфа 1908 года.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 94—98.

193. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Ошаров А. Б., Трухачев Г. А., Ерошкина А. И. Проверка одной гипотезы.— Природа, 1961, № 7, с. 98—99.

194. Львов Ю. А., Васильев Н. В., Антонов И. В., Гришин Ю. А., Ваулин П. П., Менявцева Т. А. Методы обнаружения космического вещества в некоторых природных объектах. Новосибирск, 1971, 8 с.

195. Львов Ю. А., Лагутская Л. И., Иванова Г. М., Мильчевский В. И., Райфельд А. Ф., Говорухин В. И., Бояркина А. П. Болота района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 34—47.

196. Метеориты Сибири (материалы к совещанию «Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита», 14—16 апреля 1971 г.). Новосибирск, 1971, 40 с.

197. Некрасов В. И. Изучение роста леса в районе падения Тунгусского метеорита.— Лесное хозяйство, 1962, № 1, с. 22—24.

198. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. Повлияла ли Тунгусская катастрофа на рост леса?— Природа, 1962, № 2, с. 102—105.

199. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. Особенности роста древесной растительности в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 59—72.

200. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. Изучение роста леса в связи с проблемой Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 152—160.

201. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. Характеристика «докатастрофного» леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 27. М., Наука, 1966, с. 128—133.

202. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. К вопросу восстановления таксационных характеристик «докатастрофного» леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 123—126.

203. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. Некоторые итоги и задачи изучения роста леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 127—133.

204. Некрытов Н. И., Журавлев В. К. Визуальное определение границ вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 87—93.
205. Плеханов Г. Ф. Предварительные итоги двухлетних работ Комплексной самодеятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 3—21.
206. Плеханов Г. Ф. Некоторые итоги работы Комплексной самодеятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 170—176.
207. Плеханов Г. Ф. О действительных и мнимых последствиях падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 45—48.
208. Плеханов Г. Ф., Плеханова Л. Г. О мутационных последствиях падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 35—37.
209. Плеханов Г. Ф., Васильев Н. В., Кошелев В. А. Поиски Тунгусского метеорита продолжаются.— Наука и жизнь, 1961, № 5, с. 76—79.
210. Плеханов Г. Ф., Толстых Л. Г., Привалов Г. Ф. О мутационных последствиях Тунгусского взрыва 1908 года.— В кн.: Экспериментальный мутагенез животных, растений и микроорганизмов. Т. II. 1965, с. 60.
211. Плеханов Г. Ф., Плеханова Л. Г., Привалов Г. Ф. О мутационных последствиях Тунгусского взрыва 1908 г.— Изв. СО АН СССР, 1968, № 5. Серия биол.-мед. наук, вып. 1, с. 44—48.
212. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О геомагнитном эффекте взрыва Тунгусского метеорита— Изв. вузов. Физика, 1960, № 2, 236—237.
213. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О влиянии взрыва Тунгусского метеорита на геомагнитное поле.— Геол. и геофизика, 1961, № 6, с. 94—96.
214. Плеханов Г. Ф., Ковалевский А. Ф., Журавлев В. К., Васильев Н. В. О поляризационном эффекте, вызванном падением Тунгусского метеорита.— Изв. вузов. Физика, 1963, № 5, с. 177—179.
215. Плеханов Г. Ф., Васильев Н. В., Журавлев В. К., Иванова Г. М., Ковалевский А. Ф. Проблема космической пыли и перспективы ее изучения в Сибири.— В кн.: Сборник тезисов докладов Первой научной сессии вузов, объединенных Зап.-Сиб. советом по координации научно-исследовательских работ. Вып. 1. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 118—119.
216. Плеханов Г. Ф., Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К., Зенкин Г. М., Ковалевский А. Ф., Львов Ю. А., Тульский А. С., Фаст В. Г. Некоторые итоги изучения проблемы Тун-

гусского метеорита.— Геол. и геофизика, 1963, № 1, с. 11—123.

217. Плеханов Г. Ф., Бояркина А. П., Васильев Н. В., Демин Д. В., Журавлев В. К., Зенкин Г. М., Ильин А. Г., Иванова Г. М., Ковалевский А. Ф., Львов Ю. А., Некрытов Н. И., Ошаров А. Б., Фаст В. Г. Некоторые итоги изучения проблемы Тунгусского метеорита.— В кн.: Сборник тезисов докладов Первой научной сессии вузов, объединенных Зап.-Сиб. советом по координации научно-исследовательских работ. Вып. 1. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 64—65.

218. Проблема Тунгусского метеорита. Сб. статей. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, 214 с.

219. Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, 238 с.

220. Проблемы метеоритики. Сб. статей. Новосибирск, Наука, 1975, 148 с.

221. Разин С. А. О применении метода наименьших квадратов к анализу направленности «ожоговых» плоскостей веток в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Материалы итоговой научной конференции по математике и механике за 1970 год. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1970, с. 120—122.

222. Разин С. А. К анализу направленности «ожоговых» плоскостей веток в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 37—38.

223. Разин С. А. О локальном наслоении выбросов при ударном кратерообразовании.— В кн.: Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 147—148.

224. Разин С. А. Оценка координат источника ожоговых повреждений по распределению интенсивности поражающего воздействия в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 66—71.

225. Разин С. А., Фаст В. Г. О симметрии случайных полей.— В кн.: Материалы итоговой научной конференции по математике и механике за 1970 г. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1970, с. 118—120.

226. 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.

227. Разин С. А., Разина Г. К., Фаст В. Г. Насыщение кратерами и наслоение выбросов при ударном кратерообразовании на поверхности небесного тела.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, 1974, с. 6—7.

228. Разин С. А., Разина Г. К., Фаст В. Г. Характеристика насыщенности планетной поверхности ударными кратерами, ос-

нованная на числе неповрежденных кратеров.— В кн.: *Астрономия и геодезия*. Вып. 5. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1975, с. 68—80.

229. **Разина Г. К., Разин С. А.** О среднем числе «чистых» кратеров.— В кн.: *Материалы Третьей научной конференции по математике и механике*. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 115—116.

230. **Разина Г. К., Разин С. А.** О численном моделировании процесса ударного кратерообразования.— В кн.: *Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике*. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 148—149.

231. **Сидорас С. Д., Бояркина А. П.** Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: *Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 39.

232. **Сидорас С. Д., Бояркина А. П.** О результатах палеомагнитных исследований в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: *Вопросы метеоритики*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 64—73.

233. **Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита** (материалы совещания 14—16 апреля 1971 г., Новосибирск). Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971. 50 с.

234. **Суслов И. М.** Опрос очевидцев Тунгусской катастрофы в 1926 г.— В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 21—30.

235. **Тарасов М. А.** Суточная активность птиц как показатель аномального свечения неба в 1908 году.— В кн.: *Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 40.

236. **Тарасов М. А.** Суточная активность птиц как показатель аномального свечения неба в 1908 г.— В кн.: *Вопросы метеоритики*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 143—148.

237. **Трухачев Г. А.** К вопросу о метеоритном кратере в бассейне реки Сым.— В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 177—178.

238. **Успехи метеоритики** (тезисы докладов XII метеоритной конференции 24—27 мая 1966 г., Новосибирск). Новосибирск, 1966. 30 с.

239. **Фаст В. Г.** Об одном применении способа наименьших квадратов.— В кн.: *Доклады Второй сибирской конференции по математике и механике*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1962, с. 123—124.

240. **Фаст В. Г.** Приложение способа наименьших квадратов к построению некоторых эмпирических функций двух переменных.— В кн.: *Доклады Второй сибирской конференции по математике и механике*. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1962, с. 124—125.

241. **Фаст В. Г.** Об ударной волне, вызванной Тунгусским метеоритом.— В кн.: *Доклады Второй сибирской конференции*

по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1962, с. 154.

242. Фаст В. Г. К определению эпицентра взрыва Тунгусского метеорита по характеру вывала леса. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 97—104.

243. Фаст В. Г. О сглаживании параметров вывала леса и аэродинамическом напоре ударной волны Тунгусского метеорита. — В кн.: Доклады Второй сибирской конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1964, с. 358.

244. Фаст В. Г. Статистическая структура полей разрушений, вызванных ударной волной Тунгусского метеорита. Автореф. канд. дис. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1966. 11 с.

245. Фаст В. Г. Некоторые результаты статистического анализа Тунгусского вывала. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 16—18.

246. Фаст В. Г. Локально-статистические характеристики разрушений лесного массива ударной волной. — Изв. Томск. политехнич. ин-та, 1967, т. 154, с. 89—90.

247. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40—61.

248. Фаст В. Г. Вывал леса, произведенный Тунгусским метеоритом. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 41—42.

249. Фаст В. Г. Оптические явления, сопровождающие падение Тунгусского метеорита, и кометная гипотеза. — В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 26—27.

250. Фаст В. Г. О траектории Тунгусского метеорита. — В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 27—28.

251. Фаст В. Г. О возможном механизме образования кольцевых поднятий в Попигайском метеоритном кратере. — В кн.: Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 137—138.

252. Фаст В. Г., Баранник А. А. Интерполяция поля направлений Тунгусского вывала. — В кн.: Материалы итоговой научной конференции по математике и механике за 1970 год. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1970, с. 127—128.

253. Фаст В. Г., Фаст Н. П. О влиянии метеорных потоков на выпадение осадков. — В кн.: Тезисы докладов, представленных на XIII Пленум Комиссии по кометам и метеорам (1—5 ноября 1971 г., Киев). М., 1971, с. 26.

254. Фаст В. Г., Фаст Н. П. Общая характеристика активности мезосферных облаков за весь период их наблюдений. — В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 4. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 53—76.

255. Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А. О поле направ-

лений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.

256. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Бакланов М. В. Разрушения, вызванные ударной волной Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 62—104.

257. Фаст В. Г., Бояркина А. П., Вестфаль А. Р. К вопросу о насыщении планетной поверхности метеоритными кратерами. — В кн.: Тезисы докладов XV метеоритной конференции. М., 1972, с. 19.

258. Фаст В. Г., Ковалевский А. Ф., Плеханов Г. Ф. Некоторые замечания к статье Г. М. Идлиса и Э. В. Корягиной «О кометной природе Тунгусского метеорита». — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 203—211.

259. Фаст Н. П. К изучению метеорологических и ионосферных условий появления серебристых облаков в Сибири. — Метеорологические исследования, 1966, № 12, с. 106—110.

260. Фаст Н. П. К изучению глобального характера распределения серебристых облаков. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 232—234.

261. Фаст Н. П. Наблюдения серебристых облаков в Сибири (1965—1968 гг.). — В кн.: Физика мезосферных (серебристых) облаков. Рига, Зинатне, 1970, с. 159—164.

262. Фаст В. Г. О возможной связи серебристых облаков с  $E_s$  ионосферы. — В кн.: Материалы Второй научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972, с. 194.

263. Фаст Н. П. Каталог появлений серебристых облаков по мировым данным. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1972. 194 с.

264. Фаст Н. П. Наблюдения серебристых облаков Томским отделением ВАГО в 1969—1970 гг. — Астроном. вестн., 1972, т. VI, № 2, с. 131—133.

265. Фаст Н. П. Активность и пространственно-временные характеристики мезосферных облаков. Автореф. канд. дис. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974. 13 с.

266. Фаст Н. П. О частоте появлений серебристых облаков. — Метеорологические исследования, 1975, № 22, с. 137—142.

267. Фаст Н. П. К вопросу о климатологии мезосферных (серебристых) облаков. — В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 5. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1975, с. 81—95.

268. Фаст Н. П. О временном ходе активности серебристых облаков. — В кн.: Оптические исследования верхней атмосферы. Ужгород, 1977, с. 50—51.

269. Фаст Н. П., Залевская В. В. О возможном влиянии Тунгусского метеорита на выпадение осадков. — В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. I. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1970, с. 46—51.

270. Фаст Н. П., Зыкова Л. Г. О взаимной вариации активности мезосферных облаков и электронной плотности спорадического слоя ионосферы по наблюдениям в Томске в 1963—1972 гг.— В кн.: Материалы Пятой научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1975, с. 158—159.

271. Фаст Н. П., Зыкова Л. Г. Об активности мезосферных облаков и плотности спорадического слоя  $E_s$  ионосферы по наблюдениям в Томске (1963—1972 гг.).— В кн.: Тезисы докладов 1-го Всесоюзного симпозиума по оптическим исследованиям верхней атмосферы. Тбилиси, Мецниереба, 1975, с. 24.

272. Фаст Н. П., Литвинова Е. П. Наблюдения метеорного потока Драконид 1972 года в Томске.— В кн.: Материалы Третьей научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 104.

273. Фаст Н. П., Морозов А. М. Наблюдения серебристых облаков летом 1973—74 гг.— В кн.: Астрономия и геодезия. Вып. 7. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1979, с. 58—61.

274. 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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 42—43.

275. Фаст Н. П., Павлова Л. В. Режим ветра в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 83—89.

276. Фаст Н. П., Табакова Л. Г. Наблюдения серебристых облаков в Сибири в 1971—1972 гг.— В кн.: Материалы Третьей научной конференции по математике и механике. II. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1973, с. 101—103.

277. Фаст Н. П., Фаст В. Г. О возможном влиянии падения Тунгусского метеорита на осадки лета 1908 г.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 43—44.

278. Фаст Н. П., Фаст В. Г. Об активности серебристых облаков.— В кн.: Материалы Четвертой научной конференции по математике и механике. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 135—137.

279. Фаст Н. П., Фаст В. Г. Активность и пространственно-временные характеристики мезосферных облаков.— В кн.: Тезисы докладов 2-го Всесоюзного симпозиума по оптическим исследованиям верхней атмосферы. Тбилиси, Мецниереба, 1975, с. 22.

280. Фаст Н. П., Фаст В. Г. Серийность и частота появлений мезосферных облаков.— В кн.: Тезисы докладов 1-го Всесоюзного симпозиума по оптическим исследованиям верхней атмосферы. Тбилиси, Мецниереба, 1975, с. 23.

281. Фаст Н. П., Фаст В. Г. Климатология мезосферных облаков.— В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума «Опти-

ческие исследования состава и излучения верхней атмосферы». Обнинск, 1976, с. 17.

282. Фаст Н. П., Фаст В. Г. О возможном влиянии падения Тунгусского метеорита на осадки лета 1908 года.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 132—142.

283. Фаст Н. П., Фаст В. Г. О климатологии серебристых облаков.— Метеорологические исследования, 1977, № 23, с. 73—80.

284. Шаповалова Р. Д., Лукьянов В. Б., Емельянов Ю. М., Некрасов В. И. Биостатистическая обработка лесотаксационных данных из района падения Тунгусского метеорита с использованием критерия знаков.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 137—139.

285. Шугурова Н. А., Долгов Ю. А., Иванова Г. М. Состав газовых включений в силикатных сфералах различного происхождения.— В кн.: Генетические исследования в минералогии. Новосибирск, 1976, с. 3—8.

286. Шумилова Л. В. Очерк природы района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 22—33.

287. Цветков В. И., Бояркина А. П. Результаты опроса новых очевидцев падения Тунгусского метеорита 1908 г.— В кн.: Метеорная материя в атмосфере Земли. М., Наука, 1966, с. 81—92.

288. Эпиктетова Л. Е. Показания очевидцев падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 44—45.

289. Эпиктетова Л. Е. Новые показания очевидцев падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 20—34.

290. Янговский К. Д. В поисках неизвестного.— Знание — сила, 1961, № 6, с. 16—20.

291. Vasil'ev N. V., Fast N. P. Anomalous optical phenomena caused by Tungus meteorite fall.— Gerlands Beitr. zur Geophys., Leipzig, 1972, v. 81, N 6, p. 433—438.

292. Vasil'ev N. V., Fast N. P. On connections of Mesospheric Clouds with some Geophysical Phenomena.— In: Report of Proceed. XV General Assembly, Moscow, July—August 1971, Jamar Publication, N 15, Toronto, 1972, p. 241.

293. Vasil'ev N. V., Fast N. P. On cosmophysical relations of mesospheric clouds.— In: Noctilucent clouds optical properties. Таллин, ИФА, 1973, с. 73—79.

294. Vronskij B. I. Tajemstyi Tunguske katastrofy.— Rise hvezo, 1960, v. 41, N 12, p. 234—237.

# КОСМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОРОДООБРАЗОВАНИЯ

В. Л. МАСАЙТИС

По существу, каждая горная порода в той или иной степени несет какой-то отпечаток влияния Космоса — будь то осадочная, как бы аккумуляировавшая лучистую энергию Солнца, или изверженная, возникшая в результате многократной переработки первичного космического вещества, за счет которого образовалась наша планета.

На теснейшую связь Земли с Космосом указывал в свое время еще В. И. Вернадский. Как известно, эта связь осуществляется за счет притока солнечного и галактического излучения, воздействия гравитационных и магнитных полей со стороны различных небесных тел и их ассоциаций и притока космического вещества.

Осадочная оболочка литосферы представляет собой как бы мощный конденсатор солнечной энергии. Поступление солнечной энергии в год оценивается в  $5,2 \cdot 10^{31}$  эрг, из них около 40% отражается в космическое пространство [7]. Часть инсоляционного потока, проходящего сквозь «атмосферное окно», аккумулируется в форме химической энергии в продуктах выветривания и жизнедеятельности организмов. Трансформация инсоляционного потока атмосферой и гидросферой существенно влияет на выветривание первичных горных пород, перенос и накопление продуктов их разрушения, а также на химическое осаждение эвапоритов.

Возможно, что влияние солнечной энергии не ограничивается поверхностью, а распространяется до зоны метаморфизма и гранитообразования, где эта энергия присутствует в своеобразной «минерализованной форме», будучи аккумулярована в прошлые геологические эпохи [3, 11].

Предполагают, что причиной докембрийских оледенений и образования тиллитов могут быть изменения климата при запылении атмосферы космической пылью и газами. Фанерозойские оледенения — результат интерференции земных и космических причин.

Л. И. Салоп [8] и другие исследователи допускают возможность биологических революций как результат квазипериодического усиления жесткой радиации, вызывающей мутации в организмах. В частности, во второй половине протерозоя мощные пласты биогенных пород, возможно, образовались при почти одновременном

на всей планете «биологическом взрыве» — при быстром развитии под влиянием облучения весьма бедного до того фитопланктона. Такая радиация могла быть обусловлена вспышками Сверхновых, происходящих в галактике раз в 400—500 лет.

Воздействие гравитации может рассматриваться как важный фактор, определяющий развитие некоторых геологических процессов, в частности связанных с приливным трением воздушной и водной оболочек; вероятно, лишь в незначительной степени он оказывает влияние на земную кору. Тем не менее известно, что существует связь между частотой землетрясений и вулканических извержений и короткопериодическими изменениями лунно-солнечно-приливных сил [2]. Наибольшая частота землетрясений отмечается тогда, когда Луна, Солнце и Земля находятся на одной прямой. Таким образом, намечается некоторый резонанс между эндогенными тектоническими и вулканическими процессами (в том числе приводящими к образованию некоторых типов изверженных пород) и астрономической цикличностью.

Существуют предположения о более сложных связях тектонических глобальных процессов с обращением Солнечной системы вокруг галактического центра, о влиянии приливного трения на крупные движения литосферы и т. д., однако все они носят весьма гипотетический характер.

Воздействие магнитного поля со стороны небесных тел и Галактического магнитного поля чрезвычайно мало. В частности, напряженность Галактического поля составляет всего около  $5 \cdot 10^{-6}$  Гс. Однако известно, что напряженность магнитного поля резко возрастает во время магнитных бурь в связи с изменением солнечной активности (хромосферные вспышки). Не исключено, что в геологическом прошлом возникали условия, при которых значительные изменения напряженности магнитного поля могли влиять на магнитные свойства горных пород.

Обмен веществом с космическим пространством заключается в основном в выпадении на Землю космического вещества в разных формах и вхождении его в состав земных горных пород в рассеянном состоянии. По существующим оценкам приток этого вещества на Землю составляет около  $4 \cdot 10^4$  т в год [10], по другим данным он может достигать  $10^5$  или даже  $10^6$  т в год. За всю геологическую историю Земли (4 млрд. лет) на нее могло выпасть  $10^{16}$  т космического вещества (преимущественно в форме космической пыли), количество этого вещества в породах осадочной оболочки может составлять от долей до 1% [12]. На Луне в поверхностных слоях доля вещества, отвечающего веществу углистых хондритов, составляет 1—2% [14].

Космическое вещество выпадает на Землю в форме космической пыли, микрометеоритов, метеоритов, астероидов и комет. Наиболее значителен вклад метеорных тел ( $10^{-5} < M < 10^2$  г) и болидов (главным образом с массами  $10^6$ — $10^7$  г). Тела с массой более  $10^7$  г не дают существенного вклада в приток вещества на Землю.

Крупные тела дают приток всего  $10^2$ — $10^3$  т/год. Выпадающее вещество рассеивается в земных породах, и лишь в отдельных случаях может быть установлено в них различными методами. В некоторых типах пород при благоприятных условиях накапливаются продукты переработки космического вещества и собственно частиц его — это, в первую очередь, красные глины донных отложений Тихого океана, имеющие очень малую скорость накопления вследствие аккумуляции земного материала, а также некоторые россыпи, где концентрируются устойчивые минералы космического происхождения. В отдельных случаях возможно существование ореолов повышенной концентрации такого вещества за счет падения крупных метеоритов или комет.

В россыпях в настоящее время установлен ряд минералов космического происхождения [1]: железо, камасит, алмаз-лонсдейлит, графит (клифтонит), металлический кремний, когенит, муассанит, шрейберзит, баррингерит, силициды железа, иоцит. Кроме того, известны комплексы железосодержащих и силикатных образований (в частности, стекло), возникших в результате взаимодействия падающих тел с атмосферой и литосферой.

Вместе с тем содержание этих компонентов в современных и древних россыпях весьма мало, а идентификация его во многих случаях затруднительна и неоднозначна. Существенного вклада в порообразование на Земле рассеянное космическое вещество в целом не вносит и не определяет характерных черт горных пород, являясь редко устанавливаемым акцессорным их компонентом.

Привнос космического вещества на Землю хотя и незначителен, но тем не менее непосредственно влияет на порообразование. Отмеченные выше различные другие космические факторы — излучение, воздействие гравитации и магнитного поля — влияют на порообразование в основном лишь опосредованно — через атмосферу и гидросферу.

Привнос космического вещества на Землю является, однако, гораздо более существенным фактором порообразования, если принять во внимание энергетическую сторону этого процесса.

Весь приток вещества, если полагать, что при сближении с Землей частицы имеют скорость около  $15$ — $20$  км/с, дает энергию после торможения около  $10^{23}$  эрг/год, но основная часть ее идет на нагрев верхних слоев атмосферы, быстро рассеивается и не влияет на происходящие на Земле процессы. Иное дело, когда падают крупные астероидальные или кометные тела с массой более  $100$ — $1000$  т. Они взаимодействуют не только с атмосферой [26], но и с литосферой и гидросферой, обуславливая определенные порообразующие процессы [5, 17, 19, 21]. Однако именно эти процессы и могут быть реконструированы на основании исследования определенных групп горных пород и образуемых ими морфоструктур — крупных метеоритных кратеров.

В качестве примера можно привести оценки энергии удара

Таблица 1

## Зависимость величины кратера, массы и объема преобразованных пород от энергии метеорита

| Кинетическая энергия, эрг | Преобразованные породы в первичном кратере |                        | Диаметр кратера, км |
|---------------------------|--|------------------------|---------------------|
|                           | масса, т                                   | объем, км <sup>3</sup> |                     |
| 10 <sup>22</sup>          | 5,32·10 <sup>8</sup>                       | 0,205                  | 0,922               |
| 10 <sup>23</sup>          | 6,91·10 <sup>9</sup>                       | 2,66                   | 2,16                |
| 10 <sup>24</sup>          | 8,96·10 <sup>10</sup>                      | 34,5                   | 5,10                |
| 10 <sup>26</sup>          | 1,50·10 <sup>13</sup>                      | 5,78·10 <sup>3</sup>   | 28,0                |
| 10 <sup>28</sup>          | 2,54·10 <sup>15</sup>                      | 9,78·10 <sup>5</sup>   | 72,0                |

выпадающих тел, масс и объемов преобразованных и переплавленных пород в кратерах различных диаметров — табл. 1 и 2 [15, 18].

Необходимо отметить, что энергия соударения выпадающих на Землю крупных космических тел при образовании крупных кратеров по порядку величины близка или тождественна энергии, выделяемой при взрывах на Солнце (хромосферные вспышки — 10<sup>30</sup>—10<sup>32</sup> эрг), или энергии от некоторых глобальных геологических процессов. Эти процессы по порядку выделяемой в год энергии оцениваются следующим образом, эрг [7]: кондуктивный тепловой поток — 0,8·10<sup>28</sup>, конвективный вынос тепла — 0,16·10<sup>27</sup>, выделение сейсмической энергии — до 1,0·10<sup>26</sup>.

Как уже отмечалось, поступление энергии Солнца на земную поверхность оценивается в 5,2·10<sup>31</sup> эрг/год.

Наиболее важный момент — мощность взрывного процесса при соударении, превосходящая по своей величине все мыслимые мощности эндогенных процессов. Энергия в 10<sup>20</sup>—10<sup>30</sup> эрг

Таблица 2  
Зависимость величины кратера и объема переплавленных пород от энергии метеорита

| Энергия удара, ккал  | Объем импактного расплава, км <sup>3</sup> | Мощность слоя импактитов, м | Диаметр кратера, км |
|----------------------|--|-----------------------------|---------------------|
| 1,0·10 <sup>21</sup> | 4,1·10                                     | 58                          | 30                  |
| 3,9·10 <sup>22</sup> | 1,7·10 <sup>3</sup>                        | 213                         | 100                 |
| 1,1·10 <sup>24</sup> | 4,7·10 <sup>4</sup>                        | 672                         | 300                 |
| 5,3·10 <sup>26</sup> | 2,2·10 <sup>5</sup>                        | 1107                        | 500                 |

выделяется при взрыве космического тела в течение долей секунды, приводя к значительному разрушению и преобразованию пород в месте удара и распылению вещества ударившего тела. Существенное влияние на атмосферу и гидросферу выделявшаяся энергия может оказать в том случае, если значительная ее часть пойдет на их нагрев.

При соударении с поверхностью происходит почти мгновенное преобразование энергии: на нагрев ударившего тела и окружающих пород тратится около 30% кинетической энергии, на дробление — около 20, на выброс материала около

50%. Большая доля этой энергии идет на разрушение и преобразование пород [20].

В настоящее время трудно оценить особенности процесса соударения, размеры привноса энергии, термическую историю поверхностных зон Земли на стадии ее аккреции, т. е. еще до образования земной коры. В работе В. С. Сафронова [9] рассматриваются конкретно наблюдаемые результаты таких соударений и соответствующих пороодообразующих процессов, которые происходили уже после формирования мощной земной коры.

Процессы ударно-взрывного пороодообразования могут моделироваться как в лабораториях, так и при различных экспериментальных взрывах больших энергий. По получаемым данным могут быть с известной точностью реконструированы параметры взрывного процесса, в частности температура в эпицентре (до 15000°), давление (4,5—8 Мбар), начальная скорость выброса материала (10—14 км/с) и т. д. Исходя из параметров возникающего кратера, можно достаточно определенно оценивать физико-химические условия преобразования пород и минералов.

Особый характер космогенных круговых морфоструктур и залегающих в них пород длительное время не привлекал внимания как из-за неразработанности способов их опознания, так и из-за известной консервативности методологии, применявшейся при их исследовании, приспособленной для анализа длительно формирующихся геологических объектов и обеспечивающей возможности реконструкции процессов пороодообразования лишь в рамках широко известных моделей вулканизма, осадконакопления, метаморфизма и др.

В последнее время показано важное значение различных пластических и остаточных деформаций в горных породах и минералах, указывающих на прохождение мощной ударной волны [25]. Явления ударного метаморфизма включают и возникновение гипербарических фаз, образующихся либо в результате прямого перехода при сжатии, либо при снятии давления из стекол соответствующего состава.

Дробление, плавление и выброс материала — ведущие механизмы кратерообразования, которые приводят к возникновению трех главных групп пород: а) ударно-метаморфизованных и брекчированных пород цоколя кратера — аутигенной брекчии; б) импактитов, образовавшихся за счет импактного расплава, и в) литоидных аллогенных брекчий. Состав пород этих групп, их текстура и структура во многом определяются особенностями геологического строения места удара, составом пород мишени и энергией самого взрыва. Объемы взрывных брекчий и импактитов могут достигать в кратерах (астроблемах) диаметром более 10 км нескольких десятков и сотен кубических километров, значительно превышая объемы пород отдельных осадочных и магматических формаций. Возникающие породы отличаются неупорядоченностью в распределении текстур и структур, наравновесностью мине-

ральных ассоциаций и рядом других специфических черт.

Результат высокоскоростного выброса раздробленного и расплавленного материала в субаэральные условия — накопление аллогенной брекчии и витрокластических импактитов — брекчий, в которых существенную часть составляют частицы и бомбы застывших стекол. При этом во внешних зонах возникшего кратера обломочные массы оказываются перекрытыми более горячим обломочным и частично расплавленным материалом [22]. Все эти образования погребены под массами обломков и частиц стекла, выпавших из тех частей газово-пылевого облака, которые имели более крутые траектории или поднимались вертикально. Преобразованные и вновь возникшие породы могут быть классифицированы в зависимости от размеров и агрегатного состояния слагающих их обломков (литокласты, кристаллокласты, витрокласты), типа заключающей их матрицы (обломочный материал или стекло), количественных и текстурно-структурных соотношений этих компонентов и степени перемешивания, в значительной мере определяющейся масштабами перемещения материала при взрыве [6]. Брекчии и импактиты в ряде случаев содержат примесь распыленного вещества ударившего космического тела.

Отсутствие какой-либо слоистости, сортировки обломочного материала — характерная черта аллогенных брекчий. Вместе с тем иногда устанавливается наличие текстур течения, обусловленных движением обломочных масс или их отложением из быстро движущихся потоков газа.

Образование импактного расплава особенно резко проявляется в тех случаях, когда породами мишени служат кристаллические образования, имеющие большое сопротивление сжатию, а энергия взрыва достаточно велика. Застывший импактный расплав внешне обычно напоминает эффузивную горную породу.

Импактные расплавы возникают при ударном плавлении больших масс горных пород, нередко различных по составу, однако радиальное растекание и выбрасывание этого расплава приводят к его интенсивному перемешиванию и известной гомогенизации [16]. Часть расплава испаряется при температуре в несколько тысяч градусов, часть распыляется и входит в состав витрокластических импактитов, часть застывает в виде сплошных масс стекловатых или раскристаллизованных пород, содержащих многочисленные включения ударно-метаморфизованного исходного материала. В импактитах иногда устанавливаются повышенные содержания никеля, которые рассматриваются как результат смещения вещества ударившего тела с земными породами.

Витрокластические импактиты (зювиты) распространены в большей степени, чем массивные, образующие сравнительно мощные пластовые тела лишь в крупных кратерах. Отложение зювитов (иногда они перемешаны с материалом литоидных брекчий) происходило из кольцевой, радиально расширяющейся взрывной базисной волны — флюидизированной системы большой плотно-

сти, которая образована выбросами обломков, расплава и газов по пологим траекториям, а частично и оседающим материалом из вертикальной колонны выбросов, уже частично охлажденных.

Особое значение имеет обладающая градационной слоистостью пачка обломочных пород, перекрывающая несортированные брекчии и связанная с оседанием материала из взрывного облака по вертикали. Это — сохраняющиеся лишь в редких случаях отложения самых верхних горизонтов полного разреза брекчий, заполняющих кратер [24]. Происходящее на последнем этапе развития катастрофы гравитационное оседание позволяет говорить об известном приближении условий порообразования к обычным седиментационным. По-видимому, подобные же, но только тонкообломочные пепловые отложения могут возникнуть после мощного взрыва в достаточно удаленных от возникшего кратера районах (сотни и тысячи километров).

Значительно осложняются условия порообразования при формировании кратера не на суше, а на мелководье, когда заполнение его идет в условиях бурной водной эрозии. Примеры детальной реконструкции таких явлений пока отсутствуют.

Порообразование при метеоритных ударах и взрывах — единственный элементарный процесс по сравнению с большинством геологических эндогенных и экзогенных процессов. Наложения кратеров друг на друга на земной поверхности почти нет, на других планетах породы, о которых идет речь, — результат многократно повторявшегося дробления и переноса материала [23].

Катастрофический процесс соударения и взрыва противоположен по своим результатам большинству эндогенных и экзогенных процессов, так как ведет к разрушению геологической структуры, горных пород, минералов и их кристаллических решеток вплоть до появления полностью разупорядоченной системы — расплава. Можно говорить о резком увеличении структурной энтропии в месте удара, обусловленном переходом кинетической энергии в тепловую и ее диссипацией.

Изучение горных пород Луны, доставленных пилотируемыми и автоматическими научными станциями, показало доминирующее значение импактных процессов для формирования поверхностного слоя и соответственно морфологии лунной поверхности. Дефицит летучих компонентов уже на ранних стадиях развития Луны отвергает возможность проявления взрывного вулканизма в больших масштабах. Большинство лунных пород несет признаки ударного воздействия и расплавления, ударной литификации и т. д. Лунный реголит образовался под преимущественным воздействием ударно-взрывных процессов [4, 13].

В структурном отношении основные типы лунных брекчий сходны с известными в земных кратерах продуктами преобразования земных пород — импактитами различных типов, коптока-

таклазитами, аллогенной брекчией. Наиболее характерны следующие типы лунных брекчий: спекшиезы, состоящие из обломков пород, минералов, стекол, шариков; стекловатые — стекловатая матрица с включениями кристаллокластов и литокластов; ударно-спрессованные, отличающиеся сильным дроблением, меньшей пористостью, линзами и инъекциями стекла.

Весьма интересными образованиями (они есть и в земных кратерах) являются обломки пород, окаймленные стеклом. При ударном плавлении широко проявлены процессы селективного испарения, конденсации, что сопровождается химической дифференциацией.

Ударно-взрывное породообразование — древнейший тип формирования горных пород на планетах земной группы и, в частности, на Земле. Лишь с началом дифференциации ее внешних частей этот тип породообразования был почти полностью вытеснен литогенезом и петрогенезом. По аналогии с последними ударно-взрывное породообразование может быть названо коптогенезом. Для его анализа лишь ограниченно применимы используемые в геологии методы, разработанные для сравнительно медленных интегральных геологических процессов малой мощности.

История ударного взрывного кратерообразования (и соответственно породообразования) на Луне, Марсе, Меркурии и, вероятно, на Земле почти одинакова — это важнейший вывод современной планетологии, решивший длительный спор о происхождении кольцевых лунных гор и цирков в пользу представлений о метеоритно-взрывной их природе. Оценка плотности распределения кратеров в послеморской период на Луне указывает, что на Земле (при равном потоке) на 1 млн. км<sup>2</sup> может приходиться до 15 кратеров диаметром 10—15 км.

Эти оценки согласуются в общих чертах с числом астроблем, выявленных в пределах наиболее изученных территорий. Очевидно, что продукты ударно-взрывного породообразования не являются столь редкими и экзотическими, как это представлялось ранее, для их изучения требуются соответствующие методы и анализы.

Если имеющиеся оценки выпадения крупных метеоритных масс за последние 2 млрд. лет правильны, то общий объем преобразованных в пределах кратеров пород может составить около  $2 \cdot 10^7$  км<sup>3</sup>. При этом наибольший вклад создается ударами максимальных энергий (свыше  $10^{25}$  эрг). Если бы этот объем преобразованных пород был равномерно распределен по поверхности суши, то он бы образовал слой мощностью в несколько десятков метров.

Интерес к породам, возникшим при непосредственном воздействии вещества и энергии Космоса за счет вещества земных пород, стимулируется как общими успехами планетологии, так и определенной ролью этих пород в структуре земной коры, а в ряде случаев и их прикладным значением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Еременко Г. К., Витриченко Э. А., Полканов Ю. А. Космогенное вещество в россыпях.— В кн.: IV Всесоюзное совещание по геологии россыпей. Киев, 1973, с. 13—15.
2. Кропоткин П. Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике. Геотектоника, 1970, № 2, с. 30—46.
3. Лебедев В. И., Свищев В. М. Солнечная энергия и проблема образования сиалического слоя земной коры.— Бюл. МОИП. Отд. геол., 1968, т. XLIII (1), с. 5—16.
4. Лунный грунт из Моря Изобилия. М., Наука, 1974. 624 с.
5. Масайтис В. Л. Геологические последствия падений кратерообразующих метеоритов. Л., Недра, 1973, с. 1—18.
6. Масайтис В. Л. Петрология и геология импактитов.— В кн.: Проблемы петрологии. М., Наука, 1976, с. 220—231.
7. Поляк Б. Г., Кропоткин П. Н., Макаренко Ф. А. Основные проблемы геоэнергетики.— В кн.: Труды МОИП. Т. XLVI. М., 1972, с. 7—26.
8. Салон Л. И. О связи оледенений и этапов быстрых изменений органического мира с космическими явлениями.— Бюл. МОИП. Отд. геол., 1977, т. 50, вып. 1, с. 5—32.
9. Сафронов В. С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М., Наука, 1969. 243 с.
10. Симоненко А. Н., Левин Б. Ю. Приток космического вещества на Землю.— В кн.: Метеоритика. Вып. 31. М., Наука, 1972, с. 45—56.
11. Свищев В. М. Роль солнечной энергии в развитии земной коры.— Вестн. ЛГУ. Серия геол. и геофиз., 1964, № 6, вып. 1, с. 47—49.
12. Соболевич Э. В. Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974. 205 с.
13. Флоренский К. П., Иванов А. В., Базилевский А. Т. Роль экзогенных факторов в формировании лунной поверхности.— В кн.: Космохимия Луны и планет. М., Наука, 1975, с. 439—452.
14. Anders E. Meteorites and the early solar system.— Ann. Rev. of Astronomy and Astrophysics. 1971, v. 9, p. 1—34.
15. Beals C. S. The identification of ancient craters.— Ann. N. Y. Acad. Sci., 1965, v. 123, N 2, p. 904—914.
16. Dence M. R. Impact melts.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, N 23, p. 5552—5565.
17. Dence M. R. The nature and significance of terrestrial impact structures.— In: Int. Geol. Congr., 24-th sess., sect. 15, Planetology. Montreal, 1972, p. 77—89.
18. Engelhardt W. V. Die Bildung von Kratern durch den Aufprall extraterrestrischer Massen.— Naturwissenschaften, 1974, Bd 61, N 9, S. 389—395.
19. French B. Shock metamorphism as a geological process.— In: Shock metamorphism of natural materials (eds. B. French and N. Short). Baltimore, Mono Press, 1968, p. 1—17.
20. Gault D. E., Hörz F., Hartung J. B. Effects on microcratering on the lunar surface.— Geochim. Cosmochim. acta, supp. 3, 1972, v. 3, p. 2713—2734.
21. Lemcke K. Mögliche Folgen des Einschlags von Grobmeteoriten ins Weltmeer.— Neues Jahrb. Geol. und Paläontol. Monatsh., 1975, N 12, S. 719—726.
22. Oberbeck V. R., Morrison R. H., Hörz F. Transport and emplacement of crater and basin deposits.— Moon, 1975, v. 13, N 1/2/3, p. 9—26.
23. Roberts V. A. Shock sedimentology.— Geol. Soc. America Spec. Papers, 1966, N 87, p. 315—316.
24. Stettner G. Das Grundgebirge in der Forschungsbohrung Nördlingen 1973 in regionalen Rahmeh und seine Veränderungen durch den Impact.— Geol. Bavarica, 1974, Bd 72, S. 35—51.
25. Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes.— Fortschr. Miner., 1972, Bd 49, S. 50—113.
26. Urey H. C. Cometary collisions and geological periods.— Nature, 1973, v. 242, N 5392, p. 32—33.

## К ВОПРОСУ О МОРФОСТРУКТУРЕ СЛОЖНЫХ КРАТЕРОВ

*С. А. ВИШНЕВСКИЙ*

Импактные кратеры в зависимости от строения разделяются на простые и сложные [9]. Модель простого кратера представляет округлую воронку чашевидной формы, окруженную асимметричным валом с крутым внутренним и пологим внешним склонами. К классу простых относятся кратеры величиной от первых сотен метров до первых километров. Типичными представителями этой группы являются Аризонский кратер, кратеры Brent, Холлефорд и др.

С ростом размеров кратера модель простого строения становится неудовлетворительной, и в его морфоструктуре появляются новые элементы — центральное поднятие и внутренний кольцевой вал, разделяющий воронку кратера на внешнюю кольцевую синклинали и внутренний кратер. Минимальный диаметр сложных кратеров с центральным поднятием колеблется от 2,5 до 6 км в зависимости от состава пород мишени (осадочных и кристаллических соответственно), а с внутренним — от 2,8 до 10—12 км [15].

Структура большинства крупных кратеров осложнена только центральным поднятием, например Восточный Клируотер диаметром 20 км [9] или Болтышский кратер диаметром 32 км [5]. В ряде сложных кратеров с внутренним кольцевым валом центральное поднятие выражено слабо, неявно, а иногда и вовсе отсутствует (например, кратер Рис диаметром 22 км). Наконец, встречаются сложные кратеры, где внутренний кольцевой вал и центральное поднятие выражены одинаково отчетливо — например Западный Клируотер диаметром 32 км [9].

В целом сложные метеоритные кратеры заметно отличаются от простых, и, как указывает М. Р. Денс [9], для их интерпретации необходимо дальнейшее развитие существующей теории ударного кратерообразования. Для объяснения природы центрального поднятия и внутреннего кольцевого вала выдвигались различные гипотезы, связывавшие образование этих элементов с воздействием упругой отдачи [2], отражением ударной волны от нижележащих слоев [18], упругой отдачей и последующим изостатическим воздыманием [10], одним только изостатическим воздыманием [6—8], вследствие возникающего на месте удара колебательного процесса с сильным затуханием [20], горки, образованной обратным падением вещества [11], и др. Наиболее полный обзор соответствующих представлений в отечественной литературе можно найти в работе Г. В. Скрынника [15].

Однако эти гипотезы малоудовлетворительны и вызывают критику со стороны противников метеоритного происхождения сложных кратеров. Проблема структуры последних нередко считается

одним из доводов в пользу их вулcano-тектонического происхождения [14].

Детальное рассмотрение существующих гипотез образования центрального поднятия и внутреннего кольцевого вала, проведенное Г. В. Скрынником [15], показало, что наиболее удовлетворительно согласуются с фактической геологией сложных кратеров представления о быстром возникновении указанных элементов морфоструктуры на стадии ударно-взрывной эскавации кратера. Сам автор связывает образование центрального поднятия и внутреннего кольцевого вала с волной разгрузки, хотя и не рассматривает механизм ее воздействия. Вместе с тем динамика изостазийной модификации крупных кратеров, описанная в работах [6—8], не позволяет отвергать изостазию как фактор образования, по крайней мере, некоторых элементов морфоструктуры сложных кратеров, особенно с учетом новой модели кратерного профиля, применяемой в работе А. И. Дабижа [6]. Пример элемента морфоструктуры сложного кратера, находящий удовлетворительное объяснение с помощью изостазийной релаксации, будет рассмотрен ниже.

Анализ геологического строения крупных метеоритных кратеров Земли привел автора к заключению, что в сложных метеоритных кратерах можно выделить два типа элементов морфоструктуры в зависимости от того, образовались они на стадии ударно-взрывной эскавации (сингенетичные элементы) или в течение геологической жизни кратера (наложенные элементы). Ниже, на основе интерпретации геологических данных и общетеоретических соображений, излагаются возможные механизмы образования центрального поднятия и внутреннего кольцевого вала сложных кратеров.

## СИНГЕНЕТИЧНОЕ ЦЕНТРАЛЬНОЕ ПОДНЯТИЕ

Механика ударно-взрывной эскавации импактных кратеров нашла отражение в ряде теоретических, экспериментальных и прикладных исследований советских и зарубежных авторов. Для наших целей наибольший интерес представляет работа Д. Голта и др. [22] по моделированию кратерообразования.

Предварительно рассмотрим ударно-взрывной процесс в замкнутой среде. Из эпицентра взрыва в породах с некоторой сверхзвуковой скоростью, составляющей 5—40 км/с, сферически распространяется скачок давлений вплоть до нескольких мегабар, уплотняющий среду. Сжатая за фронтом ударной волны среда испытывает непрерывное центробежное смещение с некоторой массовой скоростью, равной примерно половине скорости ударной волны [18]. По мере экспансии параметры ударной волны снижаются, и наконец она затухает, переходя в сейсмическую волну. За счет уплотнения среды из эпицентра взрыва вслед за

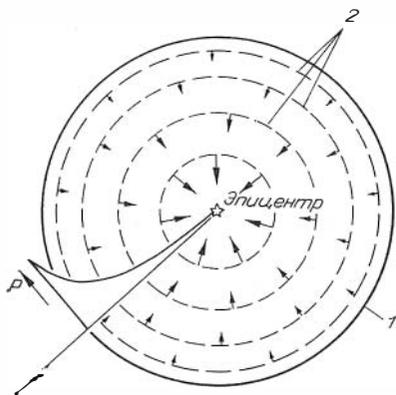


Рис. 1. Взрыв в замкнутой среде. Центростремительный компонент смещения грунта в волне разгрузки. Схематично показана эшора давлений в радиальном направлении к центру взрыва (слева внизу). Для наглядности фронт ударной волны и характеристическое смещение частиц за фронтом зафиксированы. 1 — ударный фронт; 2 — изобары волны разгрузки.

ударной волной распространяется спад давлений (волна разгрузки). Попадая в область разгрузки, каждый сферический слой сжатой среды начинает квазиупруго расширяться, приобретая все более возрастающий компонент центростремительного смещения (рис. 1), так что после прохождения волны разгрузки возмущенная среда возвращается в положение, близкое к исходному. Однако полного восстановления формы в силу необратимых пластических деформаций и работы расширяющихся газов (камуфлетная полость) не происходит.

В случае наземного или приповерхностного взрыва геометрия волны разгрузки под влиянием свободной поверхности существенно искажается, и, как считает Д. Голт [22], за счет искажения поля динамических напряжений за фронтом ударной волны возмущенная среда приобретает результирующее ускорение, направленное на выброс (рис. 2). В итоге некоторый приповерх-

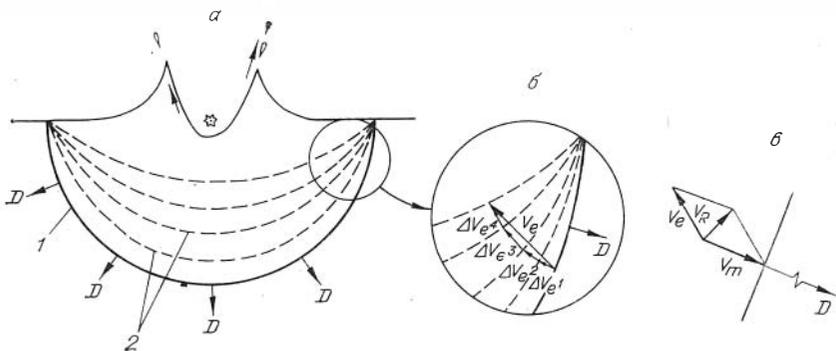


Рис. 2. Схематическое представление процесса ударно-взрывной эскавации кратера [22]:

$\alpha$  — поле динамических напряжений в начале эскавации кратера;  $\beta$  — отклонение вектора скорости квазиупругого расширения грунта;  $\sigma$  — результирующее движение грунта.

$D$  — скорость ударной волны;  $V_m$  — скорость движения частиц за фронтом ударной волны;  $V_e$  — скорость квазиупругого расширения грунта в волне разгрузки;  $V_R$  — результирующая скорость движения грунта в волне разгрузки; 1 — ударный фронт; 2 — изобары волны разгрузки.

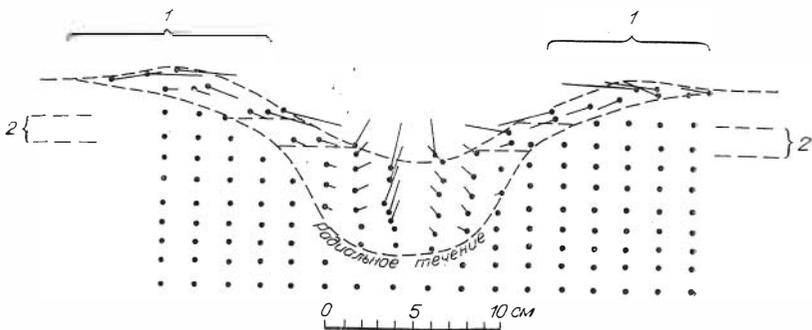


Рис. 3. Вектор и амплитуда смещения точечных масс грунта в экспериментах по моделированию импактных кратеров [22].

1 — область латерального течения; 2 — переходная зона.

ностный объем грунта выбрасывается из района будущего кратера по различным баллистическим (взрывное облако) и пологим (центробежный донный поток) траекториям. Часть грунта падает обратно в кратер, а часть отлагается в закратерном пространстве в виде насыпного компонента внешнего вала и покрова дальних выросов.

Любопытно, что в экспериментах Д. Голта значительная часть объема кратерной воронки образована не эскавацией грунта, а его течением. Амплитуда и вектор смещения точечных участков грунта мишени в зоне кратерообразования приведены на рис. 3. Отчетливо наблюдается, как под влиянием свободной поверхности грунт мишени испытывает направленное на выброс сублатеральное центробежное смещение по пологим траекториям и растекание. Вместе с тем под эпицентром взрыва наблюдается сектор радиальных смещений грунта, примерно таких, какие мы наблюдали бы в случае взрыва в замкнутой среде.

По данным В. Д. Алексеенко и Г. В. Рыкова [4] также отмечено, что под эпицентром поверхностного взрыва в некотором коническом объеме среды с раствором телесного угла до  $60^\circ$  параметры ударной волны меняются так же, как и при камуфлетном взрыве. Иными словами, изобары волны разгрузки в некотором шаровом секторе под эпицентром поверхностного взрыва, по-видимому, более или менее концентричны друг другу и поверхности ударного фронта, так что происходят только радиальные смещения грунта. При этом если степень ударного сжатия последнего значительна, то в волне разгрузки за счет квазиупругого расширения (гораздо более резкого, при поверхностном взрыве, чем в случае камуфлета, так как происходит диссипация взрывных газов в свободное полупространство) грунт выбрасывается по крутым баллистическим траекториям в центростремительном направлении. При меньшей степени сжатия грунт может быть только подброшен, взрыхлен или просто возвращен в исходное положение,

Так, в схематическом виде можно представить механизм образования сингенетичного с кратером центрального поднятия — на фоне латерального центробежного выпихивания и эскавации кратерной воронки происходит центростремительное квазиупругое расширение сжатого грунта в шаровом секторе радиальных смещений под эпицентром взрыва. При этом в зависимости от механических свойств грунта телесный угол раствора этого сектора будет варьировать, определяя относительный диаметр центрального поднятия. Определенную поддержку описываемый механизм образования центрального поднятия находит и в работе В. М. Титова и др. [16], которые установили, что при высокоскоростном ударе возникает три зоны разлета вещества: ранний кумулятивный выброс под углом  $60-65^\circ$  от горизонтали, поздний выброс — угол около  $20^\circ$  ( $4/5$  всей выброшенной массы) и выброс под углом  $90^\circ$  к поверхности вещества из эпицентра взрыва за счет упругого восстановления после сжатия.

В зависимости от начальной амплитуды ударной волны взрыв может быть «вялым» (малая скорость метеорита, грунт в секторе радиальных смещений только взрыхлен, подброшен, приподнят — образуется отчетливо выраженное центральное поднятие) или «фреатическим» (большая скорость метеорита, много грунта из сектора радиальных смещений выброшено по баллистическим траекториям — центральное поднятие выражено слабо, неявно).

С изложенных позиций объясняется: 1) почему в одних кратерах центральное поднятие выражено отчетливо («вялый» взрыв), а в других — слабо, неявно («фреатический» взрыв); 2) почему относительный диаметр центрального поднятия не обнаруживает прямой корреляции с размерами самого кратера (тот или иной раствор телесного угла сектора радиальных смещений).

Примеры структур, образованных «вялым» взрывом, достаточно многочисленны: Карский кратер [12], Пучеж-Катунский [17], Болтышский [5] и др. Классическим примером таких структур служит кратер Госсес Блафф [3], где «вялый» взрыв проявился наиболее отчетливо — слабая эскавация воронки, но интенсивное взрыхление пород в секторе радиальных смещений.

К структурам «фреатического» взрыва относится, например, кратер Нордлингер Рис [21].

С вышеизложенных позиций образование центрального поднятия как сингенетичного элемента морфоструктуры сложных кратеров можно представить как следствие особого движения грунта в секторе радиальных смещений на фоне латерального течения и эскавации грунта в остальной области возмущения.

### СИНГЕНЕТИЧНЫЙ ВНУТРЕННИЙ КОЛЬЦЕВОЙ ВАЛ

Приведем характеристику одного из сингенетичных внутренних кольцевых валов. Вал представляет хаотическое нагромождение блоков и мегабрекчий архейских гнейсов диаметром около 50 км; фрагменты исходных пород региона цементированы спек-

шейся туфотагамитовой толщей. На сингенетичность этого вала со структурой кратера указывают следующие факты:

1) отложения взрывного облака — зювиты, выполняющие внешнюю кольцевую депрессию кратера, перекрыты языками застывшего тагамитового расплава, стекавшего с наружного склона вала;

2) в осевой части вала зювиты налегают на отдельные блоки архейских гнейсов, выдвинутые из-под толщи существенно стекловатых импактитов, выстилающих дно кратера;

3) блоки архейских гнейсов, слагающие вал, при отложении зювитов еще не утратили подвижности — в ряде пунктов зювит цементирует блоки и мегабрекчии архейских пород;

4) по внутреннему склону вала наблюдаются центростремительные оползни зювита с покровами, псевдопоровами и инъективными телами тагамитов.

Все это указывает, что, как элемент морфоструктуры, вал архейских гнейсов возник еще на стадии эскавации кратера и повлиял на перераспределение импактитов во время и после образования кратера.

Изложим представления, касающиеся механизма быстрого образования такого вала. Выше уже рассматривалась механика ударно-взрывной эскавации грунта из воронки растущего кратера.

В общем случае дно кратерной воронки, проводимое по подошве зювито-тагамитового выполнения и мегабрекчий, залегающих на деформированных исходных породах региона, служит той поверхностью раздела, выше которой волна разгрузки сообщила среде ускорение, достаточное для массового отрыва и выброса грунта по пологим (центробежный донный поток) и баллистическим (взрывное облако) траекториям. По оценке Ю. М. Шумейкера [19], для эскавации горных пород необходимы растягивающие усилия в несколько килобар, а на линии дна будущего кратера развивались ударные нагрузки от 40 [4] до 80 кбар\*. Мощность волны разгрузки по мере экспансии быстро падает примерно обратно пропорционально радиусу, в степени больше третьей [15], и на некотором рубеже эта волна затухает. Очевидно, что между поверхностью массовой эскавации грунта (дно кратера) и рубежом полного затухания волны разгрузки существует некоторая переходная область, где развиваемые усилия уже недостаточны для выброса грунта, но могут быть еще значительными.

Экспериментальные данные Д. Голта [22] показали, что рост объема кратерной воронки происходит не только за счет взрывной эскавации, но и за счет пластичного течения грунта под поверхностью эскавации. Иными словами, часть среды из переходной области возмущений начинает пластично течь, без явлений отрыва, примерно в том же направлении на выброс, что и продукты эскавации, движущиеся по пологим траекториям. Центробежное надвигание пластично текущих масс из внутренней зоны кра-

\* Последняя цифра заимствована у С. С. Григоряна и Л. С. Евтерева.

тера на неподвижное обрамление формирует «цокольный» компонент внешнего кольцевого вала кратера, представленный пластично деформированными, но не утратившими в целом связности исходными породами региона, в то время как продукты взрывной эскарвации формируют насыпной компонент этого вала. Так образуется вал в структуре простого кратера.

В крупных кратерах по неизвестным причинам (возрастает выпихивающая способность центробежного донного потока?) вокруг воронки кратера образуются обширные пологие зоны приповерхностного срыва [6], окаймляющие его по периферии. Эти зоны выполнены отложениями центробежного донного потока (клиппены, мегабрекчии, спекшиеся туфотагамитовые толщи) и взрывного облака (зювиты) и ограничены извне нечетко выраженным насыпным валом из этих же образований. Если зона пластичного течения под воронкой растущего кратера достаточно велика, можно представить, что растекающийся к периферии грунт из глубинных областей кратера будет надвигаться на невозмущенные породы мишени. В итоге в тыловой части зоны приповерхностного срыва образуется кольцевой вал из пластично деформированных исходных пород региона, выделяемый в морфоструктуре кратера в качестве внутреннего вала (рис. 4).

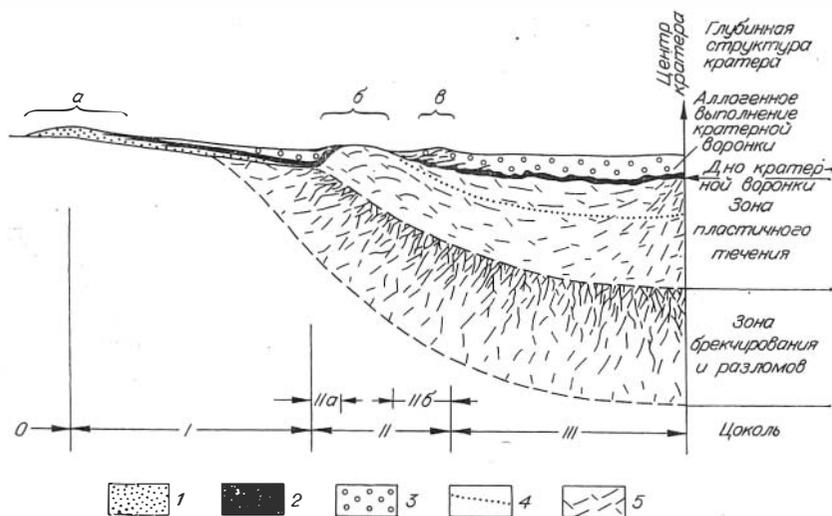


Рис. 4. Схематический радиальный профиль класса сложных кратеров с нечетко выраженным центральным поднятием.

Элементы морфоструктуры кратера: а — насыпной внешний вал, б — сингенетический внутренний кольцевой вал, в — наложенный внутренний кольцевой вал.

Зональность кратерной структуры в плане: 0 — невозмущенные породы обрамления, I — зона приповерхностного срыва, II — сингенетический внутренний кольцевой вал (подзона IIa — центробежных оползней и потоков, IIб — центростремительных оползней и потоков), III — зона внутренней воронки. 1 — перемещенные блоки и мегабрекчии; 2 — спекшаяся туфотагамитовая толща; 3 — зювиты; 4 — положение дна кратерной воронки до изостатической релаксации; 5 — плоскости скольжения масс горных пород.

Ширина кольцевой депрессии между внешним насыпным и внутренним кольцевым валами зависит от того, насколько радиус зоны приповерхностного срыва больше радиуса зоны пластичного течения. Можно представить, что в предельном случае внешний и внутренний валы сливаются, отличаясь лишь по строению и литологии слагающих их образований. При двуслойном строении мишени фактором, увеличивающим радиус зоны приповерхностного срыва, является наличие верхнего, более рыхлого и непрочного слоя, залегающего на более жестком основании.

Принимая, что развитие зоны приповерхностного срыва в определенной степени связано не только с масштабом явления, но и с механическими свойствами пород мишени, можно предположить, что в осадочных породах такая зона возникает легче, чем в жестких кристаллических породах. Так можно объяснить, почему минимальные размеры кратеров, обладающих внутренним кольцевым валом, намного меньше в осадочных породах, чем в кристаллических.

### НАЛОЖЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МОРФОСТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ КРАТЕРОВ

В качестве примера можно привести наложенный внутренний кольцевой вал, положение которого в общей морфоструктуре класса сложных кратеров в схематическом виде показано на рис. 4. Геологическое строение одного из таких валов (цепочка тел существенно стекловатых импактитов, частично отпрепарированных от зювита) указывает, что, как элемент рельефа, он образовался вследствие избирательной эрозии. Тела существенно стекловатых импактитов представлены тагамитам и сваренными игнибритовидными породами и образуют концентрическую с общим круговым планом кратера систему инъективных дайкообразных и неправильных тел, кулисообразно заходящих друг за друга, реже покровы и псевдопокровы. Нередко дайкообразные тела полого падают к периферии кратера. Инъективный характер этих тел и широко распространенные в них флюидальные эвтакситовые текстуры указывают, что внедрения и излияния соответствующих расплавов начались уже после отложения толщи зювитов.

Ширина вала достигает 1,5—2 км, диаметр 40 км. В современном рельефе он сохранился фрагментарно — затушеван неотектонической активностью и неоген-четвертичным осадконакоплением — и наблюдается в виде прерывистых дуг, наибольшая из которых имеет длину около 25 км. По наиболее приподнятым и эродированным фрагментам вала можно судить о его глубинном строении, для которого характерны: 1) инъективно-покровные соотношения тагамитов с зювитами ниже по разрезу сменяются хаотическими смесями различных по величине неправильных масс этих пород, а в основании разреза залегают спекшиясы туфотагамитовые толщи; 2) в радиальном разрезе инъективные тела тага-

митов имеют вид чешуй, наклоненных к центру кратера, а затем подвернутых кверху.

Чтобы рассмотреть причины появления кольцевой системы инъективных внедрений импактного расплава в толщу зювитов, необходимо реконструировать начальный профиль кратера, который может быть существенно модифицирован различными геологическими процессами и, в частности, значительно выположен изостазийной релаксацией [7, 8]. Из соотношений Р. Б. Болдуина [3] видимая глубина свежего кратера для рассматриваемого нами примера составляла около 5 км, а средние уклоны видимого кратерного дна и подошвы зювито-гагамитовой линзы на внутреннем склоне сингенетичного кольцевого вала архейских гнейсов — соответственно порядка  $1/5$  и  $1/4$ . Фактические же уклоны рассматриваемых поверхностей могли достигать еще большей величины, принимая во внимание параболоидальность профиля кратера.

В этих условиях после образования кратера по внутреннему склону сингенетичного вала архейских гнейсов развивалось центростремительное оползание и стекание зювито-гагамитовых масс, усиленные тем, что в основании покрова зювитов залегала линза импактного расплава и раскаленных игнимбриитовидных пород. Оползание сопровождалось инъективными внедрениями расплава в толщу взламываемого зювита и частичными излияниями его на поверхность кратерного днища. В подошве крупных оползней развивались внедренные снизу чешуевидные пластообразные залежи импактного расплава. Отдельные из таких «чешуй» достигали значительных размеров (площадь одного из оползней порядка  $10 \text{ км}^2$ , а ширина по фронту около 4—5 км). Языки поверхностных излияний и чешуевидные залежи застывших импактитов первоначально были наклонены к центру кратера.

Последовавшая затем изостазийная релаксация внутренней воронки кратера с амплитудой подъема не менее 4—5 км в центре привела к уплощению ее дна; при этом языки поверхностных излияний и инъективные тела импактного расплава были подвернуты кверху. В дальнейшем избирательная эрозия отпрепарировала фронтальные окончания этих языков, внедрений и «залежей», и их останцы зафиксировались в рельефе в виде кольцевой гряды наложенного вала.

В итоге выделяется два этапа формирования наложенного внутреннего вала, рассмотренного выше: 1) сравнительно быстрое образование системы центростремительных оползней зювитовых масс и импактного расплава с внутреннего склона сингенетичного вала архейских гнейсов; 2) гораздо более продолжительный этап изостазийной релаксации и избирательной эрозии в течение геологической жизни кратера.

Для реализации рассмотренного механизма необходимы:

- 1) генерация достаточно больших масс импактного расплава;
- 2) углубленная воронка внутреннего кратера без или со слабо выраженным центральным поднятием;

3) отчетливо выраженный сингенетичный внутренний кольцевой вал;

4) изостазийная релаксация внутренней воронки кратера.

Условия 1 и 2 достигаются при взрыве «фреатического» типа (большие ударные давления в эпицентре). Условия 3 и 4 достигаются при достаточно больших масштабах процесса — образовавшийся кратер должен быть гигантским, с диаметром не менее 10—12 км (для соблюдения условия 3) и не менее 15—20 км (для соблюдения условия 4).

Предложенные механизмы образования сингенетичных и наложенных элементов морфоструктуры сложных кратеров, естественно, не являются исчерпывающими. Более или менее универсально выглядят процессы образования сингенетичных элементов. Появление наложенного внутреннего кольцевого вала, рассмотренного в настоящей работе, может реализоваться лишь при соблюдении ряда специфических условий. Во всех случаях для образования элементов, которые усложняют структуру кратера, требуются большие масштабы процесса.

Можно представить, что существует еще много других начальных факторов (сложность строения мишени, вещественный состав космического тела, угол встречи его с Землей, наземный или подводный тип взрыва и др.), которые определяют наличие и амплитуду развития тех или иных элементов морфоструктуры сложных кратеров. Не исключено, что существуют наложенные внутренние кольцевые валы и центральные поднятия, образованные по способу, предложенному А. И. Дабижа [6], за счет изостазийной релаксации. Разнообразие типов сложных кратеров, приведенное в сводке В. Л. Масайтиса [13], или, например, обнаружение вокруг кратера Рис с помощью специальных исследований еще двух нечетко выраженных валов в обрамлении диаметрами соответственно 34 и 45 км [20], или строение бассейна Уэллс-Крик, имеющее вид системы концентрических затухающих волн [2], являются указаниями того, что причины и способы образования тех или иных элементов морфоструктуры сложных кратеров могут быть различными.

Почему сингенетичные центральные поднятия возникают только в больших кратерах? Ответ на этот вопрос, видимо, следует искать в связи с тем, что приведенная глубина взрыва и соотношение глубина/диаметр кратера в малых кратерах значительно выше, чем в крупных [3]. Иными словами, с ростом размеров кратера его воронка в значительно большей степени расширяется, нежели углубляется, т. е. ударно-взрывная эскавация и течение грунта приобретают латеральный уклон. Тем самым создаются условия для реализации центрального поднятия, которое морфологически проявится только при достаточно выраженном латеральном «выпахивании» приповерхностного слоя. Причины такого «выпахивания» остаются неясными, но тем не менее изменение параметров кратера с ростом его размеров очевидно. Примерами могут служить

геологические разрезы Пучеж-Катунского кратера [17] и структуры Госсес Блафф [23], а также данные по другим метеоритным кратерам. О связи сингенетичного внутреннего вала со специфической формирования крупных кратеров говорилось выше.

Несколько слов о структурном расчленении ударно-метаморфических комплексов метеоритных кратеров. Традиционно в структуре как простых, так и сложных кратеров выделяется два яруса импактных образований — аллогенный и аутигенный. Аллогенный представлен импактным выполнением кратерной воронки, насыщенным компонентом наружного кратерного вала и закрайерными выбросами. К образованиям этого яруса относятся перемешанные продукты самых различных стадий ударного метаморфизма исходных пород региона — от раздробленных до импактно переплавленных. Аутигенная кратерная брекчия, представляя нижний структурный ярус кратера, слагает линзообразное тело в его основании и представлена измененными, но в целом не утратившими связности и первоначального облика исходными породами, залегающими, как считают многие авторы, *in situ*. Поверхность раздела аллогенного и аутигенного ярусов кратера обычно расчленяется в качестве днища кратерной воронки.

Наличие зоны пластичного растекания грунта под дном кратера, наблюдаемой даже в небольших экспериментах, отвергает представления об аутигенной брекчии как о неперемещенном материале. Особенно очевидно это выглядит на примере сложных кратеров, в которых пластичное течение грунта приводит к образованию центрального поднятия или внутреннего кольцевого вала, причём только вертикальная амплитуда быстрых смещений среды составляет в крупных кратерах от сотен метров до 1—2 км. В этой связи зона пластичного течения также является составной частью аллогенного структурного яруса кратера, хотя ее образования контрастно отличаются от зювито-тагамитового выполнения кратерной воронки. К аутигенному структурному ярусу можно отнести лишь зону брекчирования и разломов, залегающую ниже (см. рис. 4).

Метеоритные кратеры и астроблемы как обособленные объекты специфического происхождения занимают особое место среди прочих структур земной коры. Для целей их диагностики и анализа весьма полезно понятие о структурно-литологических комплексах, предложенное В. Л. Масайтисом [13], который для земных метеоритных кратеров выделяет: 1) цокольный комплекс (породы мишени, в которых заложен кратер); 2) коптогенный комплекс (аллогенная брекчия и импактиты); 3) заполняющий комплекс — выполняющие кратерную воронку осадочные образования; 4) перекрывающий комплекс — региональные осадочные толщи, перекрывающие кратер и его обрамление; 5) инъекционный комплекс — магматические породы, внедрившиеся в глубинную часть кратера.

Однако если последние три комплекса имеют четкие историко-генетические разграничения, а их выделение не вызывает сомнений,

то в понятие докольный и коптогенный комплекс, по нашему мнению, необходимо внести некоторые изменения. Границу между этими комплексами В. Л. Масайтис проводит по подошве зювито-тагамитовых толщ, выполняющих кратерную воронку, а линзу «аутигенной» брекчии, которая включает в себя зону пластичного течения, относит к докольному комплексу. Но вряд ли целесообразно разъединять и даже в какой-то степени противопоставлять друг другу генетически единые аллогенную и «аутигенную» составляющие ударно-метаморфического комплекса кратера и отнести к докольному комплексу неотъемлемую составную часть кратерной структуры — линзу «аутигенной» брекчии. Именно как вмещающая среда докольный комплекс должен включать в себя только те породы мишени, в которых следы ударно-взрывного процесса становятся неотличимы от фоновых геологических дислокаций региона. Соответственно в состав коптогенного \* или ударно-метаморфического (импактного) комплекса кратера необходимо включить как аллогенную, так и «аутигенную» его составляющие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В. Д., Рыков Г. В. Некоторые экспериментальные данные о параметрах волн напряжений в грунтах при подземном и контактном взрыве. — Ж. прикл. механики и теор. физики, 1968, № 6, с. 65—67.
2. Болдуин Р. Б. Древние метеоритные кратеры и криптовулканические структуры. — В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 130—152.
3. Болдуин Р. Б. Соотношения между параметрами кратеров. — В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 222—246.
4. Бруд Г. Л., Бюрк Р. Л. Образование воронки при мегатонном контактном взрыве. — В кн.: Действие ядерного взрыва. М., Мир, 1971, с. 121—162.
5. Вальтер А. А., Рябенко В. А. Взрывные кратеры Украинского щита. Киев, Наукова думка, 1977. 154 с.
6. Дабига А. И. Новая интерпретация строения метеоритных кратеров. — Астроном. вестн., 1977, т. II, № 2, с. 73—77.
7. Дабига А. И., Красс М. С. Земная жизнь взрывных метеоритных кратеров. — Земля и Вселенная, 1975, № 5, с. 80—88.
8. Дабига А. И., Красс М. С., Федынский В. В. Эволюция метеоритных кратеров как структур планетной коры. — Астроном. вестн., 1976, т. 10, № 1, с. 6—17.
9. Денс М. Р. Внеземное происхождение Канадских кратеров. — В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 105—129.
10. Дитц Р. С. Астроблемы: древние структуры на Земле, образованные ударами метеоритов. — В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 153—173.
11. Левин Б. Ю. Современная форма «метеоритной» гипотезы образования лунного рельефа. — Бюл. ВАГО, 1962, № 30, с. 7—19.
12. Масайтис В. Л. Астроблемы на территории СССР. — Сов. геология, 1975, № 11, с. 52—64.
13. Масайтис В. Л. Морфология и глубинное строение земных метеоритных кратеров и астроблем. — Письма в астроном. журнал, 1977, № 1, с. 36—39.

\* Синоним давно применяющихся понятий «ударно-метаморфический» и «импактный» (последний — в широком смысле, а не только для пород, испытавших ударное плавление).

14. Поляков М. М., Трухалев А. И. Необычная вулкано-тектоническая кольцевая структура.— Изв. АН СССР. Серия геол., 1974, № 4, с. 85—94.
15. Скрынник Г. В. Природа центрального и кольцевых поднятий в метеоритных кратерах Земли.— Геол. ж., 1977, № 3, с. 147—152.
16. Титов В. М., Фадеев Ю. М., Швецов Г. А. Удар с высокой скоростью по горным породам.— Докл. АН СССР, 1970, т. 191, № 2, с. 298—300.
17. Фирсов Л. В. О метеоритном происхождении Пучуж-Катунского кратера.— Геотектоника, 1965, № 2, с. 106—118.
18. Шорт Н. М. Ударные процессы в геологии.— В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 30—67.
19. Шумейкер Ю. М. Механика удара на примере Аризонского метеоритного кратера.— В кн.: Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 68—104.
20. Beals C. S. The identification of ancient craters.— Annales of N. Y. Academy of Sciences, 1965, v. 123, N 2, p. 904—914.
21. Dennis R. G. Ries structure, Southern Germany, a Review.— J. Geophys. Res., 1971, v. 76, N 23, p. 5394—5406.
22. Gault D. E., Quaide W. L., Oberbeck V. R. Impact cratering mechanics and structures.— In: Shock Metamorphism of Natural Materials. Baltimore, Mono Book Corp., 1968, p. 87—99.
23. Milton D. J., Barlow B. C., Brett R., Brown A. R., Glikson A. J. Gosses Bluff impact structure, Australia.— Science, 1972, v. 175, p. 1199—1207.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КАРСКОГО МЕТЕОРИТНОГО КРАТЕРА НА ПАЙ-ХОЕ

*М. А. МАСЛОВ, Г. Я. ПОНОМАРЕВ*

В начале 30-х годов нашего столетия на крайнем северо-востоке европейской части СССР, на Югорском полуострове была обнаружена своеобразная структура, получившая название Карской депрессии. Она представляет собой округлое понижение в рельефе диаметром 50 км. Вдоль борта депрессии по долинам рек фрагментарно обнажаются породы, описанные И. Л. Рыскуновым [3] и В. И. Устрицким [4] как туфобрекчии и лавы. Геофизические работы и глубинное геологическое картирование с бурением скважин, проведенные в последние годы, позволили получить представление о геологическом строении и генезисе этой своеобразной структуры. Структура расположена в поле развития пермских молассоидных отложений. На юго-западе к ней примыкают карбонатно-сланцевые отложения каменноугольной, девонской, силурийской и ордовикской систем.

Карская депрессия четко фиксируется отрицательным гравитационным полем округлой формы с ярко выраженной градиентной зоной вдоль бортов [2]. Разница значений силы тяжести между бортом и минимумом, сдвинутым в северо-восточную часть структуры, составляет около 20 мЛг. Отрицательное гравитационное поле депрессии в центральной части осложнено положительной гравитационной аномалией. Магнитное поле над депрессией резко отличается по характеру и интенсивности от магнитного поля окружающей территории. В региональном плане в магнитном поле

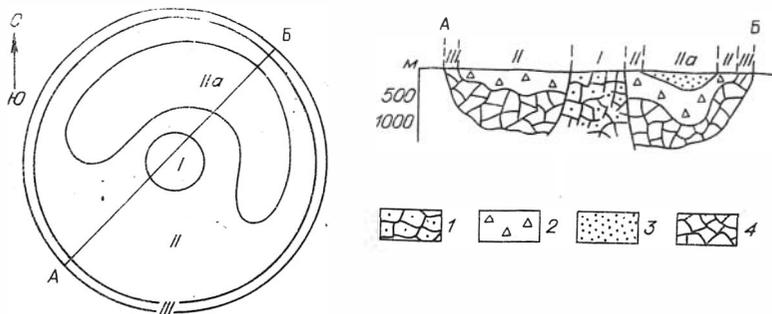


Схема строения Карского метеоритного кратера.

I — центральное поднятие: I — аутигенные брекчии; II — кратерная воронка: 2 — аллогенные образования — зювиты и тагамиты, 3 — посткратерные отложения, выполняющие воронку кратера, — слонцевые пески, песчаные глины и опoki верхнемелового и палеогенового возраста (IIa); III — зона околократерного дробления пород мишеней; 4 — аутигенные брекчии основания.

резко преобладают линейно-вытянутые аномалии северо-западного простирания, группирующиеся в узкие полосы. Для депрессии же характерно присутствие локальных и кольцевых магнитных аномалий различной интенсивности, в плане совпадающих с градиентной зоной поля силы тяжести. С положительным гравитационным минимумом в центре структуры совпадает высокоинтенсивный магнитный минимум, окруженный кольцом положительных магнитных аномалий. Таким образом, депрессия имеет зональное концентрическое строение, которое устанавливается в геофизических полях и подтверждается картировочным бурением.

От центра к периферии выделяются следующие зоны (см. рисунок): Зона I — центральное поднятие основания диаметром 10—11 км, сложенное аутигенными брекчиями по ордовикским карбонатно-сланцевым образованиям и прорывающим их среднепалеозойским диабазам. Центральному поднятию в плане на карте изоаномал силы тяжести отвечает положительная гравитационная аномалия, а магнитное поле характеризуется высокоинтенсивной отрицательной аномалией. Породы центрального поднятия сильно изменены ударным метаморфизмом: раздроблены, участками переплавлены, поставлены почти вертикально и превращены на всем изученном разрезе (708 м) в брекчии или псевдотахилиты. По данным двух пересекающихся сейсмических профилей под центральным поднятием отмечается куполовидная структура. Наиболее четко свод купола с амплитудой 1800 м фиксируется на глубине около 4000 м. Судя по геолого-сейсмическому разрезу, породы центрального поднятия выведены с горизонта, залегающего на глубинах около 6000 м.

Зона II — кратерная воронка, представляющая собой в плане кольцо шириной 25 км, окружающее центральное поднятие. Воронка выполнена аллогенными брекчиями, среди которых выделяются зювиты и тагамиты. По геофизическим данным, борта ворон-

ки залегают сравнительно круто. Рельеф дна неровный, в южной части глубина ее составляет 425—450 м, а на северо-востоке 1100—1200 м.

Зювиты — основная часть отложений, выполняющих воронку. Они состоят из обломков разнообразных осадочных, метаморфических и изверженных пород местного происхождения, обломков отдельных кристаллов, капель, обломков и бомб импактитового стекла, промежутки между которыми выполнены тонкораздробленной массой тех же пород, сцементированных карбонатно-глинистым и стекловатым цементом с примесью углистого вещества и растительного детрита.

Тагамиты представляют собой массивные или пузыристые темно-серые, зеленовато-серые до черных брекчии, в которых мелкие обломки сцементированы стеклом переменного андезит-дацитового состава. Тагамиты образуют прослой и ветвящиеся жилы в зювитах. Мощность прослоев до 14 м. Днище воронки состоит из мегабрекчий палеозойских пород, мощность которых неизвестна.

Зона III — зона околokrатерного дробления шириной 2—4 км, окружает кратерную воронку. В ней палеозойские отложения полностью или на отдельных участках превращены в аутигенные брекчии. Здесь же присутствуют жилы и покровы зювитов и тагамитов.

В северной части кратерной воронки в брекчиях выделяется полукольцевое углубление шириной 15—18 км, выполненное слоистыми верхнемеловыми и палеогеновыми песками, песчаными глинами и опоками, мощность которых достигает 340—370 м.

Возраст образования структуры падает на промежутки сеноман — сантон на основании следующих данных: 1. В обломках опок из брекчий А. А. Атабеньяном обнаружены *Inoceramus* sp. ind., *Entojium* sp. ind., *Styraeoceras baldyiri* (Keyserl.), характерные, по его мнению, для сеномана; 2. В опоках, перекрывающих зювиты, также А. А. Атабеньяном определены *Inoceramus* cf. *cardisoides* Goldf., *I. patootensis* Lor., характерные для сантона.

Повсеместно в породах Карской депрессии отмечаются признаки ударного метаморфизма, среди которых можно выделить:

1. Конусы разрушения в обломках аллократерного дробления; в породах центрального поднятия и в зоне околokrатерного дробления;
2. Планарные элементы в зернах кварца и полевого шпата;
3. Наличие высокобарического минерала — коэсита в интенсивно девитрифицированном кварцевом стекле из обломков зювитов [1].

Анализ фактического материала по известным структурам, таким как Попигайская, Нордлингер Рис, Госсес Блафф, позволяет предположить метеоритное происхождение Карской депрессии. Карский метеоритный кратер по величине входит в первую пятерку известных метеоритных кратеров мира.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневецкий С. А., Маслов М. А., Пальчик Н. А., Попомарев Г. Я. Козсит в породах Карской структуры.— Докл. АН СССР, 1977, т. 232, № 2, с. 446—448.
2. Маслов М. А. О происхождении Карской депрессии.— В кн.: Метеоритика. Вып. 36. М., Наука, 1977, с. 123—130.
3. Рысюков И. Л. Молодые вулканические образования Пай-Хоя.— Проблемы Арктики, 1939, № 9, с. 30—48.
4. Устрицкий В. И. Мезозойские отложения, кайнотийные лавы и туфобрекчи Пай-Хоя. Л., 1953. 13 с.

## К ВОПРОСУ ОБ ИЗОТОПНЫХ СМЕЩЕНИЯХ В СТАБИЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МЕТЕОРИТОВ

*Э. В. СОБOTOВИЧ, Л. А. КОНОНЕНКО*

В последнее время все больше внимания уделяется исследованию изотопного состава космического вещества. Ученые пытаются найти ключ к познанию ранней истории Солнечной системы.

Например, многие современные теории нуклеосинтеза предполагают, что материал Солнечной системы возник в результате смешения двух компонентов: один являлся продуктом экспоненциально уменьшающейся во времени звездной активности, второй генерировался непосредственно перед образованием Солнечной системы [6, 7]. Если это так, то изотопные составы некоторых элементов (в зависимости от соотношения количества смешиваемого материала в каждом теле) могут как-то различаться. Вторым фактором, возможно приводящим к смещению изотопных соотношений, может быть фракционирование за счет гравитационного и температурного эффектов. Третьей причиной является преимущественное «выгорание» тех или иных нуклидов за счет ядерных реакций, постоянно идущих за счет взаимодействия вещества с космическими лучами, и особенно на ранней стадии существования протопланетного облака, когда оно (согласно современным гипотезам) подвергалось весьма интенсивному облучению потоков нейтронов.

Наконец, четвертым фактором нарушения изотопных соотношений может служить химическое фракционирование, в том числе путем транспортных реакций в протопланетном облаке, подвергавшемся воздействию высоких температур.

Прежде чем обсуждать эти возможности, рассмотрим имеющиеся данные по определению изотопного состава элементов в метеоритах и лунных пробах.

**Литий.** В настоящее время существует несколько гипотез, описывающих происхождение легких элементов в Солнечной системе:

1. Облучение планетезималий, первичные легкие элементы в которых отсутствуют, быстрыми протонами; при этом рассматриваются прямые реакции скалывания и вторичные реакции с тепловыми нейтронами [15, 21].

2. Появление изотопов за счет реакций скальвания и одновременное (неравномерное) выгорание за счет термоядерных процессов в конвективной оболочке протосолнца с последующим выбросом материала в околосолнечное пространство [11].

3. Реакции скальвания с учетом возможного существования образованного в первичном синтезе лития [40, 41].

В настоящее время многие исследователи отдают предпочтение последней из указанных гипотез [4, 29].

Происхождение изотопов лития в окружающем протосолнце вещество может быть описано следующим образом. Реакции расщепления ядер кислорода, магния, кремния в облаке первичных пылевых частиц продуцируют спалляционные изотопы лития  ${}^6\text{Li}_c$  и  ${}^7\text{Li}_c (+{}^7\text{Be}_c)$  в отношении 1 : 2,5 [19], которые смешиваются с первичным  ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}_n/{}^6\text{Li}_n \sim \infty)$ .

Если в дальнейшем вещество полностью гомогенизируется и микронеоднородности стираются, то устанавливается единый изотопный состав лития во всех телах Солнечной системы. Однако ограниченный метаморфизм метеоритного вещества позволяет рассчитывать на сохранение индивидуальных первичных частиц с характерным составом лития.

Л. К. Левский с соавторами [4] представили статистически обработанные результаты своих измерений и некоторых других работ с использованием для определения изотопного состава лития весьма малых навесок — порядка  $10^{-3}$  —  $10^{-6}$  г (табл. 1). Авторы считают, что при условии чередования измерений проб и стандартов среднеквадратичная ошибка воспроизводимости измерений земного эталона однозначно характеризует их качество, так как в земном мономинеральном материале не ожидается вариаций изотопного состава. При анализе же вещества метеоритов появление ошибки воспроизводимости, превышающей ошибку определения эталона, следует приписать действительной вариации изотопного состава лития, которая с большой вероятностью может быть отнесена за счет ядерного механизма.

Среди данных, приведенных в табл. 1, только в случае хондритов Mezö-Madagas, Мокожа и Orqueil отмечается значительное отклонение величины изотопного отношения  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  от стандарта (в случае метеорита Холбрук, имеющего изотопный состав Li, сильно отличающийся от земного, применение критерия Стьюдента показывает, что различие это незначимо). В то же время для всех метеоритов выборочные дисперсии ( $S$ ) образцов и эталонов значимо отличаются. И это, по мнению Л. К. Левского и др. [4], служит свидетельством наличия значимых вариаций изотопного состава лития в метеоритах.

Х. Нишимура и Дж. Окано [32] сообщили об измерении отношения  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  в хондритах Bruderheim, Leedy, Plainview и Leoville и в образце земного гранита G-1 на масс-спектрометре со вторичной ионной эмиссией. Они обнаружили, что отношение  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  в метеоритах примерно на 13% ниже, чем в образце G-1. Источника ин-

Изотопный состав лития в метеоритах

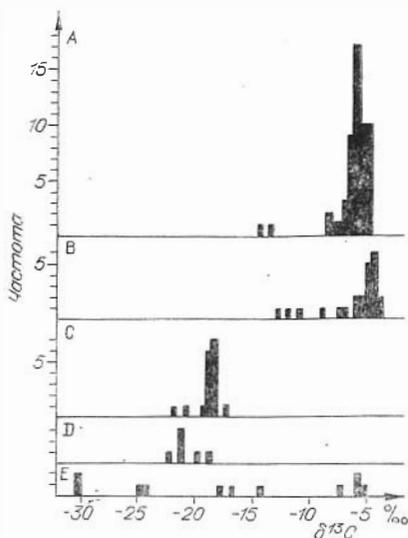
| Образец                  | ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ | Дисперсия | Число опытов | Литературный источник |
|--------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|-----------------------|
| Миген                    | 12,14                         | 0,13      | 4            | [3]                   |
| Саратов                  | 12,17                         | 0,04      | 5            |                       |
| Севроково                | 12,10                         | 0,10      | 5            |                       |
| Еленовка                 | 12,04                         | 0,14      | 3            |                       |
| Бербеле                  | 12,06                         | 0,18      | 8            |                       |
| Оливин (станд.)          | 12,05                         | 0,15      | 9            |                       |
| Holbrook                 | 16,6                          | 5,7       | 6            | [22]                  |
| Роговая обманка (станд.) | 11,6                          | 0,7       | 5            |                       |
| Миген                    | 10,50                         | 0,38      | 16           | [4]                   |
| Жовтневый Хутор          | 10,45                         | 0,36      | 15           |                       |
| Norton County            | 10,56                         | 0,32      | 20           |                       |
| Оливин (станд.)          | 10,44                         | 0,30      | 15           |                       |
| Holbrook                 | 12,54                         | 0,61      | 54           | [36]                  |
| Роговая обманка (станд.) | 12                            | 0,13      | 4            |                       |
| Richardton               | 11,89                         | 0,56      | 50           | [44]<br>II серия      |
| Mező — Madaras           | 11,43                         | 0,44      | 56           |                       |
| Тиниц (хондрит)          | 11,90                         | 0,25      | 30           |                       |
| Тиниц                    | 11,89                         | 0,36      | 7            |                       |
| Роговая обманка (станд.) | 11,87                         | 0,07      | 14           |                       |
| Renazzo                  | 11,47                         | 0,40      | 17           | [44]<br>III серия     |
| Мокolja                  | 11,22                         | 0,68      | 20           |                       |
| Orqueil                  | 11,59                         | 0,67      | 54           |                       |
| Роговая обманка (станд.) | 11,75                         | 0,11      | 14           |                       |

струментального смещения не обнаружено. По-видимому, различие в отношениях  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  в метеоритах и образце G-1 вполне реально. Это заключение согласуется с гипотезой Х. Митлера [29] о зависимости величины отношения  ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$  от расстояния от Солнца в результате воздействия нейтронного потока переменной величины.

В. Г. Заславский и др. [2] методом термоионной эмиссии определили изотопный состав лития в двух образцах лунного реголита с места посадки «Луны-16». В пределах 0,5% он не отличается от средней величины для земного эталона. Однако наблюдается различие (1%) в изотопном составе лития для двух образцов реголита между собой.

**Бор.** Среднее отношение  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$  в земной коре, равное  $4,05 \pm 0,10$ , отличается от метеоритного — 3,87 [1]. Это обусловлено реакцией распада легкого изотопа бора с образованием лития и гелия.

**Углерод, кислород.** До недавнего времени считалось, что изотопный состав этих элементов в метеоритах постоянен. Однако



Изотопный состав углерода различных углеродсодержащих фаз в железных метеоритах.

А — жильный графит; В — углерод из силикатных включений; С — когенит; D — тэнит; E — остатки.

более тщательные исследования показали, что вариации изотопных отношений могут быть значительными, но не в такой степени, как в земных горных породах. Отклонение в изотопном составе этих элементов может достигать 2—3% от земного стандарта.

Ф. Бегеманн и К. Хайпцингер [10] определили содержание углерода и его изотопный состав в темных и светлых участ-

ках бронзитовых хондритов Pantar и Breitscheid, обогащенных первичными редкими газами. Содержание углерода в темных частях хондритов в 2—6 раз выше, чем в светлых. По изотопному составу углерод в темных частях обогащен на 0,5% изотопом  $^{13}\text{C}$  по сравнению со светлым: средняя величина  $\delta^{13}\text{C}$  для темной части метеорита Pantar — 1,56%, для светлой — 2,18%; для темной части метеорита Breitscheid — 2,05%, для светлой — 2,43%. Для другого образца метеорита Pantar, не обогащенного легкими первичными редкими газами, не найдено заметного отличия по изотопному составу углерода: для темной части  $\delta^{13}\text{C} = -2,08\%$ , для светлой — 1,92%. Авторы считают, что обнаруженные отличия обусловлены либо примешиванием фракции углистых хондритов, либо обеднением углеродом и его тяжелым изотопом на некоторой стадии в истории метеоритного вещества.

П. Дайнес и Ф. Уикмэн [17, 18] исследовали изотопный состав углерода в железных метеоритах и выявили вариации содержания  $^{13}\text{C}$  в различных углеродсодержащих фазах метеоритов: жильном графите, углероде из силикатных включений, когените и тэните. Их данные представлены на рисунке. Следует отметить систематические различия в изотопном составе между графитом, с одной стороны, и когенитом и тэнитом — с другой. Наблюдается также слегка более низкое содержание  $^{13}\text{C}$  в тэните по сравнению с когенитом, однако количество исследованных образцов слишком ограничено, чтобы сделать более или менее определенные выводы. Возможным объяснением наблюдающегося распределения  $^{13}\text{C}$  между графитом, когенитом и тэнитом может быть то, что оно отражает приближение к изотопному равновесию и обусловлено свойствами изотопного фракционирования рассматриваемых фаз. Такую интерпретацию можно подтвердить тем, что обогащение  $^{13}\text{C}$  в графите, в тэните и

когенит происходит приблизительно одинаково и является общим процессом в железных метеоритах. Обогащение наблюдается в направлении, ожидаемом из теоретических предпосылок. Рассматриваемые фазы связаны между собой отношениями химических фаз и тем, что в истории железных метеоритов отмечены высокие температуры.

Р. Бретт [13] предположил, что когенит является характерным минералом железных метеоритов, содержащим 6—8% никеля и образующимся в узком температурном интервале 650—610°C при охлаждении метеорита. Если это так и если к тому же имело место приближение или достижение равновесия между когенитом и графитом, можно ожидать, что различия изотопного состава углерода у графита и когенита относительно постоянны. Можно предположить, что размер изотопного фракционирования углерода между когенитом и графитом зависит от температуры.

Возможно также другое объяснение. Только графит и углерод твердого раствора могут быть связаны между собой равновесием изотопного обмена, в то время как когенит, образуясь, просто наследует содержание  $^{13}\text{C}$  от тэнита. Возможно также, что наблюдающиеся вариации вообще не связаны с явлениями изотопного обмена. В таком случае можно предположить существование двух источников углерода с различными содержаниями  $^{13}\text{C}$  для включений графита и углерода твердого раствора, чтобы объяснить относительное постоянство их изотопного состава и постоянное различие в содержании  $^{13}\text{C}$  между ними. Лучше понять ту часть истории железных метеоритов, в течение которой установились наблюдаемые вариации  $\delta^{13}\text{C}$ , помогли бы экспериментальные исследования фракционирования  $^{13}\text{C}$  в системе Ni—Fe—C совместно с дальнейшими исследованиями распределения изотопов углерода.

Исследование углерода из силикатных включений обнаружило для него целую область изотопных составов. В то время, как все образцы метеорита El Taso и два образца метеорита Four Corners имеют содержания  $^{13}\text{C}$ , сходные с графитовыми включениями, три силикатных включения из Four Corners содержат углерод, обедненный  $^{13}\text{C}$ . Т. Бунч с соавторами [14] предположили, что вариации отношения  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  связаны с общим содержанием углерода в силикатных включениях (наблюдалось обогащение  $^{13}\text{C}$  силикатных включений с большим содержанием углерода) таким образом, что железные метеориты с высоким содержанием углерода в силикатных включениях никогда не находились в расплавленном состоянии. Согласно мнению этих авторов, включения представляют собой более древний силикатный материал, захваченный более молодым железо-никелевым расплавом, который быстро затвердел, заключая в себе силикаты и предотвращая их гравитационное разделение.

В таком случае тяжелый углерод в некоторых образцах можно было бы отнести к первоначальному углероду в этих включениях. Затвердевающее вокруг них никелистое железо могло содержать

углерод в твердом растворе, который при охлаждении осаждался бы в виде графита наиболее вероятно поблизости или на существующем уже графите. Некоторые графитовые зерна во включениях могли быть защищены от такого рода осадка и сохранили первоначальное содержание  $^{13}\text{C}$ , другие могли существенно вырасти за счет такого осаждения.

Другим механизмом образования вариаций изотопного состава в силикатных включениях могло быть удаление углерода, если он участвовал в реакциях восстановления [42]. Поскольку CO показывает относительное обогащение  $^{12}\text{C}$  по сравнению с графитом, удаление углерода в такой форме привело бы к обеднению  $^{12}\text{C}$  в остатке [12, 39]. Если же по какой-либо причине углерод был удален в форме  $\text{CO}_2$ , это привело бы к обеднению  $^{13}\text{C}$ , поскольку  $\text{CO}_2$  обнаруживает обогащение  $^{13}\text{C}$  по сравнению с графитом [там же].

Н. Онума и др. [33] определили изотопный состав кислорода в различных фракциях углистых хондритов типа C2 и C3. Во фракциях оливина с изменяющимися значениями отношения Fe/Mg величины отношения  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  имеют систематическую вариацию с увеличением фаялита. Это указывает на понижение температуры химического и изотопного обмена между твердым веществом и газом в солнечной туманности. Низкая величина  $\delta^{18}\text{O} = -13\%$  для оливина метеоритов C3, как и для галенито-шпинелевых агрегатов Allende, свидетельствует о том, что этот оливин образовался в газовой туманности при более высокой температуре, чем оливин метеоритов C2. Авторы считают, что различия в изотопном составе кислорода метеоритов C2 и C3 исключают прямую генетическую взаимосвязь между ними.

**Азот.** В. Инджерд и И. Каплан [24] определили содержание и изотопный состав азота в пяти углистых и одном энстатитовом хондрите. В направлении от углистых хондритов C1 к типу C3 происходит уменьшение общего азота от  $1476 \cdot 10^{-4}$  до  $19 \cdot 10^{-4}\%$ , одновременно уменьшается величина  $\delta^{15}\text{N}$  от  $+4,62$  до  $+0,56\%$  (относительно воздушного). Для энстатитового хондрита  $\text{N} = 204,10 \cdot 10^{-4}\%$ ,  $\delta^{15}\text{N} = -2,04\%$ . Эти результаты могут свидетельствовать о том, что солнечная туманность была изотопно обогащена  $^{15}\text{N}$  более чем на 5% относительно воздушного азота.

Дж. Керридж [25] обнаружил вариации изотопного состава азота солнечного происхождения, имплантированного в образцы лунного грунта. Образцы, старше по возрасту, характеризуются пониженными отношениями  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ . Автор предполагает, что рост содержания  $^{15}\text{N}$  солнечного происхождения за время существования лунного реголита связан с реакциями скалывания  $^{16}\text{O}$  на поверхности Солнца.

**Ванадий.** Исследованию изотопного состава ванадия в метеоритах различных классов посвящен целый ряд работ [8, 9, 35]. Существенных вариаций изотопного состава ванадия не обнаружено. Величина отношения  $^{50}\text{V}/^{51}\text{V}$  изменяется в узких пределах —

от  $(2,414 \pm 0,066) \cdot 10^{-3}$  до  $(2,488 \pm 0,027) \cdot 10^{-3}$  и совпадает со средним земным отношением  $^{50}\text{V}/^{51}\text{V}$ , равным  $(2,460 \pm 0,004) \cdot 10^{-3}$ . Липшутц и др. [27] определили изотопный состав ванадия в образцах лунных пород, доставленных «Apollo-15». Найденное отношение  $^{50}\text{V}/^{51}\text{V}$  в пределах ошибки измерения равно таковому для метеоритов и земных пород и составляет  $(2,465 \pm 0,003) \cdot 10^{-3}$ . Х. Бальзигер с соавторами [9] определили среднюю величину отношения  $^{50}\text{V}/^{51}\text{V}$  для образцов различных объектов Солнечной системы, она равна  $(2,425 \pm 0,030) \cdot 10^{-3}$ . Они считают, что отсутствие вариаций изотопного состава ванадия ограничивает возможные различия в процессе облучения различных объектов Солнечной системы энергетически заряженными частицами и ставит под вопрос гипотезу неполного смешивания материалов с разными этапами нуклеосинтеза.

**Галлий.** Определен изотопный состав галлия в 6 железных метеоритах [26], величины отношения  $^{71}\text{Ga}/^{69}\text{Ga}$  для них оказались близкими к среднему земному значению, равному  $0,6559 \pm 0,0005$ . Максимальное отклонение данных для метеоритов по отношению к средней земной величине составляет — 1,1% для Canyon, Diablo и Mt. Dooling.

**Редкоземельные элементы.** Изотопные исследования гадолиния, самария и европия в метеоритах различных классов [28] не обнаружили аномалий, несмотря на то, что  $^{149}\text{Sm}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{153}\text{Eu}$  и  $^{157}\text{Gd}$  имеют огромные сечения захвата тепловых нейтронов. Постоянство изотопного состава этих элементов в метеоритах различных классов и земных образцах свидетельствует либо о полной гомогенизации вещества после облучения, либо о том, что последнего вообще не было.

**Барий.** Умемото [38] сообщил о смещении изотопного состава бария в метеоритах, особенно значительном для более легких его изотопов. Однако, как показали исследования О. Ойгстера с соавторами [20], которые определили изотопный состав бария в метеоритах и земных образцах методом изотопного разбавления, это смещение обусловлено, скорее всего, инструментальным фракционированием изотопов бария. Различия в изотопном составе метеоритного и земного бария по их данным не превышают 0,1%.

То же можно сказать и о смещениях изотопного состава молибдена и серебра, обнаруженных В. Марти [30, 31]. Вероятнее всего, они также обусловлены инструментальным фракционированием, поскольку последующие измерения изотопного состава серебра [16] и молибдена [43] не обнаружили изотопного смещения.

**Таллий.** Исследования изотопного отношения  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$  проводились с целью выявить аномалии, свидетельствующие о былом существовании радиоактивного  $^{205}\text{Pb}$ . Были исследованы 17 образцов хондритов, а также лунная пыль «Apolлон-11 и -12» [23], троилитовая и металлическая фракции железного метеорита Canyon, Diablo [34]. Величины отношения  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$  оказались близ-

кими к величине, характерной для земного Pb и равной  $2,3890 \pm \pm 0,0005$ . Таким образом, в пределах ошибки определения признаков существования в прошлом «вымершей» природной радиоактивности изотопов  $^{205}\text{Pb}$  не обнаружено.

**Ксенон, свинец.** Наиболее полно исследованы среди тяжелых изотопов изотопы ксенона и свинца. Подробные сведения о них содержатся в работах Э. В. Собоновича [5, 6]. Здесь следует упомянуть лишь о некоторых аномалиях изотопного состава этих элементов в метеоритах.

Дж. Рейнольдс [37] отметил в хондритах Ричардтон значительный избыток  $^{129}\text{Xe}$  по сравнению с атмосферным ксеноном. Он предположил, что этот избыток обусловлен распадом  $^{129}\text{J}$ , который вошел в каменные метеориты во время их образования и, распадаясь, привел к накоплению продуктов распада с момента, когда метеориты были способны удерживать ксенон.

Что касается изотопов свинца, то в некоторых железных метеоритах (Августиповка, Богуславка, Сихотэ-Алинь, Санта Катарина и др. — метеориты II группы) обнаружен значительный избыток тяжелых изотопов  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  относительно  $^{204}\text{Pb}$ . Наличие этого радиогенного свинца не связано ни с ураном, распространенность которого в железных метеоритах на 3—6 порядков меньше распространенности свинца, ни с загрязнениями земным свинцом. Это должно означать, что большинство железных метеоритов образовалось либо 300—500 млн. лет назад (что не согласуется с данными других методов радиометрического датирования), либо задолго до земных событий, т. е. они на 300—500 млн. лет древнее метеоритов I группы и Земли. Можно предположить, что группы железных метеоритов с самого начала образовались в двух различных свинцово-урановых системах. Иными словами, в состав протосолнечной туманности входил материал по крайней мере двух генераций, различающийся по свинцово-урановому отношению.

Изложенные выше данные по изотопным сдвигам в метеоритах могут помочь выяснению физико-химической обстановки в протопланетном облаке. В табл. 2 суммированы некоторые вопросы космохимического плана, на которые можно получить положительный (+) или отрицательный (—) ответ, исследуя изотопные отношения ряда элементов начала, середины и конца периодической таблицы. Список исследованных элементов нашей таблицей не исчерпан. Например, сюда не включены данные по радиоактивным элементам — K, U и трансурановым элементам, по изотопам благородных газов (кроме ксенона) и т. д. Эти элементы несут огромное количество информации. Интерпретация их изотопных сдвигов потребовала бы отдельного исследования, выходящего за рамки настоящей статьи.

Вернемся к рассмотрению табл. 2. В целом все легкие элементы отвечают на поставленные вопросы положительно, средние, наоборот, отрицательно, а тяжелые и положительно (Xe, Pb, т. е. име-

## Корреляция химических элементов с некоторыми космологическими процессами

| Возможная причина наблюдаемых отношений   | Легкие элементы |   |   |   |   | Средние элементы |    |    | Тяжелые элементы |    |    |    |   |    |
|---|-----------------|---|---|---|---|------------------|----|----|------------------|----|----|----|---|----|
|   | Li              | B | C | N | O | V                | Ga | Mo | Ag               | Xe | Ba | Rb | U | Pb |
| Гетерогенность протопланетного облака   | +               |   | + |   | + | -                | -  | -  | -                | +  |    |    |   | +  |
| Смесь первоначального (реликтового) и генерированного (солнечного) вещества (различные режимы нуклеосинтеза)                |                 |   | + |   | + |                  |    |    |                  | +  |    |    |   | +  |
| Фракционная конденсация в облаке с последующей аккрецией материала из районов облака с различными конденсационными режимами |                 |   | + |   | + |                  |    |    |                  |    |    |    |   |    |
| Спагетные процессы на этапе плазмы и газа, а также в конденсированных системах, в том числе и в твердых телах               | +               | + |   | + |   | -                | -  | -  | -                |    |    |    |   |    |
| Облучение нейтронами за счет воздействия Сверхновой и ранней солнечной активности   | +               | + |   |   |   |                  |    |    |                  | +  |    |    |   |    |
| Физическое и химическое фракционирование  | +               |   | + | + |   | -                | -  | -  | -                | -  | -  | -  | - | -  |

ющие радиогенное происхождение), и отрицательно (в том числе и редкоземельные элементы, хотя они и должны были бы быть индикаторами по крайней мере события нейтронного облучения, на которое указывают, скажем, легкие изотопы).

Вопрос о гетерогенности или гомогенности протопланетного облака — это вопрос принципиальный, поскольку от ответа на него зависит способ конструирования моделей аккреции твердых тел Солнечной системы и в конечном итоге основы теоретической геологии [7].

Гетерогенность, в свою очередь, может быть обусловлена либо неполной переработкой досолнечного облака под действием каких-либо энергетических источников (вспышки Сверхновой или сжимающегося Солнца), либо различиями в конденсационных режимах остывающей плазмы. Правда, в последнем случае изотопных сдвигов для тяжелых элементов вряд ли следует ожидать, поскольку тогда значимыми могут быть только физическое или химическое фракционирование изотопов (п. 4, табл. 2). Для средних элементов, таких как ванадий, этот эффект можно было бы уловить современной аналитической техникой, если бы он имел место. Действительно, в случае постепенно остывающей плазмы центробежные и гравитационные силы неминуемо должны были бы привести к физической сепарации изотопов с массовыми числами, по крайней мере, до 100, а может быть и более тяжелых. В земных условиях

мы в состоянии разделить даже такую тяжелую изотопную смесь, как  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в виде  $\text{UF}_6$ , а ведь элементарная «колонка» в облаке имеет неизмеримо большую протяженность, чем это можно было бы мыслить в условиях Земли. Тем не менее значимых изотопных сдвигов даже для средних элементов не наблюдается. Отсюда следует вывод о том, что в самом облаке физического или химического фракционирования изотопов не было, а наблюдаемые эффекты смещений в случае легких изотопов можно объяснить постакумуляционными событиями. При этом ставится под вопрос и тезис о том, что первоначальное облако представляло собой фактически солнечную плазму.

Спаллагенные процессы (реакции скалывания) в принципе отмечаются для всех элементов. В случае легких этот эффект велик и легко идентифицируется масс-спектрометрическим методом, для средних элементов мы имеем целую гамму радиоактивных нуклидов, образовавшихся в телах метеоритов или, скажем, в лунной почве по реакциям скалывания более тяжелых ядер. В табл. 2, п. 4, значок (—) для средних и тяжелых элементов означает, что изотопные сдвиги не зафиксированы масс-спектрометрическим путем, т. е. нет вариаций в стабильных изотопах, и вовсе не означает, что спаллагенные процессы на средних и тяжелых нуклидах не идут.

Тот факт, что различные нуклиды дают противоречивую информацию, свидетельствует о том, что наши представления о ранней истории Солнечной системы далеки от действительности. Возможно, мы, следуя гипнозу термоядерных процессов в звездах и рутинных гипотез об образовании Солнечной системы, не учитываем каких-то других возможностей, и наши вопросы, поставленные в табл. 2, не имеют физического смысла, и прямого ответа на них быть не может. На это обстоятельство еще накладывается и несовершенство современной техники эксперимента. Тем не менее авторы выражают надежду, что с накоплением изотопных данных и развитием теоретических представлений картина ранней истории Солнечной системы должна проясниться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горбов А. Ф. Изменения изотопного состава бора в природе и их геохимическое значение. — В кн.: Труды Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института галургии. М., 1969, вып. 54, с. 174—192.
2. Заславский В. Г., Левский Л. К., Мурин А. Н. Изотопный состав лития, калия, рубидия и стронция в лунном грунте. — В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М., Наука, 1974, с. 363—364.
3. Левский Л. К., Мурин А. Н., Заславский В. Г. Изотопный состав лития в метеоритах (хондриты). — Геохимия, 1969, № 1, с. 3—7.
4. Левский Л. К., Мурин А. Н., Заславский В. Г. Изотопный состав лития в метеоритах. — Геохимия, 1972, № 2, с. 212—220.
5. Соботович Э. В. Изотопы свинца в геохимии и космохимии. М., Атомиздат, 1970. 349 с.
6. Соботович Э. В. Изотопная космохимия. М., Атомиздат, 1974. 208 с.

7. **Соботович Э. В., Рудник В. А.** Космогеологические аспекты формирования Земли.— В кн.: Проблемы космохимии и метеоритики. Киев, Наука думка, 1971, с. 51—117.
8. **Balsiger H., Geiss J., Lipschutz M. E.** Vanadium isotopic composition in meteoritic and terrestrial matter.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1969, v. 6, N 2, p. 117—122.
9. **Balsiger H., Mendia M. D., Pelly I. Z., Lipschutz M. E.** Vanadium isotopic composition and contents in gas-rich meteorites.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1976, v. 28, N 3, p. 379—384.
10. **Begemann F., Heinzinger K.** Content and isotopic composition of carbon in the light and dark portions of gas-rich chondrites.— In: *Meteorite Research* (ed. P. Millman). Dordrecht, Holland, 1969, p. 87—92.
11. **Bernas R., Gradsztajn E., Yaniv A.** Isotopic composition of lithium in some meteorites and the role of neutrons in the nucleosynthesis of the light elements in the solar system.— In: *Meteorite Research* (ed. P. Millman). Dordrecht, Holland, 1969, p. 123—131.
12. **Bottinga Y.** Carbon isotope fractionation between graphite, diamond and carbon dioxide.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1969, v. 5, p. 301—307.
13. **Brett R.** Cohenite: its occurrence and a proposed origin.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, v. 31, p. 143—159.
14. **Bunch T. E., Keil K., Olsen E.** Mineralogy and petrology of silicate inclusions in iron meteorites.— *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1970, v. 25, p. 297—340.
15. **Burnett D., Fowler W. A., Hoyle F.** Nucleosynthesis in the early history of the solar system.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1965, v. 29, N 12, p. 1209—1242.
16. **Chakraborty A. K., Stevens C. M., Rushing H. C., Anders E.** Isotopic composition of silver in iron meteorites.— *J. Geophys. Res.*, 1964, v. 69, p. 505—520.
17. **Deines P., Wickman F. E.** The isotopic composition of «grafitic» carbon from iron meteorites and some remarks on the troilitic sulfur of iron meteorites.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, v. 37, N 5, p. 1295—1319.
18. **Deines P., Wickman F. E.** A contribution to the stable carbon isotope geochemistry of iron meteorites.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1975, v. 39, N 5, p. 547—557.
19. **Epherre M., Gradsztajn E.** Calcul de la spallation de  $C^{12}$  et  $O^{16}$  par des protons de 70 A 200 Mev.— *J. Phys.*, 1967, v. 28, N 10.
20. **Eugster O., Tera F., Wasserburg G. J.** Isotopic analyses of barium in meteorites and in terrestrial samples.— *J. Geophys. Res.*, 1969, v. 74, N 15, p. 3897—3908.
21. **Fowler W. A., Greenstein Y. L., Hoyle F.** Nucleosynthesis during the early history of the solar system.— *Geophys. J. R. A. S.*, 1962, v. 6, N 2.
22. **Gradsztajn E., Salome M., Yaniv A., Bernas R.** Isotopic analysis of lithium in the Holbrook meteorite and in terrestrial samples with a sputtering ion source mass spectrometer.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1968, v. 3, N 5, p. 387—393.
23. **Huey J. M., Kohman T. P.** Search for extinct natural radioactivity of  $^{205}\text{Pb}$  via thallium — isotope anomalies in chondrites and lunar soil.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1972, v. 16, N 3, p. 401—412.
24. **Injerd W. G., Kaplan I. R.** Nitrogen isotope distribution in meteorites.— *Meteoritics*, 1974, v. 9, N 4, p. 352—353.
25. **Kerridge J. F.** Solar nitrogen: evidence for a secular increase in the ratio of nitrogen-15 to nitrogen-14.— *Science*, 1975, v. 188, N 4184, p. 162—164.
26. **De Laeter J. R.** The isotopic composition and elemental abundance of gallium in meteorites and in terrestrial samples.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1972, v. 36, N 7, p. 735—743.
27. **Lipschutz M. E., Balsiger H., Rey P., Pelly I. Z., Mendia M. D.** Vanadium isotopic composition and ferromagnesian element contents of three Apollo 15 samples.— In: *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, Houston, Tex., 1973, v. 2. N. Y., 1973, p. 1369—1378.

28. Loveless A. J., Yanagita S., Mabushi H., Ozima M., Russell R. D. Isotopic ratios of Gd, Sm and Eu in Abee enstatite chondrite.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1972, v. 36, N 6, p. 685—698.
29. Mitler H. E. Origin of the rare light nuclides.— In: *High-energy nuclear reactions in astrophysics* (ed. Shen B. S. P.). N. Y., 1967.
30. Murthy V. R. Isotopic composition of silver in an iron meteorite.— *Phys. Rev. Let.*, 1960, v. 5, p. 539.
31. Murthy V. R. Elemental and isotopic abundances of molybdenum in some meteorites.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1963, v. 27, N 11, p. 1174—1178.
32. Nishimura H., Okano J. Isotopic ratio of chondrite measured by ion probe mass spectrometer.— *Jap. J. Appl. Phys.*, 1974, v. 10, N 11, p. 1613—1622.
33. Onuma N., Clayton R. N., Maueida T. R. Oxygen isotope abundances in C2 and C3 meteorites.— *Meteoritics*, 1973, v. 8, N 1, p. 63.
34. Ostic R. G., El-Badry H., Kohman T. P. Isotopic composition of meteoritic thallium.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1969, v. 7, N 1, p. 72—76.
35. Pelly I. Z., Lipschutz M. E., Balsiger H. Vanadium isotopic composition and contents in chondrites.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1970, v. 34, N 9, p. 1033—1036.
36. Poschenrieder W. P., Herzog R. F., Barrington A. E. The relative abundance of the lithium isotopes in the Holbrook meteorite.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1965, v. 29, N 11, p. 1193—1195.
37. Reynolds J. H. Isotopic composition of primordial xenon.— *Phys. Rev. Let.*, 1960, v. 4, p. 351.
38. Umemoto S. Isotopic composition of barium and cerium in stone meteorites.— *J. Geophys. Res.*, 1962, v. 67, N 1, p. 375—379.
39. Urey H. C. Thermodynamic properties of isotopic substances.— *J. Chem. Soc.*, 1947, p. 562—581.
40. Wagoner R. V. Cosmological element production.— *Science*, 1967, v. 155, N 3768, p. 1369—1383.
41. Wagoner R. V., Fowler W. A., Hoyle F. On the synthesis of elements at very high temperatures.— *Ar. J.*, 1967, v. 48, N 1.
42. Wasson J. T. Ni, Ga, Ge and Ir in the metal of iron meteorites—with-cilicate — inclusions.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1970, v. 34, N 9, p. 957—964.
43. Wetherill G. W. Isotopic composition and concentration of molybdenum in iron meteorites.— *J. Geophys. Res.*, 1964, v. 69, N 20, p. 4403—4408.
44. Yaniv A. The nucleosynthesis of light elements (D, Li, Be, B) in solar system and cosmic dust research. Thesis, 1968.

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КОСМОГЕННОСТИ СИЛИКАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЧВ ИЗ РАЙОНА ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА ПО РАДИОУГЛЕРОДНЫМ ДАННЫМ

*Э. В. СОВОТОВИЧ, И. Н. КОВАЛЮХ, И. В. ВАСИЛЬЕВ,  
И. В. САДОЛЬКО, Л. В. ПЕТРЕНКО*

Земля постоянно вступает в контакт с космической пылью, имеющей различное происхождение и состав. На ее поверхности ежегодно выпадают миллионы тонн космического вещества (табл. 1). Мелкодисперсное космическое вещество, входящее в состав высокогорных ледников, глубоководных океанических осадков, торфов, почв и т. д., можно идентифицировать по содержанию радиоактивных изотопов  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{14}\text{C}$ . Эти так называемые кос-

## Скорость аккреции космического вещества Землей по данным изотопных анализов

| Источник материала                                      | Реперный элемент или нуклид     | Скорость аккреции, т/год |
|---|---------------------------------|--------------------------|
| Глубоководные глины (Тихий и Атлантический океаны) [19] | $^3\text{He}$                   | $3,7 \cdot 10^4$         |
| То же [19]  | $^{36}\text{Cl}$                | $3,7 \cdot 10^5$         |
| Океанические отложения [18]                             | $^{14}\text{C}$                 | $3,7 \cdot 10^8$         |
| Гренландская пыль [21]                                  | $^{36}\text{Cl}$                | $40^6$                   |
| Глубоководные осадки [15]                               | $^{26}\text{Al}$                | $4 \cdot 10^6$           |
| Гренландский лед [17]                                   | $^{26}\text{Al}$                | $3,2 \cdot 10^5$         |
| Океанические отложения [20]                             | $^{26}\text{Al}$                | $(9-90) \cdot 10^4$      |
| Гренландский лед [22]                                   | $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ | $3,6 \cdot 10^5$         |
| Ледники (Кавказ) [10]                                   | $^{14}\text{C}$                 | $3,5 \cdot 10^8$         |
| Торф (Тунгуска, современные слои)<br>[данная работа]    | $^{14}\text{C}$                 | $3,1 \cdot 10^8$         |

могенные нуклиды образуются по реакциям скалывания в результате взаимодействия космического излучения с веществом в Космосе.

Как известно, метеориты представляют собой остатки более крупных обломков астероидов, поэтому измеренные в них концентрации изотопов, например  $^{14}\text{C}$ , окажутся значительно меньше, чем они были в поверхностных частях первоначальных обломков. Выпадающая на земную поверхность космическая пыль в некоторой степени состоит из продуктов абляции метеоритов. Следовательно, в части пыли, генерируемой метеоритами при пролете их через атмосферу, содержание  $^{14}\text{C}$  должно быть более высоким, чем в самом теле метеорита. С другой стороны, в телах миллиметровых размеров космогенные нуклиды генерируются в меньшей степени, чем в телах размером до 1 м [9].

Известно также, что концентрация  $^{14}\text{C}$  и в лунных почвах составляет 60—100 расп/мин·кг; это количество радиоуглерода генерируется космическими лучами и солнечным ветром, причем последний, по оценкам Э. В. Собоновича [10], приносит до 90% всего наличия  $^{14}\text{C}$ . К сожалению, мы не можем с достаточной достоверностью оценить вклад в космическую пыль, выпадающую на поверхность Земли, продуктов абляции метеоритов, продуктов распада комет и самой космической пыли первоначального происхождения [9, 10]. В связи с этим очень трудно выбрать тот нуль-пункт отсчета, который являлся бы показателем 100%-ной космогенности.

Учитывая, однако, что космическая пыль, выпадающая на Землю, содержит по крайней мере два компонента: один с более высоким, чем у каменных метеоритов, содержанием  $^{14}\text{C}$ , а другой с более низким,— мы полагаем, что в первом приближении за указанный нуль-пункт можно принять концентрацию  $^{14}\text{C}$  в ка-

менных метеоритах, а именно  $63 \pm 10$  расп/мин·кг [47]. Выбор каменных метеоритов в качестве эталона обусловлен тем, что нами исследовались силикатные сферулы торфяников района Тунгусской катастрофы.

Комплексной метеоритной экспедицией Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР, Томского госуниверситета и Томского отделения ВАГО, в составе которой работал метеоритный отряд Института геохимии и физики минералов АН УССР, была отобрана серия проб почв и торфа для определения содержания в них ряда элементов и их изотопов.

В данной работе рассматриваются результаты, полученные по изучению удельной активности радиоуглерода в силикатах эпицентра Тунгусской катастрофы.

Площадная съемка, проведенная К. П. Флоренским в 1961—1962 гг. в районе Тунгусского падения, выявила в почвах повышенную концентрацию железосодержащих сферул, отнесенных предположительно к веществу Тунгусского метеорита [43]. Позднее (1968—1975 гг.) было показано, что слой торфа, относящийся к 1908 г., обогащен в районе Тунгусской катастрофы оплавленными силикатными частицами, имеющими скорее всего космогенную природу [6].

Следует отметить, что выпадение как магнетитовых, так и силикатных сферул в районе Тунгусского взрыва происходило по площади весьма неравномерно. Наряду с зонами резкого обогащения имеются районы, относительно обедненные сферулами.

Учитывая физическую картину разрушения Тунгусского тела, его большую массу и достаточно высокую (не менее 0,5 с) продолжительность процесса разрушения над местом катастрофы, есть все основания думать, что значительная часть космического материала могла выпасть на поверхность Земли не в форме оплавленных сферул, а в виде остроугольных частиц.

Действительно, последние оценки показывают, что на площади района катастрофы порядка 10 тыс. км<sup>2</sup> осело не более десятков тонн силикатных и магнетитовых сферул [5]. Эта величина на несколько порядков ниже вероятной общей массы Тунгусского метеорита (не менее нескольких десятков тысяч тонн). Кроме того, не исключено, что летучий компонент Тунгусского метеорита, представленный замерзшими газами, частично адсорбировался различными природными объектами (почва, торф, растительность).

В связи с вышеизложенным представляется перспективным продолжение поисков вещества Тунгусского метеорита, ориентированных не только на сферический компонент мелкодисперсного материала, но и на другие его фракции. Обнаружение сферического компонента (шариков) является в этом случае индикатором мест максимального обогащения поверхностных объектов района катастрофы космическим материалом.

В ходе работ, проведенных в 1965—1975 гг., было выявлено несколько точек, расположенных вблизи эпицентра взрыва и ано-

мальных по ряду показателей. К числу таких точек относятся прежде всего окрестности горы Острой, находящейся в 5 км западнее Изб Кулика.

Указанный район является тем местом, где продолжение траектории падения Тунгусского метеорита соприкасается с поверхностью Земли при условии наклона траектории 35—40° [2]. Опробование, проведенное в 1966 г., выявило в почвах этого района повышенную концентрацию ряда элементов, в частности Рb и редких земель [1]. Слой торфа на болотах в районе горы Острой, относящийся к 1908 г., резко обогащен силикатными сферами. Район горы Острой характеризуется резко выраженными аномалиями генетического фона растений. В связи с этим описываемый район может служить достаточно представительным полигоном для отбора проб почв и торфа с целью поиска в них мелкодисперсной фракции вещества Тунгусского метеорита.

Нами в качестве объекта исследования были выбраны силикатные частицы из сфагновых торфов верховых болот. По сравнению с почвой данный субстрат обладает следующими преимуществами: во-первых, состав его мало зависит от химического состава подстилающих пород, так как мох *sphagnum-fuscum* — олиготроф, получает микроэлементы из воздуха за счет выпадения аэрозолей; во-вторых, торф сравнительно легко стратифицируется, благодаря чему удается выделить слой, заведомо соответствующий времени падения Тунгусского тела; в-третьих, адсорбционная способность мха очень велика.

Методика выделения силикатов из торфа для определения в них содержания радиоуглерода заключалась в следующем. Высушенный торф сжигался в кварцевом реакторе при 450—500°C. С целью удаления карбонатов полученный после сжигания концентрат промывали однонормальным раствором соляной кислоты.

Для полного удаления органического вещества остаток обрабатывали смесью концентрированной серной кислоты и перекиси водорода (1 : 2), промывали дистиллированной водой и кипятили в течение 2 ч в концентрированной HNO<sub>3</sub>. После кипячения силикаты промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции и сушили в сушильном шкафу при 150°C.

В связи с тем, что радиоуглерод, образующийся по реакциям скалывания в твердых телах (метеориты, космическая пыль), должен находиться внутри кристаллических решеток этих тел, для выделения его мы применяли методику сжигания силикатов в токе кислорода с одновременной щелочной плавкой [8]. Мелкодисперсный силикатный остаток смешивали с перекисью натрия и носителем углекислоты мрамором (не содержащим радиогенного углерода) в соотношении 1 : 3 : 3 и сплавляли в кварцевом реакторе в токе кислорода при 1100°C. Для полного удаления углекислоты из силикатной составляющей торфов щелочной плав измельчали и обрабатывали 20%-ной хлорной кислотой.

Распределение радиоуглерода в силикатных частицах тунгусских торфов

| № слоя | Интервал отбора пробы, см | Колич. отобранной пробы, кг | Активность пробы, расп/мин | Удельная активность силикатов, расп/мин·кг | Степень космогенности, % | Выпадение космического вещества на единицу площади, г/м <sup>2</sup> | Выпадение космического вещества на катастрофную площадь, т (2450 км <sup>2</sup> ), т |
|--------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|--------------------------|--|---|
| 1-6    | 1-18                      | 1000                        | 4,88±0,15                  | 3,3·10 <sup>-4</sup>                       | 5,24·10 <sup>-4</sup>    | 0,61   | 1,32·10 <sup>3</sup>  |
| 7      | 9-21                      | 400                         | 4,56±0,15                  | —  | —                        | —  | —   |
| 8-13   | 22-39                     | 1000                        | 5,51±0,15                  | 9,6·10 <sup>-4</sup>                       | 1,53·10 <sup>-3</sup>    | 1,78   | 3,83·10 <sup>3</sup>  |
| 14     | 40-42                     | 400                         | 4,90±0,15                  | 3,5·10 <sup>-4</sup>                       | 5,56·10 <sup>-4</sup>    | 0,78   | 1,68·10 <sup>3</sup>  |
| Фон    | —                         | —                           | 4,55±0,05                  | —  | —                        | —  | —   |

Из выделенного углекислого газа синтезировался бензол—счетная форма радиоуглерода.

Для регистрации <sup>14</sup>C использовалась двухканальная низкофоновая сцинтиляционная установка, собранная на базе серийного спектрометра «Ангара» и имеющая быструю и медленную схемы совпадений. Установка имела фон 2,64 имп/мин на 10 мл бензола и эффективность счета β-частиц 50%.

Результаты измерений приведены в табл. 2. Слой торфа, относящийся к 1908 г., находится в интервале 22—39 см (слои 8—13). Превышение активности радиоуглерода над фоновой в этих слоях находится за пределами ошибки счета и обязательно, по-видимому, силикатным частицам, выпавшим во время Тунгусской катастрофы. По величине превышения средней активности радиоуглерода в каменных метеоритах 63 расп/мин·кг можно рассчитать весовое содержание силикатного космического мелкодисперсного вещества в исследованном образце торфа. Зная среднюю плотность торфа (0,7 г/см<sup>3</sup>), определенную нами на катастрофной площади 2150 км<sup>2</sup>, и степень космогенности данного торфа, легко вычислить количество выпавшего космического вещества в области вывала. По нашим подсчетам оно составляет 3,83·10<sup>3</sup> т.

Полученные данные позволяют предполагать, что в районе горы Острой действительно произошло массивное выпадение космического материала. В связи с этим представляет большой интерес исследование градиента падения плотности космического вещества в почвах района катастрофы от горы Острой к периферии. Для решения этого вопроса представлялся целесообразным отбор проб почв по професам большого лесотоксационного креста, заложенного экспедициями 1960—1961 гг. Как известно, центр креста приходится на вершину горы Стойкович, находя-

Таблица 3

Распределение  $^{14}\text{C}$  во фракциях силикатов, выделенных из тунгусских почв (гора Острая, пересечение западной и тракторной просек)

| Величина фракции, мк | Активность, пробы, расп/мин |
|----------------------|-----------------------------|
| 10—100               | 4,92±0,2                    |
| 100—200              | 4,61±0,15                   |
| 200—500              | 4,50±0,2                    |
| 500                  | 4,56±0,2                    |
| Фон                  | 4,54±0,05                   |

щуюся вблизи эпицентра Тунгусского взрыва, а просеки его пересекают площадь вывала по профилям север—юг и запад—восток на расстояние до 30 км. Точная привязка пикетов лесотоксационных площадей на просеках обеспечивает точные координаты отбора проб.

Площади очищались от растительности и опавших листьев, после чего срезался поверхностный 3-сантиметровый слой почвы, который укладывался в полиэтиленовые мешки. Вес каждой пробы составлял 250 кг.

Высушенную пробу почвы разделяли на фракции. Распределение удельной активности радиоуглерода в различных фракциях силикатов приведено в табл. 3.

Как видно из табл. 3, практически весь  $^{14}\text{C}$  находился в силикатных частицах размером до 200 мк.

По выделенным связанным гуминовым кислотам производилось определение возраста почвы радиоуглеродным методом. Возраст почвы оказался равным  $150 \pm 25$  лет. Скорость накопления почвы для данного района составляет 0,2 мм/год, а ее плотность 1,9 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, катастрофный слой находился на глубине 13—15 мм.

После отмучивания и центрифугирования полученную тонкую фракцию обрабатывали соляной кислотой (2 : 1) для удаления карбонатов, промывали дистиллированной водой и сушили при 150°C. Затем пробу помещали в аппарат Сокселега и экстрагировали из нее органическое вещество спиртово-бензольной смесью в соотношении 6 : 1. Вторично ее промывали дистиллированной водой и кипятили в особо чистой азотной кислоте для полного удаления органического вещества. Помытую силикатную фракцию сушили в вакуумэксикаторе над прокаленным  $\text{CaCl}_2$ .

Определение активности радиоуглерода в силикатных частицах почв проводилось сцинтилляционным методом. Результаты измерений приведены в табл. 4.

Вычисленное количество космического вещества в области вывала леса колеблется в пределах  $4,04—5,64 \cdot 10^3$  т и хорошо согласуется с данными, полученными по силикатам торфов. Если предположить, что Тунгусское тело представляло собой комету [2, 3, 12], т. е. состояло в основном из пыли, замерзших жидкостей и газов, то указанная величина представляет собой лишь небольшую часть выпавшей на катастрофную площадь массы кометы.

По имеющимся представлениям, кометы содержат всего несколько процентов силикатов, поэтому полученные цифры ( $(3,83—5,64) \cdot 10^3$  т) следует увеличить на 26—30% за счет содержания же-

Распределение радиоуглерода в силикатах тунгусских почв

| Место отбора почв         | Активность пробы, расп/мин | Удельная активность силикатов, ра сп/мин·кг | Степень космогенности, % | Выпадение космического вещества на единицу площади, г/м <sup>2</sup> | Выпадение космического вещества на катастрофическую площадь, т/год |
|---------------------------|----------------------------|---|--------------------------|--|--|
| Край болота у горы Острой | 5,24±0,20                  | 2,9·10 <sup>-3</sup>                        | 4,6·10 <sup>-3</sup>     | 2,6  | 5,64·10 <sup>3</sup>   |
| Водопад Чургим            | 5,05±0,15                  | 2,4·10 <sup>-3</sup>                        | 3,3·10 <sup>-3</sup>     | 1,9  | 4,04·10 <sup>3</sup>   |
| Пристань                  | 4,72±0,2                   | 8,0·10 <sup>-4</sup>                        | 1,27·10 <sup>-2</sup>    | 0,73   | 1,55·10 <sup>3</sup>   |
| Избы Кулинка              | 4,69±0,2                   | 6,3·10 <sup>-4</sup>                        | 1,09·10 <sup>-3</sup>    | 0,61   | 1,32·10 <sup>3</sup>   |
| Фон                       | 4,52±0,05                  | —   | —                        | —  | —  |

леза и еще в 10—20 раз за счет содержаний водяного, углекислого, аммиачного льда и других летучих компонентов [11].

Таким образом, общее количество гипотетического вещества кометы, выпавшего на катастрофической площади, могло составлять 50—100 тыс. т.

Авторы отдают себе отчет в том, что одни лишь радиоуглеродные данные не могут однозначно оценить массу Тунгусского тела. Было бы крайне желательно провести исследование изотопных отношений как стабильных, так и радиоактивных (космогенных) нуклидов. Тем не менее по состоянию на сегодняшний день данные по радиоуглероду, с нашей точки зрения, являются наиболее объективными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфов из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 19—24.
2. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, Наука, 1966, с. 20—22.
3. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., Физматгиз, 1958. 640 с.
4. Броштан В. А. К вопросу о движении в атмосфере Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 20. М., Наука, 1975, с. 72—86.
5. Васильев Н. В., Вронский Б. И., Демин Д. В. и др. Силикатные сферулы в торфах района падения Тунгусского метеорита. — Докл. АН СССР, 1971, т. 199, № 1, с. 1400—1402.
6. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски вещества Тунгусского метеорита в 1968—1970 гг. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 11—12.
7. Ковалюх Н. Н., Ольховик Ю. А., Петренко Л. В. Новые катализаторы синтеза бензола. — В кн.: Проблемы космохимии. Вып. 2. Киев, Наукова думка, 1975, с. 179—181.

8. Ковалюх Н. Н., Федотов К. В. Выделение радиоуглерода из металлической и силикатной фаз космического вещества.— В кн.: Проблемы космохимии. Киев, Наукова думка, 1974, с. 97—100.
9. Лаврухина А. К., Колесов Г. М. Образование химических элементов в космических телах. М., Госатомиздат, 1962. 200 с.
10. Собонович Э. В. Космическое вещество в земной коре. М., Атомиздат, 1976. 158 с.
11. Уинпл Ф. Л. Кометы: данные, проблемы, цели.— В кн.: Космохимия Луны и планет. М., Наука, 1975, с. 645—650.
12. Фесенков В. Г. Помутнение атмосферы, произведенное падением Тунгусского метеорита 30 июня 1908 года.— В кн.: Метеоритика. Вып. 6. М., Наука, 1949, с. 8—12.
13. Флоренский К. П. Проблемы космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита.— Геохимия, 1963, № 3, с. 284—296.
14. Goel P. S., Kohman T. P. Cosmogenic Carbon — 14 in Meteorites and Terrestrial Ages of «Finds» and Craters.— Science, 1962, v. 136, N 3519, p. 875—876.
15. Lal D., Venkatavaradan V. S. Low-energy protons: average flux in interplanetary space during the last 100 000 years.— Science, 1966, v. 151, N 3716, p. 1381—1384.
16. Lew H., Heiber I. Spectrum of  $H_2O^+$ .— J. Chem. Phys., 1973, v. 58, N 3 (11), p. 1246.
17. McCorkell R. H., Fireman E. L., Langway C. C. Dissolved iron, nickel and cobalt in Greenland ice.— Trans. Amer. Geophys. Union, 1967, v. 48, N 1, p. 158.
18. Sackett W. M. Measured deposition rates of marine sediments and implications for accumulations rates of extraterrestrial dust.— Ann. N. Y. Acad. Sci., 1964, v. 119, N 1, p. 339—346.
19. Schaeffer M. G., Thompson S. O. Experiments to test the presence of cosmogenic nuclides in ocean sediments.— Ann. N. Y. Acad. Sci., 1964, v. 119, N 1, p. 347—350.
20. Singer S. F. Zodiacal Dust and Deep — Sea Sediments.— Science, 1967, v. 156, N 3778, p. 1080—1083.
21. Tilles D. Implantation in Interplanetary Dust of Rare — Gas Ions from Solar Flares.— Science, 1966, v. 153, N 3739, p. 981—984.
22. Yokoyama Y. Accretion Rate of Cosmic Dust estimated from Cosmogenic Aluminium-26.— Nature, 1968, v. 220, N 5171, p. 1016—1017.

## О НЕКОТОРЫХ ВЕРОЯТНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТУНГУССКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

Е. М. КОЛЕСНИКОВ

В работе Е. М. Колесникова и др. [18] были исследованы 92 силикатные микросферы из «катастрофного» (включающего прирост 1908 г.) слоя колонки торфа, отобранной в эпицентральной зоне Тунгусской катастрофы. Используемый нейтронно-активационный метод позволил проанализировать ряд элементов-примесей, очень важных для интерпретации результатов, и были получены данные, определенно указывающие на то, что микросферы представляют собой вещество Тунгусской кометы, подвергнутое высокотемпературной дифференциации при взрыве.

С этими результатами в общих чертах коррелирует состав элементной аномалии в торфе, описанной в работе С. П. Голенецкого

Содержание некоторых элементов в предполагаемом веществе ТКТ (вес. %), «законсервированном» в торфе, в сравнении с тектитами и хондритами

| Элемент | Мно-<br>жи-<br>тель | Геохимические свойства |              | Вещество ТКТ              |                            | Тектиты [32] | Хондриты [41] |       |       |              |   |      |       |       |
|---------|---------------------|------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|--------------|---------------|-------|-------|--------------|---|------|-------|-------|
|         |                     | на Земле               | в метеоритах | «добавка» в кодочке В [9] | сигнактальные шарикки [18] |              | C1            | C2    | C3    | обыкновенные |   |      |       |       |
|         |                     |                        |              |                           |                            |              |               |       |       |              | Л | Л, X | Л, X  |       |
| Be      | 10 <sup>-5</sup>    | Л                      | Л            | 510                       |                            | 33           |               |       |       |              |   |      |       |       |
| Al      | 1                   | Л                      | Л            | 4,9                       | ≤ 16                       | 6,5          |               | 0,85  | 0,35  | 1,37         |   |      | 1,08  | 4,05  |
| Si      | 1                   | Л                      | Л            | 2,9                       |                            | 35           |               | 10,3  | 13,1  | 15,5         |   |      | 18,1  | 18,2  |
| Na *    | 1                   | Л                      | Л            | 1,4                       | 2,7                        | 0,94         |               | 0,51  | 0,38  | 0,35         |   |      | 0,61  | 0,61  |
| K *     | 1                   | Л                      | Л            | 5,3                       |                            | 2,0          |               | 0,048 | 0,038 | 0,036        |   |      | 0,084 | 0,084 |
| Rb *    | 10 <sup>-3</sup>    | Л                      | Л            | 60                        |                            | 12           |               | 0,22  | 0,16  | 0,13         |   |      | 0,26  | 0,26  |
| Cs *    | 10 <sup>-4</sup>    | Л                      | Л            | 140                       | 0,4                        | 2,5          |               | 0,18  | 0,12  | 0,05         |   |      | 0,09  | 0,09  |
| Mn *    | 1                   | Л                      | Л            | 96                        | 0,4                        | 0,08         |               | 0,19  | 0,16  | 0,15         |   |      | 0,24  | 0,24  |
| Br *    | 10 <sup>-3</sup>    | Л                      | Л            |                           |                            | 0,09 [35]    |               | 0,55  | 0,26  | 0,18         |   |      | 0,07  | 0,07  |
| Sc      | 10 <sup>-4</sup>    | Л                      | Л            | 5,6                       | 0,6                        | 4            |               | 5,1   | 7,4   | 9,0          |   |      | 7,8   | 7,8   |
| Ba      | 10 <sup>-4</sup>    | Л                      | Л            | 81                        |                            | 450          |               |       | 2,5   |              |   |      | 3,5   | 3,5   |
| Eu      | 10 <sup>-5</sup>    | Л                      | Л            | 1,5                       | 0,5                        | 1,2          |               |       |       |              |   |      | 0,73  | 0,73  |
| Ti      | 10 <sup>-1</sup>    | Л                      | Л, X         | 0,24                      |                            | 4,4          |               | 0,43  | 0,54  | 0,87         |   |      | 0,9   | 0,9   |
| Se *    | 10 <sup>-4</sup>    | Л, X                   | X            |                           | 0,4                        |              |               | 20    | 14    | 10           |   |      | 9,4   | 9,4   |
| Zn *    | 10 <sup>-2</sup>    | X                      | Л, X         | 1900                      | 1,7                        | 0,1          |               | 3,9   | 1,8   | 1,2          |   |      | 0,54  | 0,54  |
| Pb *    | 10 <sup>-4</sup>    | X                      | X            | 340                       |                            | 4,2          |               | 3,0   | 2,3   |              |   |      | 0,3   | 0,3   |
| Ag *    | 10 <sup>-4</sup>    | X                      | X            |                           | 1,4                        | < 1          |               | 0,39  | 0,17  | 0,25         |   |      | 0,08  | 0,08  |
| Ga      | 10 <sup>-4</sup>    | X                      | C, X         | 4,1                       |                            | 8            |               | 11,8  | 8,7   | 7,2          |   |      | 5,1   | 5,1   |

|       |                  |   |      |                       |  |     |                       |           |           |           |           |           |
|-------|------------------|---|------|-----------------------|--|-----|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sb    | 10 <sup>-4</sup> | X | C, X | 24                    |  |     | 0,24 [50]             | 0,17      | 0,13      | 0,13      | 0,13      | 0,10      |
| Sn *  | 10 <sup>-4</sup> | X | C    | 20                    |  |     | 2,4 [21]              | 1,6       | 0,85      | 0,85      | 0,88      | 0,65      |
| Au *  | 10 <sup>-4</sup> | X | C    | 3,3                   |  |     |                       | 0,14      | 0,18      | 0,18      | 0,18      | 0,20      |
| Hg *  | 10 <sup>-4</sup> | X | C    | 16                    |  |     |                       | 0,19 [26] | 0,11 [26] | 0,11 [26] | 0,11 [26] | 0,10 [26] |
| Fe *  | 1                | C | C, X | 7,5                   |  |     | 3,4                   | 18,4      | 21,9      | 25,2      | 25,2      | 24,7      |
| Co *  | 10 <sup>-4</sup> | C | C    | 74                    |  |     | 10                    | 50,4      | 572       | 642       | 642       | 704       |
| Ni    | 10 <sup>-2</sup> | C | C    | 0,25                  |  |     | 0,45                  | 100       | 128       | 140       | 140       | 145       |
| Mo    | 10 <sup>-4</sup> | C | C, X | 26                    |  |     |                       | 1,4       | 1,5       | 2,0       | 2,0       | 1,6       |
| Na/Fe | 10 <sup>-1</sup> |   |      | 2                     |  | ≥40 | 2,8                   | 0,28      | 0,17      | 0,14      | 0,14      | 0,26      |
| Na/Co | 10 <sup>-2</sup> |   |      | 19                    |  | 490 | 9,4                   | 0,10      | 0,07      | 0,05      | 0,05      | 0,09      |
| Rb/Co | 10 <sup>-3</sup> |   |      | 8,1 · 10 <sup>3</sup> |  |     | 1,2 · 10 <sup>4</sup> | 4,4       | 2,8       | 2,0       | 2,0       | 3,7       |
| Cs/Co | 10 <sup>-3</sup> |   |      | 1900                  |  | 730 | 250                   | 0,36      | 0,21      | 0,08      | 0,08      | 0,20      |
| Br/Co | 10 <sup>-2</sup> |   |      | 1300                  |  |     | 9                     | 1,1       | 0,45      | 0,28      | 0,28      | 0,10      |
| Se/Co | 10 <sup>-2</sup> |   |      |                       |  | 73  |                       | 4,0       | 2,4       | 1,6       | 1,6       | 1,3       |
| Zn/Co | 1                |   |      | 2600                  |  | 310 | 1,0                   | 0,72      | 0,31      | 0,19      | 0,19      | 0,08      |
| Pb/Co | 10 <sup>-2</sup> |   |      | 460                   |  |     | 42                    | 0,60      | 0,40      | 0,40      | 0,40      | 0,04      |
| Ag/Co | 10 <sup>-2</sup> |   |      |                       |  | 250 | <10                   | 0,78      | 0,30      | 0,39      | 0,39      | 0,01      |

Примечания: 1. Звездочкой отмечены элементы, для которых наиболее надежно установлено присутствие, в значительных количествах в веществе ТКТ (в торфе или шариках). 2. з1 — литофильные, X — халькофильные, С — сидерофильные, С — сидерофильные. 3. Для тектитов [32] вычислены средние значения по анализам тектитов 6 групп, для Cs — по анализам австралитов, для углелистых хондритов [41] — по анализам каждой из групп для всех элементов, кроме Ве и Ва (в случае последних даны средние значения для всех углелистых хондритов), для Hg в группе С<sub>2</sub> — по анализам всех углелистых хондритов [26], для обыкновенных хондритов [41] — по анализам самых распространённых хондритов групп Н и L.

с соавторами [9], в которой отмечалось большое увеличение содержания ряда химических элементов в одной из колонок торфа с места взрыва в слоях, близких к 1908 г. Наиболее четкие аномалии проявлялись для Na, Al, Si, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Br, Rb, Mo, Sn, Ba, Hg и Pb. Там же было показано, что всплески концентраций для большинства перечисленных и ряда других элементов нельзя объяснить дополнительным привнесом в торф терригенной пыли и золы сгоревших деревьев или проявлением местной биогеохимической аномалии. Они имеют, вероятно, все же, космохимическое происхождение, обусловленное консервацией в торфе вещества Тунгусского космического тела (ТКТ). В настоящей работе рассмотрены некоторые характерные особенности химического состава сохранившегося в торфе предполагаемого вещества ТКТ в сравнении с метеоритами и тектитами и сделана попытка объяснить источник происхождения вещества столь необычного состава.

В таблице приведены средние содержания элементов в исследованной в нашей работе [18] группе тунгусских силикатных шариков, полученный С. П. Голенецким и др. [9] примерный химический состав «законсервированного» в торфе вещества («добавка» в колонке В), а также усредненные нами данные по составу тектитов [32], углистых (С1, С2, С3) и обыкновенных (Н, L) хондритов [41]. Необходимо подчеркнуть, что приведенные данные о содержании отдельных элементов в «добавке» являются, скорее, нижним пределом их содержания в предполагаемом веществе ТКТ. Связано это как с возможным перераспределением по всей толщине торфа таких биогенных элементов, как калий и натрий, так и с вероятными потерями некоторых элементов при озолении торфа. Значительные потери при озолении биологических образцов наблюдались другими авторами для натрия, калия, цинка, свинца и ртути [14]. При этом особенно велики потери ртути, которая из органической фазы часто теряется полностью, и только окись ртути и ее твердый раствор в силикатах могут частично сохраниться в образцах при выбранном С. П. Голенецким и др. [9] режиме озоления (20—30 мин при  $450 \pm 30^\circ\text{C}$ ).

Даже беглый анализ состава и содержаний «аномальных» элементов в «добавке» в колонке В и состава силикатных шариков указывает на крайне необычный химический состав сохранившегося в торфе вещества, совершенно не похожего на состав каменных (см. таблицу) и тем более железных метеоритов. Это вещество было сильно обогащено многими наиболее легкоплавкими и летучими элементами (Zn, Br, Hg, Pb, Sn), содержало много щелочных металлов (Na, Rb, Cs и, вероятно, K), а также серебра, золота и молибдена. Оно оказалось значительно беднее никелем и кобальтом, чем обычные метеориты. Именно этим обстоятельством, возможно, объясняется неудачный исход поисков аномалий по этим элементам, проводившихся ранее [12, 15]. Br, Rb, Cs, Hg, Au и другие «аномальные» элементы в указанных работах не исследова-

лись. Тем не менее в работе А. Л. Ковалевского и др. [15] было отмечено повышенное содержание олова в некоторых пробах золы деревьев из центральной части района катастрофы, несмотря на сравнительно высокую температуру озоления исследованных образцов (700—900°C), что могло привести к значительным потерям таких важных «аномальных» элементов, как Zn, Sn, Pb и особенно Hg. Коррелируют с данными таблицы и наметившиеся в предыдущих работах [12, 15] аномалии по Pb, Mo и Be, а в более поздних работах — по Pb, Zn и Ag [1] и Pb, Fe и Mn [20]. Однако только в работе С. П. Голенецкого и др. [9] удалось получить столь четко коррелирующие между собой аномалии сразу по большому ряду элементов.

Качественное сравнение химического состава вещества «добавки» в торфе и силикатных шариков обнаруживает в них много общего. Так, в обоих случаях отмечается обогащение летучими литофильными и халькофильными элементами (Na, Cs, Zn и др.), а также сравнительно низкое содержание более тугоплавких сидерофильных элементов (Fe, Co) и Sc. Однако концентрация в торфе, например, Zn на несколько порядков выше, чем в шариках. Такое большое расхождение не может быть случайным. Скорее всего, материал шариков потерял большую часть летучих элементов при переплавлении во время катастрофы либо шарики вообще представляют собой обедненный летучими элементами материал ТКТ. Кажущееся исключение представляет «летучий» Na, содержание которого в шариках сравнительно велико (в работе [10] оно еще выше). Такое поведение Na можно объяснить его относительно малыми потерями при образовании шариков из родоначального вещества из-за неожиданно низкой летучести, обнаруженной в экспериментах по высокотемпературному переплавлению тектитовых стекол [54]. Уменьшение содержания Na в «добавке» в торфе могло быть вызвано, как уже отмечалось, перераспределением этого элемента по всей толще мха вследствие его «биогенности» и хорошей растворимости большинства его соединений. Первоначальное содержание Na в выпавшем веществе было, по всей вероятности, значительно выше, чем его измеренное содержание в веществе силикатных микросферул.

Так как силикатные микросферулы представляют собой, скорее всего, только часть продуктов высокотемпературной дифференциации вещества ТКТ, они не могут полностью отражать его первоначальный состав. Более представительным должно быть вещество, законсервированное в торфе.

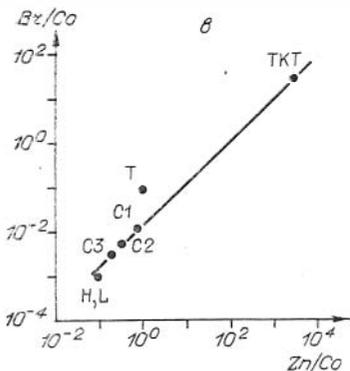
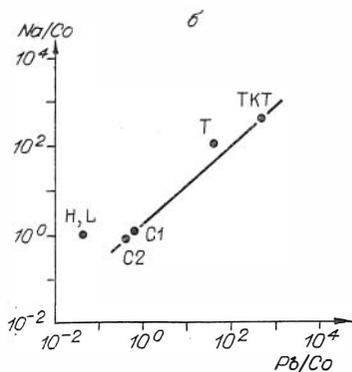
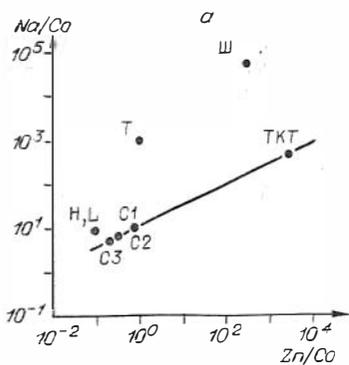
По сравнению с обычными хондритами предполагаемое вещество ТКТ было резко обогащено многими литофильными и халькофильными элементами и, вместе с тем, сравнительно бедно сидерофильными. Исключение составляет сидерофильный молибден, хотя в метеоритах он часто проявляет склонность к халькофильности. В железных метеоритах этот элемент не обнаруживает явной корреляции с элементами-примесями — Ag, As, Cr, Cu, Ga, Se, In,

Pb и Zn [41], т. е. имеет, по-видимому, какую-то свою особую космохимическую историю.

Среди метеоритов по составу вещества ближе всего находятся углистые хондриты первого типа (C1), хотя и они сравнительно бедны «аномальными» литофильными и халькофильными элементами (включая молибден) и, напротив, слишком обогащены железом, никелем и кобальтом. Если рассмотреть для каждого из исследованных элементов тенденцию к изменению содержания при переходе от хондритов типа C3 к хондритам типа C1, то она почти во всех случаях сохраняется при дальнейшем переходе от C1 к шарикам и ТКТ. Элементы с тенденцией к увеличению содержания — щелочные металлы (Na, K, Rb, Cs), марганец, сильнолетучие (Br, Zn, Sn, Pb, Hg) и Ag — имеют еще более высокие содержания в шариках и ТКТ, чем в хондритах C1. Напротив, элементы с уменьшением содержания при переходе от C3 к C1 — Fe, Co, Ni, Sc — имеют еще более низкие концентрации в ТКТ, и особенно в шариках. Не подчиняются такой закономерности, кроме Mo, только алюминий, а в шариках — недостаточно обильный Zn. Содержание золота в хондритах не обнаруживает какой-либо тенденции к изменению в зависимости от типа хондритов [41]. Между тем в выпавшем предполагаемом веществе ТКТ его концентрация существенно выше. Обращают на себя внимание и пониженные содержания Si и Ti в «добавке» торфа.

Отношения концентраций всех литофильных и халькофильных элементов в веществе ТКТ в торфе к содержаниям сидерофильных, например кобальта или железа (см. таблицу), часто на несколько порядков выше соответствующих отношений в хондритах и значительно выше, чем в шариках (за исключением натрия и алюминия). Для щелочных и всех других (кроме золота) элементов, обнаруживающих недостаток в хондритах C3 по сравнению с C1, (Na, K, Rb, Cs, Br, Zn, Se, Ga, Sn, Pb, Hg), их отношение к кобальту при переходе от C3 к C2 и C1 закономерно увеличивается, в общем сохраняя эту тенденцию и далее при последовательном переходе к тектитам, тунгусским силикатным шарикам и веществу ТКТ.

На рисунке приведены поля корреляций отношений некоторых наиболее «аномальных» элементов во всех перечисленных объектах, включая также обыкновенные хондриты и тектиты. Во всех случаях углистые хондриты всех типов и ТКТ оказываются практически на одной прямой. Данное обстоятельство, по-видимому, не случайно и указывает, скорее всего, на возможную генетическую связь вещества этих объектов. В работе А. А. Явнеля [33] показано, что отношения Na/Ca и Fe/Ca закономерно укладываются в одну последовательность от углистых хондритов C3 к хондритам C2, C1 и далее к метеорному веществу потока Драконид. Последнее, по мнению автора, является родительским веществом хондритов C1. С учетом предыдущей закономерности есть основания считать, что все эти объекты генетически связаны. При этом,



Диаграммы отношений концентраций некоторых химических элементов в веществе ТКТ и других объектах — углистых хондритах типов С1, С2 и С3, обыкновенных хондритах (бронзитовых Н и гиперстеновых L), тектитах (Т) и тунгусских силикатных шариках из «катастрофных» слоев торфа (Ш).

Отношения: Zn/Co к Na/Co (а), Pb/Co к Na/Co (б), Zn/Co к Br/Co (в).

судя по величине отношения Na/Fe, вещество ТКТ (0,187) отстоит от С1 (0,027) значительно дальше, чем метеорное (0,043 для Драконида). Весьма возможно, что ТКТ, метеорное вещество и углистые хондриты всех типов имеют общее прародительное вещество и являются продуктами его последовательной дифференциации. Другие объекты по тем или иным показателям явно выпадают из этой последовательности и либо не связаны генетически с ее веществом, либо представляют его в сильно дифференцированном (но другим путем) виде.

В работе Г. Мюллера [22] обнаружена корреляция между содержанием в углистых хондритах халькофильных элементов и суммой высоколетучих компонентов — главным образом С, H<sub>2</sub>O, S и N. В этой же работе отмечено, что в хондритах с увеличением содержания летучих элементов наблюдается также слабая тенденция к уменьшению содержаний магния и железа за счет увеличения концентраций других главных элементов — Ca, Al, Na и K. В выпавшем веществе ТКТ, по-видимому, еще более богатыми летучими элементами, эта тенденция, по всей вероятности, доведена как бы до своего логического завершения. Действительно, вещество тунгусских силикатных шариков, по нашим данным, содержит

много натрия и алюминия, но мало железа. По данным других авторов [10, 39], эти шарики имеют очень низкое, по сравнению с хондритами, отношение Mg/Ca (0,25 против 12,4 для хондритов). Те же авторы в своих анализах шариков получили повышенные, по сравнению с хондритами, содержания Al, Na и K и пониженное (правда, в меньшей мере, чем в наших анализах) — железа. Так как в нашем случае обнаружены очень высокие концентрации халькофильных элементов, то можно предполагать, что вещество ТКТ имело высокие концентрации и других, не измеренных нами, сильнолетучих компонентов.

Среди известных малых небесных тел сильнолетучими компонентами наиболее богаты кометы [3]. Одна из гипотез допускает образование тектитов при столкновении Земли с ядрами комет [52]. Но тектиты сравнительно бедны Zn, Br, Ga, Pb [32] и, кроме того, резко выпадают из указанной выше последовательности (см. рисунок). Возможно, многие летучие элементы были утеряны текритами при высокотемпературном плавлении и термической дифференциации, которым они, без сомнения, подвергались. Имеется, однако, группа тектитов типа Муонг-Нонг из Лаоса и Таиланда, вещество которых считается наиболее близким к их родоначальному составу и наименее подвергшимся дифференциации [53]. В этой группе тектитов наблюдалось большое обогащение сильнолетучими компонентами [48]. Если обычные индошиниты, филиппиниты, австралиты и молдавиты имеют довольно низкие содержания хлора (от 1 до  $14 \cdot 10^{-4}\%$ ) и брома (от  $0,015 \cdot 10^{-4}$  до  $0,15 \cdot 10^{-4}\%$ ) и почти постоянное отношение Cl/Br (от 80 до 120), то тектиты Муонг-Нонг обладают аномально высокими, даже по сравнению с земными породами, содержаниями этих элементов: хлора — от  $100 \times 10^{-4}$  до  $330 \cdot 10^{-4}\%$  и брома — от  $1,1 \cdot 10^{-4}$  до  $4,6 \cdot 10^{-4}\%$ , а отношение Cl/Br имеет величину от 70 до 90, т. е. ниже средней для обычных тектитов. Анализы на содержание цинка, меди, никеля показывают сильное обогащение этих тектитов также цинком и медью. Авторы считают, что по крайней мере часть этих элементов была привнесена столкнувшейся с Землей кометой, богатой летучими элементами, которая и является, по их мнению, источником австралийско-азиатского поля рассеивания тектитов. Особенности химического состава тектитов Муонг-Нонг, особенно большие содержания в них цинка, меди, галогенов и т. д., сближают эти тектиты с веществом ТКТ. Данное обстоятельство может служить еще одним свидетельством в пользу кометной природы последнего.

Приведенные данные хорошо коррелируют с аналогичными результатами американских ученых по исследованию уникальных образцов так называемой «ржавой почвы», доставленной экипажем «Аполлона-16» с Луны из окрестностей кратера Декарт [40], и «оранжевого грунта», обнаруженного космонавтами «Аполлона-17» на бровке кратера Шорти [42]. В обоих случаях наблюдалось сильное обогащение образцов летучими элементами по сравнению с окружающими породами. Так, для «ржавой почвы», наряду с

признаками кратковременного ударного воздействия, было обнаружено большое обогащение цинком, свинцом и хлором [37], что, по мнению авторов, указывает на соударение с поверхностью Луны ядра кометы или углистого хондрита типа С1. Ударом кометы авторы объясняют и присутствие в грунте вблизи посадки «Аполлона-16» таких высоколетучих и типично «кометных» соединений, как HCN, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S и SO<sub>2</sub> [51]. Образование «оранжевого грунта» также связывают с ударом кометы о лунную поверхность, что явилось, по всей вероятности, источником аномально высоких содержаний в этих образцах цинка (0,26%), меди ( $4,2 \cdot 10^{-3}\%$ ), а также хлора и других летучих элементов [36]. Привнесом из кометы легко объяснить и тот факт, что углерод и сера в этом образце присутствуют в виде конденсата на поверхности частиц [38].

Выше отмечалось, что предполагаемое вещество ТКТ было подвержено сильной дифференциации. Это может служить еще одним признаком его кометного происхождения. Действительно, если считать вещество комет продуктами поздних стадий дифференциации протопланетного облака, то, наряду с присутствием в кометах огромного количества водорода, углеводородов и других газов, твердая составляющая кометного вещества также должна быть обогащена легкоплавкими и летучими элементами и их соединениями. Натриевый хвост наблюдался у кометы Мркоса [23]. H<sub>2</sub>O, HCN и протяженная водородная оболочка были обнаружены в комете Когоутека [31]. По современным данным, водяной лед является одной из основных составных частей комет [47], входящих в их ядра вместе с замерзшими углеводородами, их радикалами и другими газами и летучими компонентами — CH, NH, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, OH и др. [25].

Развивая теорию аккумуляции планет из протопланетного облака, В. С. Сафронов [49] считает, что на заключительном этапе формирования планет-гигантов на периферию Солнечной системы были выброшены тела, образовавшие облака комет. По мнению Ф. Уиппла [27, 55], кометы должны были образоваться из летучих веществ, сконденсировавшихся во льды во внешних районах Солнечной системы. Это согласуется также с данными и выводами А. А. Явнеля [33]. Нет сомнений, что в этом случае вещество комет должно носить следы сильной дифференциации элементов, имевшей место в протопланетном облаке.

В 1962 г. А. П. Виноградов, исходя из соответствия химического состава Земли, метеоритов и Солнца (без летучих элементов), высказал предположение, которое в настоящее время поддерживается, по-видимому, большинством ученых. Сводится оно к тому, что все тела Солнечной системы образовались непосредственно из горячей плазмы солнечного состава [4]. В последующих работах он показал, что основной процесс дифференциации элементов, приведший к существующему разнообразию составов различных тел Солнечной системы, произошел на стадии протопланетного облака, но не внутри допланетных и планетных тел [5—7]. Расче-

ты и многие факты свидетельствуют о том, что процесс становления тел Солнечной системы произошел около 4,5 млрд. лет назад из вещества, уже подвергнутого сильной дифференциации [2].

По мнению А. К. Лаврухиной [19], в процессе дифференциации протопланетного облака решающую роль играли различия в летучести элементов. Одним из главных следствий этого процесса на первых этапах эволюции протопланетного облака явилось отделение металлического железа вместе с другими труднолетучими элементами. Согласно А. П. Виноградову [6, 7], после охлаждения первичной солнечной туманности до температур порядка 5000—1500°C и превращения газообразного облака в газо-пылевое произошел процесс разделения этого облака на области по разной плотности вещества. Тяжелые частицы металлического железа перемещались к внутреннему, обращенному к Солнцу, краю облака, где, накапливаясь, образовывали зародыши ядер будущих планет земной группы. Летучие элементы и газы диссоциировали к внешнему краю облака и конденсировались в области больших планет. Этот процесс и привел к такому большому различию в содержаниях летучих компонентов и плотностях внутренних (от 4,0 до 5,6 г/см<sup>3</sup>) и внешних (от 0,7 до 2,5 г/см<sup>3</sup>) планет. Эту идею разделяет и Ф. Хойл [43]. Типичными представителями первичного конденсата протопланетного облака являются железные метеориты [6, 7], содержащие значительные количества никеля, кобальта и других сидерофильных элементов, которыми обеднено вероятное вещество ТКТ. В состав железного конденсата не вошли элементы, атомные диаметры которых сильно отличаются от железа и которые не образуют с ним твердых растворов (Na, K, Mg, Ca, Rb, Sr, Ba, Cs, Hg, Pb), а также элементы, окисленные в условиях конденсации железа (Be, Sc, Al, Ti, Si, Mn, Cr, Zn и, вероятно, Mo). Многими из этих элементов значительно обогащено рассматриваемое вещество.

Согласно расчетам Дж. Ларимера и Е. Андерса [34, 44, 45], при конденсации газа в остывающем протопланетном облаке солнечного состава при общем давлении порядка 10<sup>-4</sup> ата вначале конденсируются наиболее тугоплавкие элементы и соединения, такие как платиновые металлы, силикаты и шпинели, а затем уже железо, никель и магниезиальные силикаты. Только при температурах ниже 1200°C сконденсированное вещество обогащается редкими металлами — от меди (избыток в тектитах Муонг-Нонг и «оранжевом грунте») и галлия, олова, золота (вещество ТКТ) до серебра (тунгусские силикатные шарики). При температурах порядка 650°C конденсируются кадмий, теллур, селен (шарики), цинк (большой избыток в торфе, тектитах Муонг-Нонг, «ржавой почве» и «оранжевом грунте» с Луны и частично в шариках) и щелочные металлы (торф, шарики). Далее конденсируются свинец (торф и «ржавая почва»), висмут, таллий и индий. Самые низкотемпературные конденсаты должны быть обогащены бромом и ртутью (избыток в торфе), водой и другими летучими компонентами.

Среди низкотемпературных конденсатов частично может быть представлено и железо, но только в окисной и сульфидной формах. Этим, по-видимому, можно объяснить высокие значения отношений Fe/Ni и Fe/Co в вероятном веществе ТКТ (3000 и 1000 соответственно против 18 и 360 для хондритов), т. е. низкие содержания в нем Co и особенно Ni. Действительно, результаты модельных опытов по сжиганию Fe — Ni — Co сплава в пламени горелки [30] прямо указывают на связь Ni и Co с металлической, а не окисной фазой в образующихся при этом шариках. В метеоритах Co и особенно Ni также почти целиком связаны с металлической фазой. Наиболее низки содержания Ni и Co в веществе хондритов, где Fe находится главным образом в окисной форме. Интересно отметить, что мелкие (диаметром  $< 100$  мк) магнитные шарики из почв в районе Тунгусского падения [11, 29, 30], представленные главным образом магнетитом ( $Fe_3O_4$ ), обладают высоким (более 200) отношением Fe/Ni и, возможно, также имеют прямое отношение к веществу ТКТ. Включения в виде полых магнетитовых шариков с низкими содержаниями Co и Ni (Fe/Ni  $\sim 1000$ ) встречаются и в составе тектитов [8]. Низкое содержание Ti в веществе ТКТ, которым обеднены также хондриты типа C1 по сравнению с C2, C3 и обычными хондритами, можно объяснить его уходом в ранние высокотемпературные конденсаты протопланетной туманности, например, в виде перовскита —  $CaTiO_3$  [46].

Состав ТКТ, по нашим данным, качественно соответствует также составу вещества, сконденсированного на расстояниях свыше двух астрономических единиц от Солнца, в модели дифференциации элементов протопланетного облака, предложенной А. К. Лаврухиной [19]. В этой модели рассмотрены возможные принципы транспорта различных элементов в виде летучих соединений в направлении от Солнца при наличии градиента температуры за счет постепенного нагрева диска туманности, сжимающейся к центральной плоскости в период активной деятельности Солнца, и обоснован физический перенос легколетучих компонентов облака в зону планет-гигантов.

По современным представлениям, ядра комет — это «грязный снежный ком» с вмороженными в него мелкими частицами пыли, а возможно, и более крупными твердыми включениями (родоначальное вещество тектитов?) [25]. Таким образом, выдвинутая недавно и обоснованная математическими расчетами гипотеза Г. И. Петрова и В. П. Стулова [24], согласно которой ТКТ представляло собой «гигантскую снежинку», является по сути разновидностью кометной гипотезы, наиболее полно разработанной В. Г. Фесенковым [28].

Можно предполагать, что среди пылевых включений в ядрах комет имеются как силикатные, так и магнетитовые частицы. Если вывод авторов работы [29] о происхождении тунгусских шариков из почв при переплавлении вещества ТКТ верен, то силикатные шарики из «катастрофных» слоев торфа и частично магнети-

товые шарики из почв района Тунгусского падения могут представлять собой эти сплавленные твердые включения. На основе изучения морфологических характеристик тунгусских шариков из почв К. П. Флоренский с соавторами [29] пришли к выводу, что эти шарики образовались при застывании расплавленных капелек и не проходили газовой стадии. Близкие морфологические характеристики имеют и исследованные шарики из торфа [18]. При переплавлении минеральной составляющей ядра кометы при взрыве должна происходить дальнейшая значительная дифференциация элементов [30]. Данное обстоятельство и является, по-видимому, главной причиной разной степени обогащения летучими элементами законсервированного в торфе вещества ТКТ и силикатных шариков.

Все вышесказанное позволяет заключить, что состав предполагаемого вещества ТКТ, полученный при анализе обнаруженной элементной аномалии в торфах в центре района Тунгусского падения [9], отвечает современным представлениям о строении, составе и эволюции комет и соответствует продуктам наиболее поздних стадий конденсации и дифференциации протопланетного облака в периферийной части Солнечной системы, что косвенно подтверждает космохимический характер аномалии. Тот факт, что тектиты Муонг-Нонг оказались близкими по составу к тунгусским силикатным шарикам [18], свидетельствует в пользу гипотезы об образовании тектитов при столкновении с Землей ядер крупных комет с частичной дифференциацией их вещества при высокотемпературном взрыве в атмосфере. Из этого следует, что явления типа Тунгусского падения в истории Земли могли иметь место неоднократно.

Основные результаты данной работы следующие:

1. Особенности химического состава силикатных микросферул из «катастрофного» слоя торфа (включающего прирост 1908 г.) [18] и состав элементной аномалии в торфе из центра Тунгусской катастрофы [9] в общих чертах коррелируют между собой. Имеющиеся различия можно объяснить тем, что шарики образовались при переплавлении первоначального вещества во время взрыва и потеряли при этом большую часть наиболее летучих элементов.

2. Предполагаемое вещество Тунгусского космического тела в торфе и вещество силикатных микросферул характеризуются высокой степенью дифференциации по сравнению с веществом каменных метеоритов и, в меньшей степени, по сравнению с тектитами.

3. Среди известных классов метеоритов к предполагаемому составу вещества ТКТ ближе всего находятся углистые хондриты первого типа. Однако даже по сравнению с ними химический состав этого вещества был более обильно представлен некоторыми легколетучими литофильными и халькофильными элементами (особенно щелочными металлами, Zn, Br Pb), а также Sn и Mo. Напротив, некоторые сидерофильные элементы (особенно Ni и Co) содержатся

в нем в существенно меньших количествах. Относительно низкими в этом веществе были и содержания Si и Ti. Высокое содержание в нем «летучих» элементов коррелирует с аналогичными результатами для уникальных лунных образцов «ржавой почвы» и «оранжевого грунта», а также для тектитов Муонг-Нонг, которые многие авторы связывают с падением комет.

4. Состав и соотношения элементов в предполагаемом веществе ТКТ в общих чертах согласуются с современными представлениями о составе продуктов поздних стадий конденсации и дифференциации протопланетного облака в его периферийной части.

5. Вещество ТКТ, по всей вероятности, было генетически связано с веществом некоторых регулярных метеорных потоков, а также с углистыми хондритами, имело с ними общее прародительское вещество и является одним из первых продуктов его последовательной дифференциации.

6. Полученные результаты косвенно подтверждают космическое происхождение исследованных силикатных микросферул [18] и космохимический характер элементной аномалии [9] и свидетельствуют в пользу кометной природы ТКТ.

Следует подчеркнуть, что результаты последних работ по поискам вещества ТКТ позволяют надеяться на скорое окончательное решение Тунгусской проблемы. Кометная гипотеза В. Г. Фесенкова [28] в сочетании с гипотезой В. В. Кесарева [13], объясняющей Тунгусскую катастрофу простым химическим взрывом кометного вещества при вторжении в атмосферу, по нашему мнению, может хорошо описать все явление в целом. В настоящее время больше нет необходимости выдвигать новые экзотические гипотезы о Тунгусском явлении типа прилета антивещества или термоядерного взрыва, необоснованность которых была доказана нами ранее [16, 17]. Окончательное доказательство существования Тунгусской космохимической аномалии (которое необходимо делать на изотопном уровне) даст, по-видимому, уникальную возможность прямого исследования кометного вещества и может пролить свет как на историю и состав кометных образований в Солнечной системе, так и на загадку тектитов.

В заключение автор выражает признательность проф. Н. В. Васильеву и В. И. Малышеву за интерес и поддержку в работе, С. П. Голенецкому и В. А. Алексееву за редакторскую правку первого варианта рукописи и полезные критические замечания, а также В. А. Бронштэну за предварительное обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 19—24.
2. Баранов В. И., Кнорре К. Г. О некоторых вопросах консолидации и дифференциации Солнечной системы в связи с временными этапами ее станов-

- ления.— В кн.: Meteorite Research (ed. P. Millman). Dordrecht, Holland, 1969, с. 31—40.
3. **Бронштэн В. А.** Природа и происхождение метеорных тел.— В кн.: Проблемы происхождения тел Солнечной системы. Вып. 5. М.—Л., 1975, с. 265—301.
  4. **Виноградов А. П.** Атомные распространенности химических элементов Солнца и каменных метеоритов.— Геохимия, 1962, № 4, с. 291—295.
  5. **Виноградов А. П.** Вещество метеоритов.— Геохимия, 1965, № 11, с. 1275—1312.
  6. **Виноградов А. П.** Высокотемпературные протопланетные процессы.— Геохимия, 1971, № 11, с. 1283—1296.
  7. **Виноградов А. П.** Образование металлических ядер планет.— Геохимия, 1975, № 10, с. 1427—1431.
  8. **Воробьев Г. Г.** Новые данные о тектитах.— Докл. АН СССР, 1959, т. 128, № 1, с. 61—63.
  9. **Голенецкий С. П., Степанок В. В., Колесников Е. М.** Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— Геохимия, 1977, № 11, с. 1635—1645.
  10. **Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А.** и др. Состав микрофेरул из торфов района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 147—149.
  11. **Иванова Г. М., Брувер Р. В., Львов Ю. А., Боронтова Н. Н.** О поисках вещества Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 145—148.
  12. **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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 25—27.
  13. **Кесарев В. В.** Эволюция вещества Вселенной. М., Атомиздат, 1976. 183 с.
  14. **Ковалевский А. Л.** Биогеохимические поиски рудных месторождений. М., Наука, 1974. 143 с.
  15. **Ковалевский А. Л., 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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 125—133.
  16. **Колесников Е. М.** Сопровождение, посвященное проблеме Тунгусского метеорита.— Земля и Вселенная, 1972, № 1, с. 54—55.
  17. **Колесников Е. М., Лаврухина А. К., Фисенко А. В.** Новый метод проверки гипотез аннигиляционного и термоядерного характера Тунгусского взрыва 1908 г.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 102—110.
  18. **Колесников Е. М., Люль А. Ю., Иванова Г. М.** Нейтроноактивационный анализ некоторых элементов в силикатных шариках из торфа района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 87—99.
  19. **Лаврухина А. К.** О дифференциации элементов в протопланетном облаке.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 7—23.
  20. **Левченко М. А., Терентьева А. А.** Предварительные результаты спектрального определения примесей в пробах торфа района взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 16—19.
  21. **Мэйсон Б.** Метеориты. М., Мир, 1965. 306 с.
  22. **Мюллер Г.** Исследование взаимоотношений между летучими и нелетучими составляющими метеоритов.— В кн.: Метеоритика. Вып. 27. М., 1966, с. 3—24.
  23. **Новиков Г. Г.** Эмиссия натрия в комете Мркоса 1957d.— Астроном. ж., 1973, т. 50, № 4, с. 883—884.
  24. **Сворень Р.** Версия «Гигантская снежинка».— Наука и жизнь, 1975, № 6, с. 22—23.
  25. **Солнечный ветер.** Под ред. Р. Дж. Маккина, М. Нейгебауэра. М., Мир, 1968. 221 с.

26. Стахеев Ю. И., Лаврухина А. К., Стахеева С. А. Космическая распространенность ртути.— *Геохимия*, 1975, № 9, с. 1390—1398.
27. Уиппл Ф. Земля, Луна и планеты. М., Наука, 1967. 205 с.
28. Фесенков В. Г. О кометной природе Тунгусского метеорита.— *Астроном. ж.*, 1961, т. 38, № 4, с. 577—592.
29. Флоренский К. П., Иванов А. В., Кирова О. А., Заславская Н. И. Фазовый состав мелкодисперсного внеземного вещества из района Тунгусской катастрофы.— *Геохимия*, 1968, № 10, с. 1174—1182.
30. Флоренский К. П., Иванов А. В., Ильин Н. П. и др. Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел.— *Геохимия*, 1968, № 10, с. 1163—1173.
31. Хромов Г. После свидания с кометой.— *Известия*, 1974, № 61.
32. Шнегглер К., Пинсон У. Химический состав тектитов.— В кн.: *Тектиты*. М., Мир, 1966, с. 137—188.
33. Явнель А. А. О сравнении химического состава метеоров и метеоритного вещества.— *Астроном. вестн.*, 1974, т. 8, № 4, с. 234—236.
34. Anders E. Chemical processes in the early Solar System, as inferred from meteorites.— *Acc. Chem. Res.*, 1968, v. 1, N 10, p. 289—298.
35. Becker V. J., Manuel O. K. Chlorine, bromine, iodine and uranium in tectites, obsidians and impact glasses.— *J. Geophys. Res.*, 1972, v. 77, N 32, p. 6353—6359.
36. Brown G. M., Holland J. G., Peckett A. Orange soil from the Moon.— *Nature*, 1973, v. 242, N 5399, p. 515—516.
37. El Goresy A., Ramdohr P. e. a. Zinc, lead, chlorine and FeOOH—bearing assemblages in the Apollo 16 sample 66095: origin by impact of a comet or a carbonaceous chondrite? — *Earth Planet. Sci. Let.*, 1973, v. 18, N 3, p. 411—419.
38. Gibson E. K., Jr. Moore C. B. Variable carbon contents of lunar soil 74220.— *Earth Planet. Sci. Let.*, 1973, v. 20, N 3, p. 404—408.
39. Glass B. P. Silicate spherules from Tunguska impact area.— *Science*, 1969, v. 164, N 3879, p. 547—549.
40. Gregory W. H. Apollo samples point to comet impact.— *Aviat. Week and Space Technol.*, 1972, v. 97, N 15, p. 18—20.
41. *Handbook of elemental abundance in meteorites.* (Ed. B. Mason). N.Y. Gordon and Breach, 1971. 555 p.
42. Harrison S. H. Apollo 17 report on the valley of Taurus—Littrow.— *Science*, 1973, v. 182, N 4113, p. 681—690.
43. Hoyle F., Wickramasinghe N. C. Condensation of the Planets.— *Nature*, 1968, v. 217, N 5127, p. 415—420.
44. Larimer J. W. Chemical fractionations in meteorites. I. Condensation of the elements.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, v. 31, N 8, p. 1215—1238.
45. Larimer J. W., Anders E. Chemical fractionations in meteorites. II. Abundance patterns and their interpretation.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, v. 31, N 8, p. 1239—1270.
46. Larimer J. W., Anders E. Chemical fractionations in meteorites. III. Major element fractionations in chondrites.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1970, v. 34, N 3, p. 367—388.
47. Levin B. Yu. Some remarks on the liberation of gases from sometary nuclei.— In: *Motion, Evolution Orbits, and Origin Comets.* Dordrecht, 1972, p. 260—264.
48. Müller O., Gentner W. Enrichment of volatile elements in Muong Nong — tipe tectites: clues for their formation history? — *Meteoritics*, 1973, v. 8, N 4, p. 414—415.
49. Sefronov V. S. Ejection of bodies from the solar system in the course of the accumulation of the giant planets and the formation of the cometary cloud.— In: *Motion, Evolution Orbits, and Origin Comets.* Dordrecht, 1972, p. 329—334.
50. Tanner J. T., Ehmam W. D. The abundance of antimony in meteorites, tectites and rocks by neutron activation analysis.— *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1967, v. 31, N 10, p. 2007—2026.

51. Thornton P. L. Notes on the fourth Lunar science conference. 1.— Sky and Telesc., 1973, v. 45, N 6, p. 355—358.
52. Urey H. C. Origin of tectites.— Nature, 1957, v. 179, N 4559, p. 556—557.
53. Walter L. S. Tectite compositional trends and experimental vapor fractionation of silicates.— Geochim. Cosmochim. Acta, 1967, v. 31, N 10, p. 2043—2064
54. Walter L. S., Carron M. K. Vapor pressure and vapor fractionation of silicate melts of tectite composition.— Geochim. Cosmochim. Acta, 1964 v. 28, N 6, p. 937—951.
55. Whipple F. L. The origin of comets.— In: Motion, Evolution Orbits, and Origin Comets. Dordrecht, 1972, p. 401—408.

## К ПОИСКАМ ВЕЩЕСТВА ТУНГУССКОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА

*С. П. ГОЛЕНЕЦКИЙ, В. В. СТЕПАНОВ*

Масса Тунгусского космического тела (ТКТ) оценивается величиной порядка  $10^4$ — $10^6$  т [2]. При всей произвольности таких оценок необходимо признать, что масса эта была достаточно велика и не могла исчезнуть бесследно. Поэтому поиски вещества ТКТ даже в наши дни нельзя считать бесперспективными, тем более, что изучение элементного и изотопного состава этого вещества — в случае его обнаружения — поможет понять все явление в целом.

Крупных масс ТКТ пока не обнаружено, несмотря на усилия многих исследователей. Принадлежность силикатных микросферул, обнаруженных в «катастрофных» слоях торфа [5, 6], к веществу ТКТ пока спорна, несмотря на их сравнительно необычный химический состав [8]. Кроме того, их общая масса оценивается всего в 200 кг [4], что составляет незначительную часть вещества ТКТ. Металлометрическая съемка, проведенная в районе катастрофы [11], также не дала однозначных результатов. Наметившиеся аномалии по ряду элементов уверенной интерпретации не получили, а повышенное содержание редкоземельных элементов, в частности иттербия [9], в почве и растениях, приуроченное к проекции траектории ТКТ, с трудом дифференцируется от обычных геохимических аномалий, возможных в данном районе.

Недостатки указанных работ следующие: а) поиски ориентированы преимущественно на конденсированное вещество (микросферулы), тогда как значительная часть его могла распылиться в виде мелкодисперсного аэрозоля с частицами произвольной формы или же перейти в парообразное состояние; б) круг исследованных элементов ограничен (преимущественно легкие и средние металлы); в) результаты сравнены с кларками вместо концентраций элементов в субстратах, типичных для данной почвенно-растительной и геологической зон; г) большинство измерений имеют низкую точность (полуколичественный спектральный анализ); д) выбор химических элементов для анализа случаен либо традиционен (это в основном

типичные для обычных метеоритов элементы, например никель).

При поисках мелкодиспергированного вещества ТКТ наиболее перспективно исследование хорошо стратифицируемых объектов, в частности биологических. Однако анализ элементного состава многолетних растений из этого района — в частности послойный анализ древесины деревьев, переживших катастрофу 1908 г., — может привести к заведомо ложным результатам и выводам в силу наличия у выспих растений элементостатических барьеров, препятствующих проникновению в биосубстрат «излишков» некоторых почвенных элементов [10]. Превосходным консервантом любых атмосферных выпадений, и в том числе космической пыли, является торфяная залежь мха сфагнум-фускум на верховых олиготрофных болотах [14]. При этом идентификация «катастрофных» слоев торфа в центральной части района катастрофы существенно облегчается их повышенной зольностью [55]. Именно в этих слоях обнаружено в большинстве случаев и повышенное содержание упомянутых выше силикатных микросферул. Однако сведения о результатах послойного элементного анализа торфа в литературе по Тунгусскому метеориту отсутствуют.

Большинством исследователей Тунгусской проблемы недооцениваются показания очевидцев о множественном и продолжительном характере звуковых явлений во время катастрофы 1908 г. [12]. Между тем имеются свидетельства даже нескольких ярких вспышек в центральной части района катастрофы [16]. Это дает основание предполагать, что Тунгусская катастрофа завершилась серией взрывов, среди которых могли быть и сравнительно низкие, приведшие к загрязнению отдельных участков земной поверхности веществом ТКТ или продуктами взрыва. Весьма вероятно, что такие участки совпадают с центрами частного радиального вывала леса в центре бурелома. Наличие частных центров было отмечено еще Л. А. Куликом [13]. В пользу такого предположения говорят и неоднократные упоминания там же о «пятнистом» характере следов разрушений в этом районе [1]. В одном из таких центров — вблизи так называемой Сусловской воронки — в 1972 г. были отобраны образцы моховой залежи сфагнум-фускум с различной глубиной, в частности, для исследования химического состава золы торфа (колонка В). Две другие колонки торфа были отобраны в 1 км южнее (колонка Б) и в 4—4,5 км западнее (колонка А) этой точки. Результаты, излагаемые ниже, являются дальнейшим развитием положений, опубликованных нами ранее [7].

Колонки торфа площадью  $30 \times 30$  см<sup>2</sup> и глубиной до 60—70 см разделялись на месте слоями по 2,5 см и после просушки до постоянного веса при 105°C озолялись в муфельной печи при  $450 \pm 30$ °C. Отбор, транспортировка, предварительная обработка и озоление образцов производились в условиях, исключающих их внешнее загрязнение. Навески золы по 5—20 мг таблетировались со слабой связкой спиртовым раствором клея БФ-2 (1 : 5), помещались в герметичную упаковку из тефлоновой и полиэтиленовой пленок и

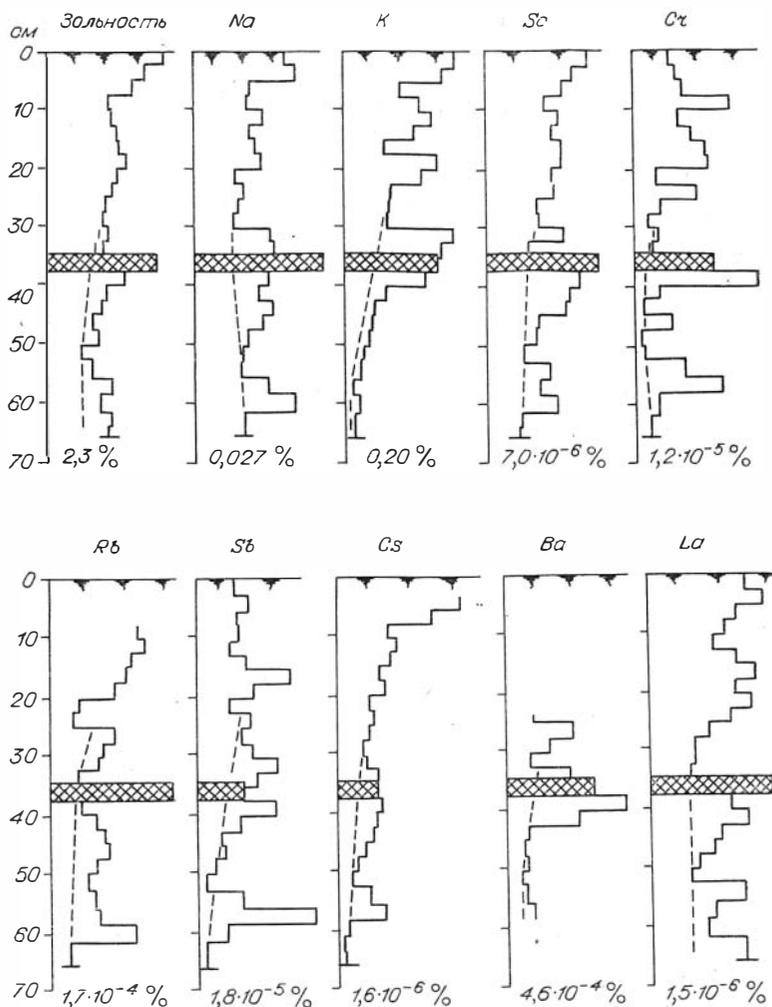
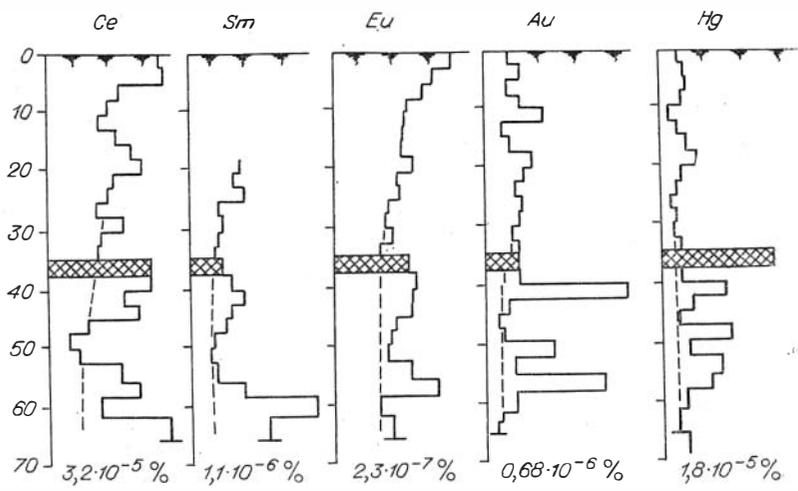
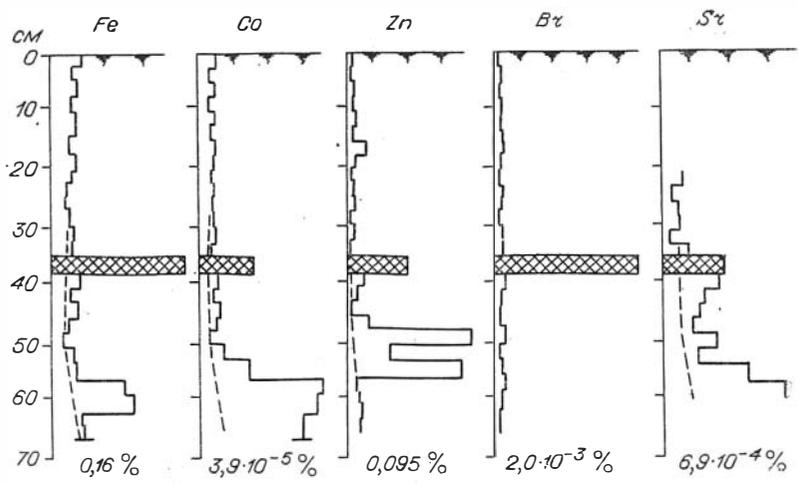


Рис. 1. Диаграммы послойного изменения концентраций некоторых Суэловской воронки (район эпицентра взрыва). Слева — глубина слоя, слое мха (заштриховано). Штриховая линия — условная граница фоно ТРТ).

облучались в сухом канале ядерного реактора потоком тепловых нейтронов  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Время облучения — от 10 до 20 ч. После 1, 3, 7, 15, 30 и 100-суточного «остывания»  $\gamma$ -излучение облученных образцов исследовалось с помощью Ge(Li) полупроводниковых детекторов типа ДГДК-40 и ДГДК-80 (энергетическое разрешение — 3 и 5 кэВ на линии 1332 кэВ соответственно) и амплитудного анализатора NTA-512В. Абсолютные концентрации



химических элементов в сухом веществе мха сфагнум-фускум вблизи внизу — концентрации соответствующих элементов в «катастрофном» вого состава мха (для количественной оценки массы выпавшего вещества

элементов определялись как относительным методом — с помощью набора соответствующих эталонов, облучаемых в одной партии с образцами, так и методом мониторов (K, Au, Zn). Сравнительно-высокое энергетическое разрешение детекторов и стабильность использованной аппаратуры позволили без радиохимической обработки облученных образцов достаточно надежно определять в каждом из них до 20 химических элементов. Основные характеристики

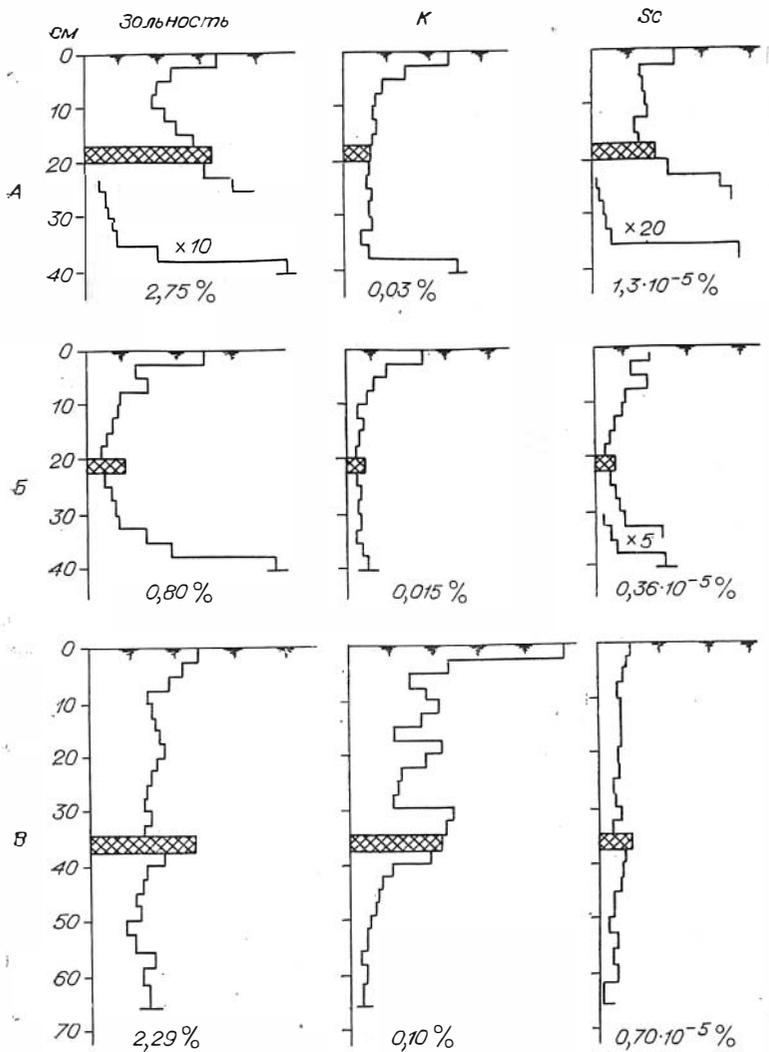
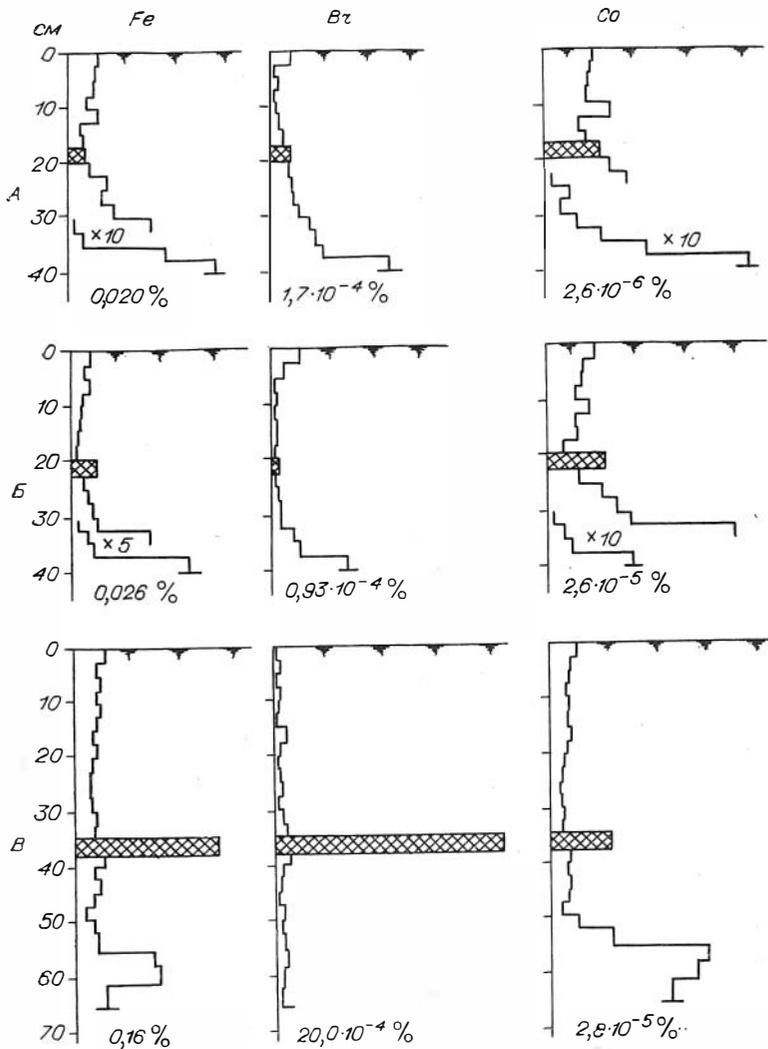


Рис. 2. Сравнительные диаграммы послойного распределения отдельных элементов В — основная колонка, Б — в 1 км к югу от основной колонки, В — в 1 км к югу от основной колонки.

определяемых элементов и условий измерений при нейтронно-активационном анализе указанных образцов приведены в табл. 1.

Полученные диаграммы послойного изменения зольности сухого мха с глубиной и содержания в нем отдельных химических элементов для колонки В приведены на рис. 1. Заштрихован слой мха, обнаруживающий пикообразное увеличение зольности и который поэтому с известными оговорками можно считать «катастроф-



ных химических элементов в слое моховой залежи трех колонок мха: ной, А — контрольная колонка (см. в тексте).

ным» [5]. Анализ приведенных диаграмм обнаруживает резкое пикообразное увеличение концентраций целого ряда химических элементов в «катастрофном» или соседних с ним слоях мха. Среди исследованных элементов это, прежде всего, относится к Na, K, Cr, Fe, Co, Zn, Br, Rb, Ba, Au и Hg. При этом средняя по колонке концентрация Na в 5—10 раз, а K в 1,5—3 раза выше, чем в двух остальных колонках. Не обнаруживает явных аномалий в этих

## Основные характеристики элементов и радионуклидов при нейтронно-активационном анализе золы мха сфагнум-фускум

| Элемент | Радиоактивный изотоп | T <sub>1/2</sub> | Сечение активности, барн | Гамма-линии, вых. % |             | Стандартная относительная ошибка измерений, % |
|---------|----------------------|------------------|--------------------------|---------------------|-------------|---|
|         |                      |                  |                          | аналитическая       | контрольная |   |
| Na      | <sup>24</sup> Na     | 15,0 ч           | 0,53                     | 1368(100)           | 2754(100)   | 2,5   |
| K       | <sup>42</sup> K      | 12,4 ч           | 1,31                     | 1524(20)            | —           | 7,5   |
| Sc      | <sup>46</sup> Sc     | 83,9 д           | 11,0                     | 889(100)            | 1120(100)   | 3,4   |
| Cr      | <sup>51</sup> Cr     | 27,8 д           | 14,7                     | 320(9)              | —           | 22  |
| Fe      | <sup>59</sup> Fe     | 45,6 д           | 1,08                     | 1291(44)            | 1099(56)    | 6,5   |
| Co      | <sup>60</sup> Co     | 5,26 г           | 18,6                     | 1332(100)           | 1173(100)   | 7,2   |
| Cu      | <sup>64</sup> Cu     | 12,6 ч           | 4,36                     | 511(200)            | 660(2)      | 5,5   |
| Zn      | <sup>65</sup> Zn     | 246 д            | 0,62                     | 1115(51)            | 511(3, 4)   | 2,3   |
| Br      | <sup>82</sup> Br     | 1,47 д           | 3,00                     | 776(83)             | 554(73)     | 5,8   |
| Rb      | <sup>86</sup> Rb     | 18,7 д           | 0,43                     | 1078(8, 8)          | —           | 28  |
| Sr      | <sup>85</sup> Sr     | 63,9 д           | 1,05                     | 514(99)             | —           | 14  |
| Sb      | <sup>124</sup> Sb    | 61 д             | 3,77                     | 1691(50)            | 603(99)     | 17  |
| Cs      | <sup>134</sup> Cs    | 2,05 г           | 30,9                     | 796(88)             | 605(98)     | 26  |
| Ba      | <sup>131</sup> Ba    | 11,5 д           | 9,4                      | 496(45)             | 373(13)     | 27  |
| La      | <sup>140</sup> La    | 1,68 д           | 9,1                      | 1596(96)            | 497(42)     | 21  |
| Ce      | <sup>141</sup> Ce    | 32,5 д           | 0,54                     | 145(48)             | —           | 24  |
| Eu      | <sup>152</sup> Eu    | 12,7 г           | 7200                     | 344(24)             | 122(28)     | 12  |
| Au      | <sup>198</sup> Au    | 2,70 д           | 98,8                     | 412(96)             | —           | 30  |
| Hg      | <sup>203</sup> Hg    | 46,9 д           | 4,87                     | 279(77)             | —           | 40  |

слоях Sc. Изменение его концентрации с глубиной примерно соответствует диаграмме послынного изменения зольности мха.

В колонке Б аномальное распределение с пиком в «катастрофном» и близких к нему слоях дают Na, Sb, Au, Hg и, в меньшей мере, Fe, Zn и Br. Однако аномалии эти значительно слабее, чем в колонке В, а концентрации всех элементов в колонке А изменяются с глубиной совершенно монотонно (рис. 2). Исключение — сурьма, обнаруживающая заметную аномалию даже в последнем случае. Строго говоря, колонка А не является контрольной, поскольку находится также в центральной части района катастрофы. С другой стороны, вынесение точки отбора контрольных образцов за пределы данного геологического микрорайона может нарушить биогеохимическую однородность исследуемого материала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в пределах эпицентральной части района катастрофы существуют сравнительно большие участ-

ки, практически свободные от элементных аномалий, образцы с которых вполне могут быть использованы в качестве контрольных даже, по-видимому, при исследовании плохо стратифицируемых объектов; участки с четкими элементными аномалиями, вероятно, достаточно остро локализованы.

Пиковый характер обнаруженной аномалии с четкой приуроченностью к «катастрофным» или соседним с ними слоям мха является достаточно убедительным свидетельством ее связи с событиями 1908 г. Загрязнение непосредственно «катастрофного» слоя могло произойти как в результате импрегнирования взрывной волной мелкодисперсного вещества ТКТ или парообразных продуктов взрыва (особенно таких реакционноспособных элементов, как Вг), так и при последующем выпадении из атмосферы продуктов взрыва. Последнее, однако, менее вероятно из-за обычного при мощных взрывах выноса основной массы пыли в верхние слои атмосферы и последующего выпадения ее сравнительно далеко за пределами эпицентральной зоны [3].

Из приведенных на рис. 1 диаграмм хорошо видно, что ряд элементов избирательно концентрируется также в некоторых «подкатастрофных» слоях мха. Так, очень яркая аномалия  $Zn$ , кроме «катастрофного» слоя, проявляется также на глубине 10—20 см ниже него. В тех же слоях мха заметно повышены концентрации  $Cr$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ,  $Rb$ ,  $Sb$ , редких земель,  $Au$  и  $Hg$ . Положение пиковых концентраций элементов с аномальным распределением ниже «катастрофного» слоя может быть связано как с условиями первичного внедрения (например, импрегнированием взрывной волной с «прострелом» вышележащих слоев с большой кинетической энергией), так и с последующим вымыванием из «катастрофного» и других слоев с проявлением хроматографического эффекта в торфяной массе или вторичного концентрирования на границе слоя вечной мерзлоты.

Повышенные концентрации  $K$  выше «катастрофного» слоя связаны, по-видимому, с последующим перераспределением избыточного количества этого элемента в молодой прирост, поскольку эта часть минерального питания мхов в той или иной мере утилизируется из нижних, отмирающих слоев [10]. Последнее подтверждается распределением  $K$  по глубине колонки А, которая с известными оговорками может считаться контрольной (см. рис. 2). Биологическая роль сурьмы, дающей сходное распределение, не вполне ясна (как, впрочем, и многих других микроэлементов). Однако высказанные выше соображения о распределении  $K$ , возможно, справедливы и для нее. Размытая картина распределения по колонке В На объясняется, скорее всего, значительно меньшей биологической значимостью по сравнению с его химическим аналогом  $K$  и хорошей растворимостью большинства его химических соединений. Вследствие этого «избыточный»  $Na$  мог размыться более или менее равномерно по всей толще колонки, не давая сейчас четких пиковых аномалий. В колонке Б этот избыток был сравнительно невелик и

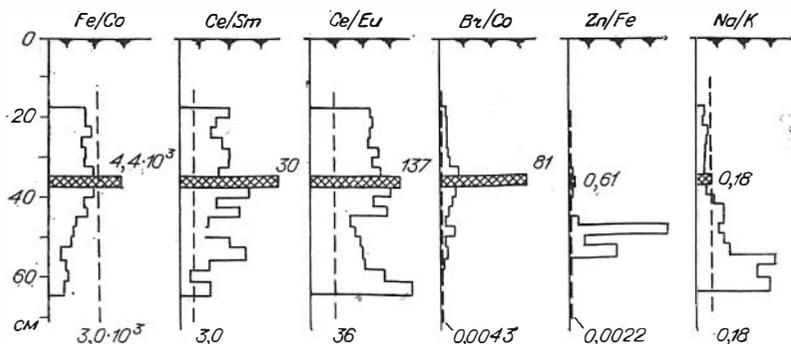


Рис. 3. Диаграммы послойного изменения отношений концентраций некоторых химических элементов в основной колонке мха. Штриховая линия — соответствующие значения в трапах.

полностью ассимилировался в «катастрофном» слое, дав сравнительно четкую аномалию. В какой-то мере это должно быть справедливо и для резко избыточных количеств К и других макроэлементов.

На рис. 3 приведены диаграммы изменения отношений концентраций некоторых элементов с глубиной колонки В. Там же штриховой линией отмечены средние значения соответствующих отношений для местных коренных пород, имеющих выход на поверхность и склонных к пылеобразованию (трапы). Отношения концентраций многих элементов в «катастрофном» и других «аномальных» слоях мха значительно отличаются от тех же отношений в трапах и от фонового состава золы мха (в слоях, не обнаруживающих элементных аномалий). Особенно наглядную картину с четким пиком в «катастрофном» слое дают отношения концентраций Fe/Co, Br/Co, Ce/Sm, а глубже этого слоя на 12—20 см — Zn/Fe. Динамика этих отношений с глубиной колонки для большинства элементов воспроизводится с большой точностью (не хуже  $\pm 5\%$ ), тогда как абсолютные значения концентраций многих элементов получены с ошибкой  $\pm 10\%$ , а в отдельных случаях даже  $\pm 25$ — $40\%$ .

На рис. 4 приведены диаграммы послойного изменения концентраций и соотношений ряда элементов в нерастворимой части золы торфа из той же колонки В. Для этого 100—150 мг золы перед облучением в реакторе обрабатывались последовательно 2N растворами HCl и HNO<sub>3</sub>, дважды — бидистиллятом и, наконец, этанолом. Сухие осадки отделялись центрифугированием и анализировались нейтронно-активационным методом по изложенной выше методике. При такой обработке золы из образцов удаляется подавляющее большинство чисто «биологических» элементов (К, Na, Са и т. д.) с сохранением в остатке всех труднорастворимых соединений элементов, привнесенных извне. Соответственно снижается фон, и контрастность обнаруженной аномалии для таких элементов увеличивается.

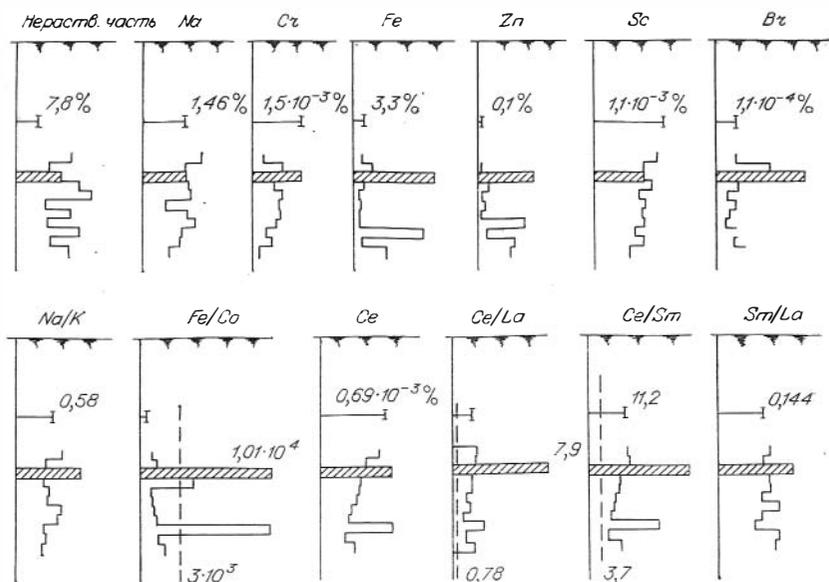


Рис. 4. Диаграммы послойного изменения концентраций и их отношений для некоторых химических элементов в нерастворимой части золы мха основной колонки. Штриховая линия — соответствующие значения в траппах. Цифры сверху — соответствующие значения в контрольном слое мха той же колонки. «Катастрофный» слой мха заштрихован.

Действительно, пиковый всплеск концентрации Fe в «катастрофном» слое резко увеличивается с появлением аналогичного пика в более глубоких слоях, где в исходных осадках была отмечена особая четкая аномалия для Zn. Содержание последнего в этих слоях после указанной обработки заметно уменьшилось, видимо, за счет удаления его растворимых соединений. Зато всплеск концентрации Zn непосредственно в «катастрофном» слое стал значительно контрастнее. Аномалия по Br заметно ослабла (удаление растворимых соединений), но проявляется теперь и в предшествующем «катастрофному» слое (биологически активный элемент). Аномалии по Na и K практически исчезли. Особенно контрастными стали теперь аномалии отношений концентраций Fe/Co, Ce/La, Ce/Sm и несколько меньше Na/K и Sm/La. Аномальный слой на глубине 15 см ниже «катастрофного» при такой обработке образцов выявляется особенно четко и соответствует, видимо, существовавшей в 1908 г. границе слоя вечной мерзлоты. Вместе с тем ход фоновых значений (в других слоях) для всех элементов стал значительно ровнее, чем в исходной золе, отражая, по-видимому, динамику обычных атмосферных выпадений.

На том же рис. 4 штрихами отмечены соответствующие значения для местных траппов (после аналогичной обработки). Еще

Более резко, чем на рис. 3, они отличаются от полученных для нерастворимой части золы торфа. Это свидетельствует о том, что обнаруженная элементная аномалия не связана или связана в самой незначительной степени с выпадением местной терригенной пыли во время катастрофы 1908 г. или непосредственно после нее. Экстремальный характер распределения отдельных химических элементов по глубине колонки В и частично Б с четкой приуроченностью к определенным слоям торфа, в частности «катастрофным», позволяет исключить также и связь этой аномалии с возможными биогеохимическими эффектами локальных рудопроявлений. Таким образом, есть все основания считать обнаруженную аномалию космохимической, связанной с Тунгусской катастрофой 1908 г. и обусловленной консервацией выпавшего вещества ТКТ в толще моховой залежи.

Принимая нормальный ход изменения зольности мха и содержания в нем большинства химических элементов с глубиной колонки В монотонным (по аналогии с колонкой А), можно весьма условно оценить массу внесенных элементов во их избыточных концентрациях над «подложкой», отражающей фоновый состав мха (пунктир на рис. 1) для каждого из них. Относя полученные значения к общему приросту зольности во всех «аномальных» слоях, несложно оценить и примерный химический состав внесенного в торф вещества. Результаты таких оценок (средние из полученных независимо тремя исполнителями) приведены в табл. 2. Там же для сравнения приведены фоновые содержания этих же элементов в золе мха, местной терригенной пыли и каменных метеоритах. Состав местной терригенной пыли соответствует среднему химическому составу 5 образцов трапшов с окружающих высоток, отобранных одновременно с образцами моховой залежи. Анализ указанных образцов выполнен также нейтронно-активационным методом по аналогичной методике. Усредненный состав хондритов приведен по данным «Справочника химика» [15], которые к настоящему времени несколько устарели. Однако в данном случае это не имеет принципиального значения.

Хорошо видно, что полученный состав вещества ТКТ (точнее, той его части, которая достигла земной поверхности на данном участке и сохранилась к настоящему времени в торфе) резко отличается как от местных земных пород и фонового состава золы торфа, так и от известных типов каменных метеоритов, включая хондриты. Особо следует подчеркнуть исключительно высокое содержание Zn, большое содержание Вг и повышенные концентрации таких сравнительно редких или рассеянных элементов, как Au и Hg, особенно если учесть возможность значительных потерь последней при озолении образцов. Следует еще раз подчеркнуть, что часть хорошо растворимых соединений внесенных элементов могла впоследствии перераспределиться по значительной толще мха, не давая сейчас четких аномалий. Поэтому приведенные выше оценки содержаний таких элементов, как Na, K, Cs и т. п., в веществе ТКТ можно

## Предварительные данные по химическому составу минеральной составляющей вещества Тунгусского космического тела, вес. %

| Элемент | Множитель        | Данные настоящей работы |                      |                          | Наменные метеориты | Хондриты |
|---------|------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|----------|
|         |                  | ТКТ                     | Фоновый состав торфа | местная терригенная пыль |                    |          |
| Na      | 1                | 1,9                     | 0,44                 | 1,6                      | 0,78               | 0,75     |
| K       | 1                | 4,9                     | 0,89                 | 1,0                      | 0,2                | 0,09     |
| Ca      | 1                | 10                      | —                    | —                        | 2,0                | 1,4      |
| Sc      | 10 <sup>-3</sup> | 0,56                    | 0,72                 | 4,1                      | 0,6                | 0,5      |
| Cr      | 10 <sup>-3</sup> | 0,91                    | 0,29                 | 1,4                      | 345                | 270      |
| Fe      | 1                | 7,5                     | 3,3                  | 13,7                     | 15,6               | 24,1     |
| Co      | 10 <sup>-3</sup> | 7,4                     | 2,3                  | 4,6                      | 20                 | 110      |
| Cu      | 10 <sup>-3</sup> | 4,3                     | 9,7                  | 22                       | 0,16               | 170      |
| Zn      | 10 <sup>-1</sup> | 190                     | 8,9                  | 0,6                      | 0,0034             | 0,076    |
| Br      | 10 <sup>-2</sup> | 9,6                     | 1,4                  | 0,02                     | 2,5                | 2,5      |
| Rb      | 10 <sup>-2</sup> | 0,60                    | 1,1                  | —                        | 0,045              | 0,080    |
| Sr      | 10 <sup>-2</sup> | 2,0                     | 7,6                  | 10                       | 0,26               | 0,23     |
| Sb      | 10 <sup>-3</sup> | 2,4                     | 1,5                  | 1,1                      | 0,90               | 0,29     |
| Cs      | 10 <sup>-3</sup> | 1,4                     | 1,1                  | 0,10                     | 1,0                | 0,11     |
| Ba      | 10 <sup>-2</sup> | 8,1                     | 2,2                  | 2,6                      | 0,090              | 0,029    |
| La      | 10 <sup>-3</sup> | 1,3                     | 0,76                 | 2,3                      | 0,33               | 0,19     |
| Ce      | 10 <sup>-3</sup> | 1,7                     | 1,7                  | 1,8                      | 0,25               | 0,21     |
| Eu      | 10 <sup>-5</sup> | 1,5                     | 2,2                  | 30                       | 3,3                | 2,7      |
| Au      | 10 <sup>-5</sup> | 32                      | 10                   | 0,002                    | —                  | 2,5      |
| Hg      | 10 <sup>-5</sup> | 160                     | 2,8                  | 0,30                     | 0,10               | —        |

рассматривать только как нижний предел. Суммарная плотность выпадения этого вещества по тем же оценкам составляет на данном участке около 40 т/км<sup>2</sup>.

При данной методике граница фонового состава торфа определяется весьма условно, особенно для элементов, не обнаруживающих четких аномалий (Sc, редкие земли и др.). Кроме того, состав выпавшего вещества может быть территориально неоднороден. Поэтому полученные в настоящей работе данные по химическому составу минеральной части вещества ТКТ являются сугубо предварительными и требуют уточнений. Однако уже сейчас можно утверждать, что состав ТКТ был весьма необычен и совершенно не типичен для известных типов метеоритов. По сравнению с ними минеральная часть ТКТ была сильно обогащена такими легкоплавкими и «летучими» элементами, как щелочные металлы, Вг и, возможно, другие галогены. Для проведения более полных

аналогий и сравнительных оценок необходимо существенно расширить круг исследованных элементов с включением в программу изотопных измерений.

При радиохимическом исследовании золы мха из слоев, содержащих вещество ТКТ, с применением низкофоновой радиометрии и  $\gamma$ -спектрометрии высокого разрешения не обнаружено долгоживущих радиоактивных изотопов, образующихся в значительных количествах при нейтронной или фотоядерной активации образцов сходного с ТКТ химического состава ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{152,154}\text{Eu}$  и др.). Полученные результаты не противоречат гипотезе о кометной природе ТКТ и, возможно, даже подтверждают ее. В этом случае дальнейшие исследования в том же направлении дадут возможность прямого изучения кометного вещества в земных условиях и решения целого ряда вопросов о химическом составе и строении ядер комет, их природе, происхождении и т. д.

Еще раз необходимо подчеркнуть, что факт обнаружения космохимической аномалии на данном участке, в одном из центров частного радиального вывала леса [13], и, по-видимому, острая локализация эффекта на местности свидетельствуют в пользу высказанного выше предположения, что во время Тунгусской катастрофы 1908 г. в ее эпицентральной части имела место серия сравнительно маломощных и низких взрывов, при которых произошло локальное загрязнение отдельных участков земной поверхности продуктами взрыва и веществом ТКТ, распыленными преимущественно в виде мелкодисперсного аэрозоля или в парообразном состоянии. Поэтому дальнейшие исследования Тунгусской космохимической аномалии целесообразно направить на выявление других таких участков с детальным (включая изотопный анализ и определение космогенных радиоизотопов) исследованием отобранных там образцов.

Авторы благодарят проф. Н. В. Васильева за постоянный интерес к работе, Е. М. Колесникова, В. А. Алексеева и Л. К. Левского за предварительное обсуждение результатов и ценные советы, Е. Б. Бланкова, Т. Н. Бланкову и А. В. Золотова за полезные критические замечания, а также С. И. Голенецкую и В. С. Голенецкого за помощь в работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 20—21.
2. Бронштэн В. А. К вопросу о движении в атмосфере Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 20. М., Наука, 1961, с. 75—81.
3. Бруд Г. Л. Обзор эффектов от действия ядерных взрывов. — В кн.: Действие ядерного взрыва. М., Мир, 1971. 305 с.
4. Васильев Н. В. Проблема Тунгусского метеорита. — Земля и Вселенная, 1975, № 1, с. 29—35.
5. Васильев Н. В., Львов Ю. А. и др. Поиски мелкодисперсного космического вещества в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 141—146.

6. Васильев Н. В., Львов 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—68.
7. Голенецкий С. П., Степанов В. В., Колесников Е. М. Признаки космохимической аномалии в районе Тунгусской катастрофы 1908 г.— Геохимия, 1977, № 11, с. 20—25.
8. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 147—149.
9. 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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1974, с. 25—27.
10. Ковалевский А. Л. Биогеохимические поиски рудных месторождений. М., Наука, 1974. 143 с.
11. Ковалевский А. Ф., Резников Н. 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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 125—134.
12. Коненкин В. Г. Сообщения очевидцев о Тунгусском метеорите 1908 г.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 31—35.
13. Кринов Е. Л. Тунгусский метеорит. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1949. 196 с.
14. Львов Ю. А. О нахождении космического вещества в торфе.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 140—144.
15. Справочник химика. Под ред. Б. П. Никольского. 2-е изд. Т. I. Л.—М., Госхимиздат, 1962, с. 22—24.
16. Сулов И. М. Опрос очевидцев Тунгусской катастрофы 1908 г.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 21—30.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА \*

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

Для определения энергетических и траекторных параметров Тунгусского метеорита по имеющейся картине вывала леса авторами [31, 32] была разработана газодинамическая модель и создан метод решения возникающей обратной задачи. Здесь взрывная и баллистическая волны моделировались ударной волной, которую создает эквивалентный взрыв полубесконечного цилиндрического заряда с переменной удельной энергией вдоль оси. Конечная точка заряда располагается в точке взрыва метеорита, а ось ориентируется вдоль траектории. В результате решения соответствующей системы уравнений газовой динамики, требующего применения численных методов, рассчитывается движение ударной волны в атмосфере и строится зона наземных разрушений. Условия бли-

\* Статья представляет собой расширенное изложение доклада [16], прочитанного авторами на IV Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, Киев, 21—28 мая 1976 г.

зости теоретической и фактической картин вывала леса позволяют определить основные параметры модели, которыми являются высота конечной точки траектории  $H_0$ , угол ее наклона  $\alpha$ , энергия сферической (взрывной) волны  $E_0$  и удельная энергия цилиндрической (баллистической) волны  $E_1$ . Существенное достоинство данного подхода заключается в том, что указанные параметры метеорита находятся только из газодинамических расчетов движения и отражения ударной волны без необходимости рассматривать сложные и неясные физические процессы, происходившие с космическим телом.

Описание предложенной модели и разработанного метода расчета вместе с первыми численными результатами было опубликовано в ряде работ [13, 31, 32]. Решение обратной задачи, в котором распространение ударной волны в атмосфере с переменной плотностью упрощенно рассчитывалось по известному эмпирическому модифицированному правилу Сакса (в дальнейшем его будем просто называть правилом Сакса), было определено в [14, 15]. В дальнейшем были получены уточненные результаты [18, 33], при этом использовалась методика, основанная на склейке решения для достаточно сильной ударной волны в неоднородной среде с соответствующим асимптотическим решением для слабой волны.

Нами [18, 33] определены следующие значения основных параметров Тунгусского метеорита:  $H_0 = 6,5$  км,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $E_0 = 10^{23}$  эрг;  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{17}$  эрг/см. В этом решении обеспечено хорошее соответствие зон вывала леса в модельном расчете и при реальном событии [23—25] в отношении как конфигурации и размеров этих зон, так и их внутренней структуры (положение границы стоячего леса, положение участков с максимальными разрушениями, отклонение направления падения деревьев от радиального). В этом случае для обратной задачи (строго говоря, не имеющей единственного решения) удалось определить искомое решение в достаточно узких пределах. Расчеты проводились при довольно общем законе изменения удельной энергии баллистической волны  $E_1$  вдоль траектории, но при этом выяснилось, что хорошие решения получаются лишь тогда, когда на конечном активном участке траектории  $E_1 \approx \text{const}$ . Заметим, что угол  $\alpha = 40^\circ$ , найденный в этом решении, не выходит из интервала значений  $\alpha = 28 \pm 12,5^\circ$ , которые дают астрометрические оценки [9].

В полученном решении суммарная величина энергии взрывной и баллистической волн, вычисленная по разрушению лесного массива, составляет около 9,5 Мт. При определении полного тротилового эквивалента необходимо принимать во внимание части энергии, которые пошли на возмущение атмосферы при полете тела на пассивном участке траектории, на перетекание воздуха из нижней части возмущенной области в верхнюю при взрыве, на высокотемпературные эффекты в реальном газе (диссоциация, ионизация, излучение). Эти явления не учитывались в данных расчетах, но они вносили свой заметный вклад в общий баланс энергии. Таким обра-

зом, полное энергосодержание при полете и взрыве Тунгусского космического тела будет существенно больше энергии, вычисленной по вывалу леса, и может ее превышать до полутора раз.

Указанную величину полного тротилового эквивалента Тунгусского явления интересно сопоставить с последними результатами детального анализа барограмм и сейсмограмм [27]. Здесь в качестве источника сейсмического возмущения рассматривалось совместное воздействие на Землю взрывной и баллистической ударных волн, что более реально и соответствует принятой нами газодинамической модели. Обработка барограмм, записанных шестью различными станциями при полете и взрыве Тунгусского метеорита, дала значения полного энергосодержания в интервале  $9,5 \div 14,5$  Мт. На основании этих данных и результатов анализа четырех различных сейсмограмм в этой работе делается заключение, что при рассчитанной высоте взрыва 8,5 км полный тротильный эквивалент Тунгусского явления составлял  $12,5 \pm 2,5$  Мт. Эта величина хорошо согласуется с нашими расчетами, а также со значением, определенным по барограммам [30]. Эти результаты вместе с данными И. П. Пасечника [20] приведены в табл. 1. Напомним, что в этой работе по сейсмограммам была получена только магнитуда землетрясения, величина же тротилового эквивалента задавалась в пределах 30—50 Мт на основании грубых оценок по вывалу леса. Соответствующие пределы высот взрыва 2,5—9,2 км находились с использованием приближенной сейсмологической теории для сферического взрыва, что в случае Тунгусского взрыва с мощной баллистической волной вносит существенные дополнительные ошибки.

Отметим, что полный тротильный эквивалент должен существенно превосходить приведенные в табл. 1 значения энергосодержания, рассчитанные по вывалу леса.

В работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3] также применялась взрывная модель для определения параметров Тунгусского метеорита по вывалу леса и приведены такие их средние значения:  $H_0 = 7,5$  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 преды-

Таблица 1

Тротильный эквивалент Тунгусского явления Q(Мт) и высота взрыва  $H_0$  (км) по данным разных работ

| По вывалу леса |       |                       | По сейсмограммам |         |                       | По барограммам         |                       |
|----------------|-------|-----------------------|------------------|---------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Q              | $H_0$ | литературный источник | Q                | $H_0$   | литературный источник | Q                      | литературный источник |
| 9,5            | 6,5   | [18, 33]              | $12,5 \pm 2,5$   | 8,5     | [27]                  | 9,5—14,5               | [27]                  |
| 150,0          | 7,5   | [3]                   | 30,0—50,0        | 2,5—9,2 | [20]                  | 10,0 $\pm$ 5,0<br>20,0 | [30]<br>[20]          |

душем ее участке. Эти данные, весьма сильно отличающиеся от нашего решения [18, 33], дают слишком большие значения энергии. Подсчет ( $5,5 \cdot 10^{23} + 1,9 \cdot 10^{18} \times 3 \cdot 10^6 = 62,5 \cdot 10^{23}$  эрг) показывает, что здесь суммарная энергия взрывной и баллистической ударных волн, отвечающая вывалу леса, равняется 150 Мт. Полное же энерговыделение в этом случае может достигать нереальной величины в 250 Мт, что примерно на порядок превосходит известные надежные оценки. Неудовлетворительность результатов этой работы объясняется в первую очередь тем, что в ней в отличие от наших решений [14, 15, 18, 33] вообще не найдено решения обратной газодинамической задачи, а сделаны лишь грубые оценки параметров Тунгусского метеорита и при этом допущен целый ряд серьезных ошибок.

Действительно, в работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3] не было получено ни одной расчетной зоны вывала леса, форма которой хотя бы отдаленно была похожа на натурную конфигурацию. Здесь совершенно не исследовалась структура зоны разрушений (например, поле направлений упавших деревьев), которая играет важную роль при определении правильного решения, а вопрос о его единственности даже не ставился. Сделанный вывод о том, что наилучшей комбинацией траекторных параметров  $H_0$ ,  $\alpha$  является комбинация  $H_0 = 7,5$  км,  $\alpha = 15^\circ$ , не обоснован и находится в противоречии с рассчитанной там табл. 4, из которой следует, что наилучшей комбинацией будет  $H_0 = 5$  км,  $\alpha = 45^\circ$ . Таким образом, расчеты этой работы свидетельствуют в пользу больших углов наклона траектории, а не малых, как утверждают ее авторы.

Если бы этим авторам и удалось получить зоны вывала, близкие к натурной «бабочке», то это решение все равно вызывало бы сомнение из-за принятых допущений. Здесь не учитывалось взаимодействие взрывной и баллистической волн, что может значительно исказить картину наземных разрушений, в которые обе эти ударные волны вносили сравнимый вклад. При расчете ударной волны в неоднородной атмосфере применялась приближенная методика [2], которая в интересующем диапазоне условий приводит к большим погрешностям при определении перепада давления на ударном фронте и особенно сильно завышает энергию баллистической волны (подробнее об этом см. ниже). Кроме того, в работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3] имеются и прямые ошибки, например, при расчете отражения ударной волны от поверхности Земли со скалярной величиной — динамическим напором оперируют как с вектором, находя его горизонтальную составляющую, тогда как надо вычислять динамический напор  $q$  по горизонтальной составляющей скорости.

В этой же работе рассматриваются две характерные точки  $A$  и  $B$ , расположенные на задней границе натурной зоны разрушенного леса, являющейся линией  $q = \text{const}$ . Однако по расчетам в точках  $A$  и  $B$  получаются величины  $q$ , отличающиеся в 4—10 раз и более. В попытке устранить это противоречие в работе неверно

считается, что в случае предполагаемого скачкообразного увеличения энергии баллистической волны после пролета телом точки  $A$  не требуется равенства  $q$  в  $A$  и  $B$ . Авторы при этом исходят из неправильной предпосылки, что скачок энергии на траектории создаст скачок в разрушающей силе ударной волны на Земле. На самом же деле линии равных разрушений по-прежнему будут представлять собой семейство с непрерывно меняющимся параметром  $q$ , и одна из этих линий  $q = \text{const}$  в правильном решении должна проходить через обе точки  $A$  и  $B$ . Подчеркнем также, что в случае скачкообразного энерговыделения применяемая в этой работе гипотеза плоских сечений становится несправедливой.

Кроме того, допущена ошибка при оценке скорости и массы Тунгусского метеорита в точке  $A$  перед его распадом. В этих расчетах бралась величина кинетической энергии тела не перед точкой  $A$  (где она неизвестна), а в точке взрыва, несмотря на то, что кинетическая энергия после предполагаемого распада тела должна очень сильно измениться на расстоянии в 30 км между этими точками.

Расчет движения ударной волны в неоднородной земной атмосфере в работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3] проводился с помощью приближенной методики [2], мы же [14, 15] использовали известное правило Сакса (см., например, [34]). В обоих случаях рассматривалась изотермическая атмосфера, в которой температура постоянна, а плотность и давление убывают с высотой  $z$  по экспоненциальному закону

$$\rho = \rho_{\infty} \exp(-z/H_*), \quad p = p_{\infty} \exp(-z/H_*), \quad (1)$$

где  $p_{\infty}$  и  $\rho_{\infty}$  — значения давления и плотности на уровне моря при нормальных условиях,  $z$  — высота, отсчитываемая от этого уровня,  $H_*$  — характерная высота изотермической атмосферы, причем  $H_* = p_{\infty}/g\rho_{\infty}$  ( $g$  — ускорение силы тяжести).

Необходимо сравнить обе эти методики. Попытка такого сравнения, сделанная А. П. Бояркиной и В. А. Бронштэном [1, 3], привела к неправильным выводам. Строгое исследование этого вопроса для сферического и цилиндрического взрыва проведено в работе В. П. Коробейникова и др. [12], на результатах которой мы остановимся.

Правило Сакса и методика В. А. Бронштэна [2] основаны на рассмотрении одномерного течения газа и приближенно устанавливают связь между безразмерными расстояниями  $\xi = r/r^0$  и  $\xi_0 = r_0/z^0$  от центра взрыва до точек, в которых имеется одинаковый перепад давления на ударной волне  $P$  при эквивалентных взрывах в неоднородной и однородной средах с давлением в центре взрыва  $p_0$ . Здесь через  $r^0$  обозначена динамическая длина, причем для сферического случая  $r^0 = (E_0/p_0)^{1/3}$  ( $E_0$  — энергия взрыва), а перепад давления  $P = (p_B - p_L)/p_L$ , где  $p_B$  — давление за ударной волной,  $p_L$  — локальное давление невозмущенной среды. Влияние неоднородности изотермической атмосферы характеризуется безраз-

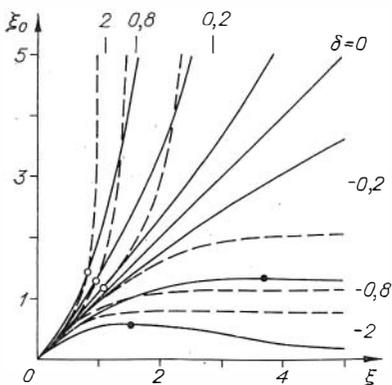


Рис. 1. Модифицированное правило Сакса и методика [2] в случае сферического взрыва.

мерным параметром  $\delta = -r^0 \times \cos \Theta / H_*$ , где  $\Theta$  — угол между радиусом-вектором  $r$  и вертикалью.

Чтобы определить перепад давления  $P$  на ударном фронте в точке неоднородной атмосферы с радиусом  $\xi$ , по зависимости  $\xi_0 = \xi_0(\xi)$  находится соответствующий радиус  $\xi_0$  в однородной атмосфере, по которому и берется искомая величина  $P$  из имеющегося чис-

ленного решения для взрыва в однородной среде. Два семейства таких зависимостей, отвечающие соответственно правилу Сакса (сплошные линии) и методике В. А. Бронштэна [2] (штриховые линии), построены для сферического взрыва на рис. 1. Кривые нанесены для различных значений параметра неоднородности  $\delta$  как для опускающейся ( $\delta > 0$ ), так и для поднимающейся ( $\delta < 0$ ); волны, прямая линия при  $\delta = 0$  отвечает однородной атмосфере. Для цилиндрического взрыва график имеет такой же качественный характер и поэтому здесь не приводится.

Как видно, на начальном участке оба семейства зависимостей  $\xi_0 = \xi_0(\xi)$  довольно близки друг к другу, но затем с ростом  $\xi$  они резко расходятся, что обусловлено разной их асимптотикой. В случае правила Сакса опускающаяся ударная волна полностью затухает только при  $\xi \rightarrow \infty$ , а поднимающаяся сначала замедляет свое движение, а затем (после значения  $\xi$ , отвечающего максимуму кривой  $\xi_0 = \xi_0(\xi)$ , отмеченному точкой) разгоняется до бесконечно большой скорости при  $\xi \rightarrow \infty$ . Такое поведение находится в полном согласии с теоретическими и численными результатами [10].

В случае же методики В. А. Бронштэна [2] имеет место совсем иная картина. Здесь опускающаяся ударная волна полностью вырождается на конечном расстоянии от центра взрыва при предельном значении  $\xi = \xi_{пр}$ , отвечающем вертикальной асимптоте. Поднимающаяся ударная волна непрерывно разгоняется, но при  $\xi \rightarrow \infty$  ее скорость остается конечной (она определяется горизонтальной асимптотой). Следовательно, при расстояниях  $\xi > \xi_{пр}$  для расчетов опускающейся ударной волны пользоваться этой методикой вообще невозможно, а в примыкающей области ее точность очень сильно падает. Отметим, что для нижней точки опускающейся волны в интервале значений  $\delta = 0,5 \div 2$ , которые реальны в случае Тунгусского метеорита, интересные расстояния от центра взрыва  $\xi$  как раз будут близки к предельным значениям  $\xi_{пр}$ , которые в этих условиях для сферического взрыва лежат в интервале  $2,2 \div 1,1$ , а для цилиндрического — в интервале  $2,4 \div 1,1$ .

Таким образом, проведенный анализ просто и наглядно показывает, что приближенная методика В. А. Бронштэна [2] в отличие от правила Сакса будет давать плохую точность для слабых опускающихся ударных волн (а именно они и интересны при решении обратной задачи для Тунгусского взрыва), сильно занижая избыточное давление, что делает ее здесь малоприменимой. В то же время на начальной стадии распространения этой волны (до расстояний  $\xi$ , отмеченных на рис. 1 кружочками) эта методика будет давать несколько более высокое избыточное давление, чем правило Сакса. Вопреки этому в работе А. П. Бояркиной и В. А. Бронштэна [1] неправильно утверждается, что при сравнении этих методик имеет место прямо противоположная ситуация.

Решение обратной задачи об определении параметров Тунгусского метеорита по картине наземных разрушений, полученное нами [18, 33], может быть в известной мере улучшено за счет уточнения исходной информации и усовершенствования метода расчета. Что касается первой стороны этого вопроса, то, как уже отмечалось [18], здесь необходимо иметь более точные сведения о внутренней структуре зоны вывала леса. В частности, хорошее знание расположения каких-либо линий равных разрушений (например, минимальных и максимальных) позволит уточнить высоту взрыва Тунгусского тела. Важно также иметь надежные данные о минимальной разрушающей величине динамического напора для сибирских лиственниц. Большую пользу может принести продолжение работы по определению конфигурации зоны леса, которая подверглась лучистому ожогу.

Метод решения газодинамической задачи о полете и взрыве метеорита должен быть усовершенствован прежде всего за счет применения двумерной нестационарной численной схемы при расчетах распространения ударной волны в неоднородной среде при наличии силы тяжести. Здесь надо рассматривать не изотермическую, а стандартную атмосферу Земли и пользоваться моделью не совершенного, а реального газа, включающей высокотемпературные эффекты. Желательно более точно рассчитывать отражение ударной волны от поверхности Земли. Для определения полного тротилового эквивалента Тунгусского явления интересно провести более точные оценки энергии, которая переносится излучением, и с помощью хотя бы простых модельных баллистических расчетов оценить возможную величину энерговыделения при полете космического тела больших размеров. Перечисленные вопросы будут обсуждены ниже.

Как известно, до последнего времени двумерные численные расчеты взрыва в неоднородной изотермической атмосфере проводились лишь для сильной стадии [10], а на слабой стадии применялось квазидномерное приближение [10, 34], которое не дает необходимой точности.

Недавно в работе Л. В. Шуршалова [26] был развит эффективный двумерный численный метод расчета сферической и цилиндри-

ческой взрывных волн в неоднородной атмосфере на всех стадиях с учетом противодействия и силы тяжести. Этот метод представляет собой модификацию конечно-разностного метода [7], при этом применяется подвижная расчетная сетка, связанная с ударной волной. В работе Л. В. Шуршалова [26] вводится сгущение расчетной сетки вблизи ударного фронта в процессе его движения, что в десяток раз сокращает затраты машинного времени и улучшает точность решения в области, примыкающей к ударному фронту. Данный метод позволяет также рассчитывать отражение ударной волны от поверхности Земли. Анализ некоторых результатов двумерных расчетов ударных волн в неоднородной атмосфере применительно к случаю взрыва Тунгусского метеорита проведен в [17].

Было рассчитано несколько десятков вариантов взрыва в изотермической атмосфере при различных энергиях и высотах взрыва, возможных для Тунгусского метеорита. Воздух рассматривался как совершенный газ с показателем адиабаты  $\gamma = 1,4$ . Здесь изучались сферический и цилиндрический случаи, причем для последнего в рамках гипотезы плоских сечений вводился эффективная характерная высота изотермической атмосферы  $H_{*эф} = H_*/\cos \alpha$  и составляющая ускорения силы тяжести  $g_{\alpha} = g \cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона оси цилиндрического заряда к поверхности Земли. Основные свойства течения, в частности распределения газодинамических функций, в обоих случаях качественно близки.

Типичную картину течения в неоднородной атмосфере при сферическом взрыве, имеющем энергию  $E_0 = 6,5 \cdot 10^{22}$  эрг и происшедшем на высоте  $H_0 = 6,5$  км, дает рис. 2. Здесь в меридиональной плоскости  $x, z$  изображено поле скоростей в возмущенной области на поздней стадии спустя примерно 19 с после взрыва. В расчете определялось также отражение ударной волны от земной поверхности ( $z = 0$ ). Интересно, что почти во всей возмущенной области поток направлен вверх, причем в центральной части скорость имеет довольно большую величину. Это приводит к значительному ослаблению нижнего и усилению верхнего участков ударной волны и соответствующему перераспределению энергии. Весьма наглядно здесь видно образование кольцевого вихря, характерного для мощных воздушных взрывов.

Важным, чисто двумерным эффектом при взрыве в земной атмосфере является перенос энергии из нижней части возмущенной области в верхнюю. Этот процесс иллюстрирует рис. 3, где для сферического взрыва с энергией  $E_0 = 10^{23}$  эрг на высоте  $H_0 = 6,5$  км построены в зависимости от времени  $t$  отношения энергий  $E_{верх}/E_0$  и  $E_{низ}/E_0$  соответственно в верхней и нижней половинах возмущенной области. Штриховая прямая относится к случаю взрыва в однородной атмосфере, когда указанные отношения, очевидно, равны 0,5. Такое перераспределение энергии, не принимаемое во внимание ни в одной из приближенных квазидномерных методик учета неоднородности атмосферы, происходит с нарастанием, поэто-

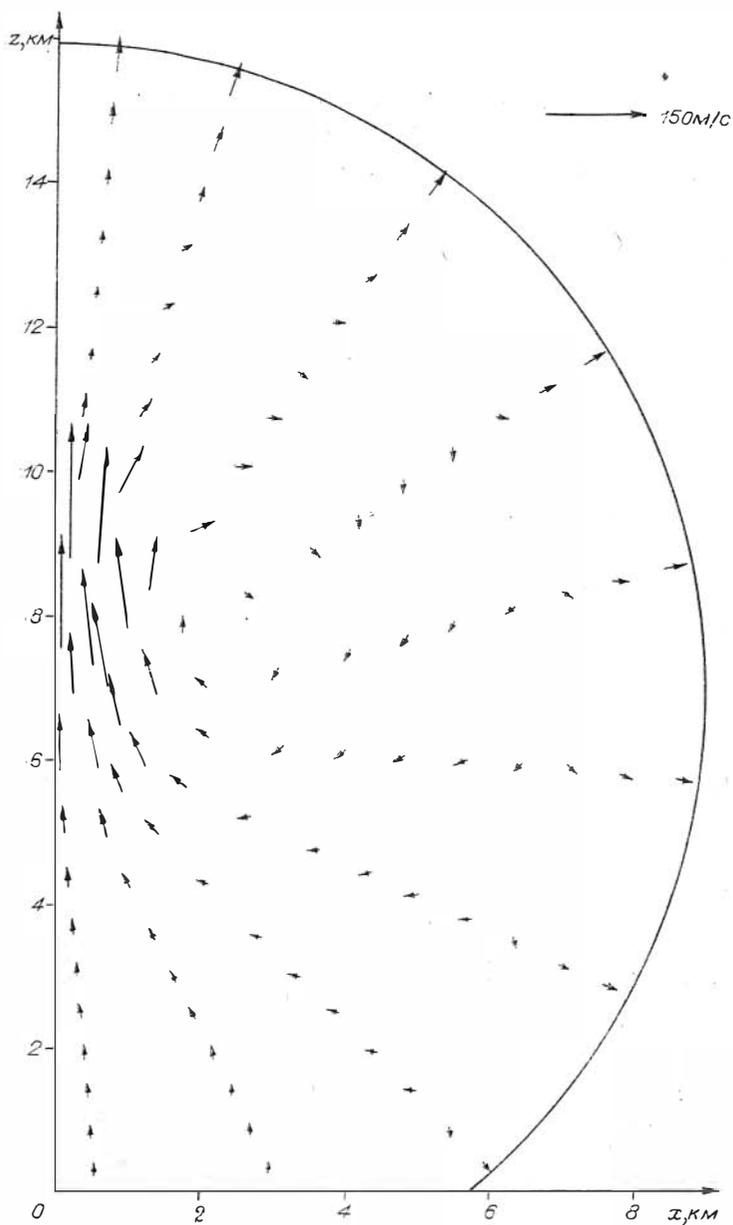


Рис. 2. Поле скоростей для сферического взрыва в экспоненциальной атмосфере.

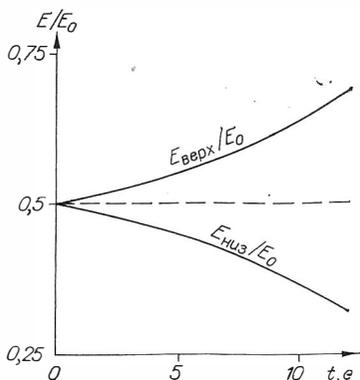


Рис. 3. Перераспределение энергии при сферическом взрыве в экспоненциальной атмосфере.

му для больших времен квазиодномерный подход неизбежно должен давать значительную погрешность.

Численное решение двумерной нестационарной задачи о взрыве в неоднородной атмосфере в поле тяжести может служить как эталон для проверки различных приближенных методик. Имея в

виду приложения к проблеме Тунгусского метеорита, мы в качестве тестовой характеристики возьмем относительный перепад давления  $P$  на ударной волне. На рис. 4—6 для различных случаев проводится сравнение такого численного решения, показанного сплошной линией, с приближенными результатами, полученными по правилу Сакса (кружочки на графиках) и по методике В. А. Брошштэна [2] (крестики). Здесь представлено изменение перепада давления  $P$  в зависимости от расстояния  $r_v$  от центра взрыва. На графиках результаты приводятся для вертикально поднимающейся (верхние зависимости) и опускающейся (нижние зависимости) точек ударной волны до момента времени, когда опускающаяся волна дойдет до поверхности Земли.

Рассмотрим сначала (см. рис. 4) случай сферического взрыва с энергией  $E_0 = 10^{24}$  эрг и высотой  $H_0 = 8$  км. При этих условиях ударная волна даже к моменту прихода на Землю сохраняет еще довольно большую интенсивность. Как видно, здесь приближенная методика [2] дает завышенные значения перепада давления  $P$  для опускающейся волны и заниженные — для поднимающейся. Правило Сакса обеспечивает гораздо лучшие результаты. Отметим, что для таких относительно мощных ударных волн сила тяжести еще не оказывает существенного влияния на течение.

На рассмотренном примере сравнение методики [2] и правила Сакса проводилось также в работе А. П. Бояркиной и В. А. Брошштэна [1]. Однако там был сделан неверный вывод о том, что правило Сакса при этих условиях дает переоценку перепада давления  $P$  у поверхности Земли на 200%, а методика [2] — на 20%. На самом же деле, как это легко видеть при сравнении с точным решением (см. рис. 4), рассматриваемые методики дают здесь соответственно ошибки в 20 и 55%, что неоспоримо свидетельствует о преимуществе правила Сакса.

Перейдем теперь к случаю сферического взрыва, происходящего на той же высоте  $H_0 = 8$  км, но с энергией, в 10 раз меньшей ( $E_0 = 10^{23}$  эрг) (см. рис. 5). Здесь ударная волна на значительном

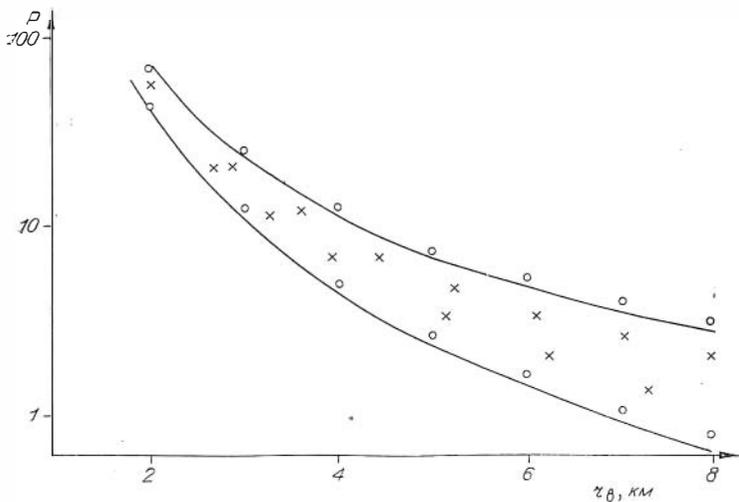


Рис. 4. Относительный перепад давлений на ударной волне при сферическом взрыве в экспоненциальной атмосфере. ( $E_0 = 10^{24}$  эрг).

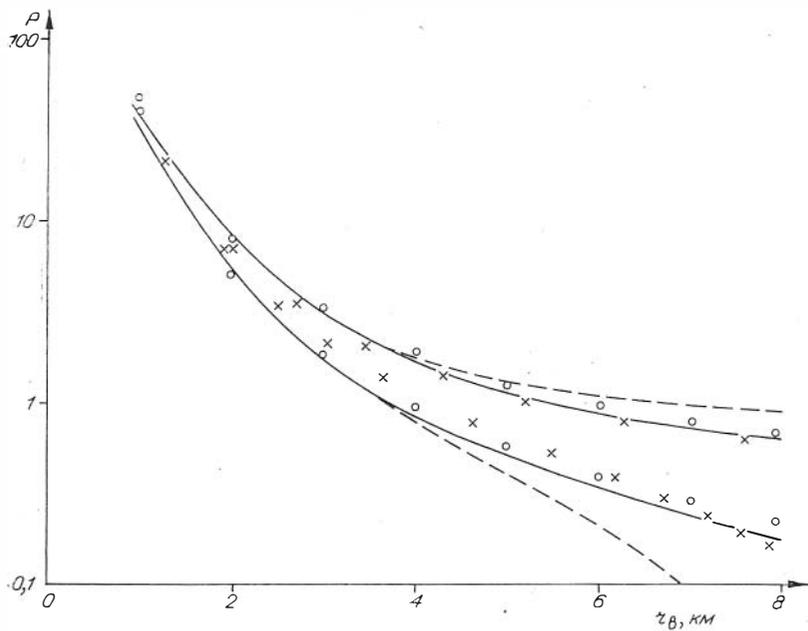


Рис. 5. Относительный перепад давлений на ударной волне при сферическом взрыве в экспоненциальной атмосфере. ( $E_0 = 10^{23}$  эрг).

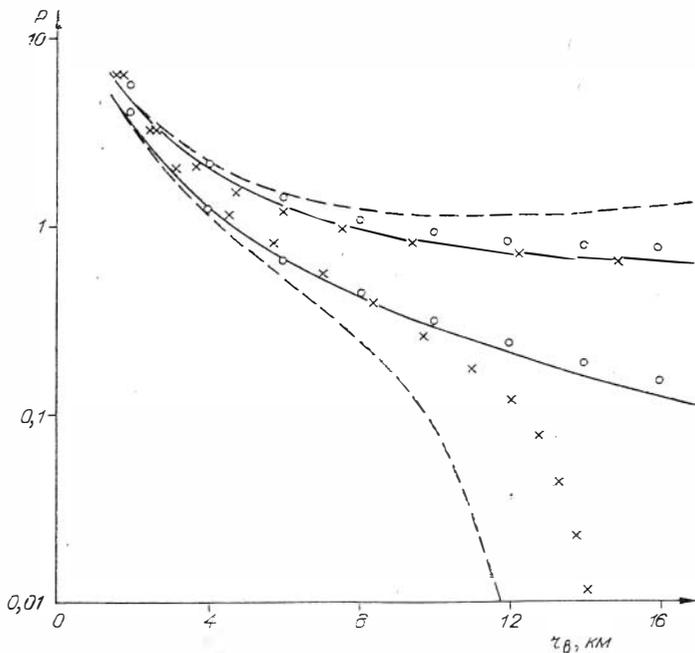


Рис. 6. Относительный перепад давлений на ударной волне при цилиндрическом взрыве в экспоненциальной атмосфере.

участке имеет умеренную интенсивность, согласие обеих приближенных методик и двумерного численного решения с учетом силы тяжести приемлемое. На этом же графике штриховой линией построены соответствующие зависимости, полученные по двумерному численному методу для неоднородной среды, но без учета тяготения. Такое решение является некорректным, поскольку неоднородность атмосферы порождается именно силой тяжести и не учитывать ее при расчете умеренных и слабых волн недопустимо. Как видно из рис. 5, пренебрежение силой тяжести в условиях взрывной волны с умеренной интенсивностью ( $P < 1$ ) приводит к быстрому росту ошибки после появления точки перегиба у зависимости  $P = P(r_0)$  для опускающейся волны. Аналогичная тенденция проявляется на конечном участке соответствующей кривой, рассчитанной по методике В. А. Бронштэна [2].

Эта ситуация особенно резко обостряется на стадии ослабления опускающейся волны, точный расчет которой очень важен для правильного определения параметров Тунгусского метеорита по наземным разрушениям. Наглядное подтверждение этому дает рис. 6, отражающий цилиндрический взрыв в изотермической атмосфере. Рассматривался заряд, имеющий удельную энергию  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{17}$  эрг/см и наклоненный под углом  $\alpha = 40^\circ$ , а высота

взрыва принималась равной  $H_1 = 13$  км. Согласно нашему решению [18, 33], такие характеристики имеет баллистическая волна Тунгусского метеорита около средней точки активного участка траектории. Данный график показывает, что после продвижения опускающейся ударной волны приблизительно на 10 км результаты, рассчитанные по методике В. А. Бронштэна [2], начинают существенно отклоняться от двумерного численного решения с учетом силы тяжести. В то же время эти результаты качественно следуют некорректному двумерному решению без учета тяготения, нанесенному штриховой линией. Правило Сакса в этом случае дает лишь несколько завышенный перепад давления. Поднимающаяся ударную волну в рассмотренном диапазоне расстояний обе приближенные методики рассчитывают достаточно хорошо.

Таким образом, строгий анализ, проведенный на основе двумерного численного решения, позволяет сделать три важных вывода:

1) учет силы тяжести безусловно необходим при расчете ударных волн в неоднородной атмосфере на достаточно большом расстоянии от центра взрыва;

2) приближенная методика [2], которая не отражает эффекта, обусловленного силой тяжести, и имеет неправильную асимптотику, при расчете ослабленной опускающейся ударной волны приводит к большим ошибкам, что влечет за собой весьма значительное завышение определяемой величины энергии Тунгусского метеорита;

3) простое эмпирическое правило Сакса является достаточно надежным во всем диапазоне условий, представляющих интерес для проблемы Тунгусского взрыва, и лишь несколько (максимально на 20%) завышает перепад давления на ударном фронте, что при расчетах может привести к некоторому занижению энергии этого явления.

Следовательно, настоящая оценка точности приближенной методики [2] и правила Сакса, строго сделанная теперь путем сопоставления их с корректным двумерным численным решением, находится в хорошем согласии с теоретическим выводом, полученным выше из рассмотрения рис. 1, и опровергает ошибочную оценку [1]. Заключение в [3], что величины  $E_0$  и  $E_1$ , рассчитанные нами [32] с применением правила Сакса, будто бы занижены на 1—2 порядка, явно неправильно, ибо тогда суммарная энергия, отвечающая вывалу леса, окажется в нереальном диапазоне 45—450 Мт, а полный тротиловый эквивалент Тунгусского явления должен быть гораздо выше этой величины. В работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3] также неверно утверждается, что в статье В. П. Коробейникова и др. [32] учитывается только чисто баллистическая волна и не учитывается абляционная. В действительности же энергия цилиндрической ударной волны, определенная этими авторами по наземным разрушениям путем решения обратной задачи (кстати, аналогичный подход используется и в работе В. А. Бронштэна и А. П. Бояркиной [3]), включает, естественно, обе эти составляющие.

Другим фактором, который требует учета и оценки влияния при проведении расчетов распространения ударной волны, является неизотермичность реальной земной атмосферы, в которой распределения давления и плотности уже не подчиняются простым экспоненциальным законам (1). Для стандартной реальной атмосферы Земли существуют таблицы (например, в [35]), описывающие изменение давления  $p$ , плотности  $\rho$ , ускорения силы тяжести  $g$  и других функций в зависимости от высоты  $z$  от уровня моря. Непосредственное использование этих таблиц при проведении расчетов на ЭВМ технически неудобно, поэтому интересующие функции обычно представляют какими-либо аппроксимационными формулами.

Известные нам аппроксимации стандартной атмосферы [35] довольно сложны и дают погрешность около 5%. Нами были построены очень простые аппроксимации для атмосферных давления  $p$  (кГ/м<sup>2</sup>), плотности  $\rho$  (кГ·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>) и ускорения силы тяжести  $g$  (м/с<sup>2</sup>), имеющие такой общий вид:

$$f = a + b\zeta + c\zeta^2 + d\zeta^3,$$

где  $f = \lg p$ ,  $\lg \rho$  или  $g$ ;  $\zeta = (z - z_0)/(z_1 - z_0)$ ;  $z_0$  и  $z_1$  — начальная и конечная точки интервала высот, для которого применима эта формула.

Для интересующих нас высот от 0 до 60 км для функций  $p$  и  $\rho$  брались 3 интервала:  $0 \leq z \leq 10$  км,  $10 \leq z \leq 30$  км,  $30 \leq z \leq 60$  км. Интерполяционные коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  для этих случаев приведены в табл. 2. Для слабо изменяющейся функции  $g$  был взят один интервал:  $0 \leq z \leq 60$  км, причем здесь  $a = 9,8060$ ,  $b = -0,1847$ ,  $c = 0,0026$ ,  $d = 0$ . Построенные аппроксимационные формулы приближают  $p$ ,  $\rho$ ,  $g$  с максимальной погрешностью менее 0,5%, средняя погрешность при этом существенно ниже.

С использованием этих формул были проведены двумерные численные расчеты взрыва сферического и цилиндрического зарядов в стандартной атмосфере. Условия взрыва были выбраны такими же, как в рассмотренных выше случаях взрыва в изотермиче-

Т а б л и ц а 2

Коэффициенты аппроксимаций для изменения давления  $p$  и плотности  $\rho$  по высоте в стандартной атмосфере Земли

| Интерполяционный коэффициент | $\lg p$            |                     |                     | $\lg \rho$         |                     |                     |
|------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|                              | $0 \leq z \leq 10$ | $10 \leq z \leq 30$ | $30 \leq z \leq 60$ | $0 \leq z \leq 10$ | $10 \leq z \leq 30$ | $30 \leq z \leq 60$ |
| $a$                          | 4,0142             | 3,4316              | 2,0817              | -0,9034            | -1,3750             | -2,7386             |
| $b$                          | -0,5156            | -1,3496             | -1,9532             | -0,4175            | -1,3057             | -2,0934             |
| $c$                          | -0,0543            | -0,0508             | 0,5295              | -0,0436            | -0,0465             | 0,4541              |
| $d$                          | -0,0127            | 0,0505              | -0,2672             | -0,0105            | -0,0115             | -0,0929             |

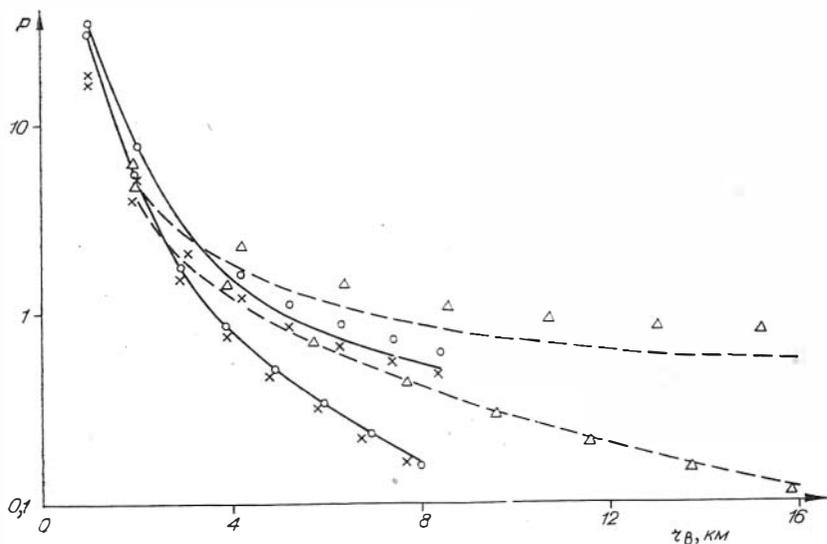


Рис. 7. Относительный перепад давлений на ударной волне при одинаковых взрывах в стандартной и экспоненциальной атмосферах.

ской атмосфере (см. рис. 5 и 6), что позволяет сравнить решения для обоих типов атмосферы. Численные результаты представлены на рис. 7, где показаны относительные перепады давления  $P$  на фронте в нижней и верхней точках ударной волны в зависимости от ее радиуса  $r_B$ . Здесь сплошные и штриховые линии отвечают соответственно сферическому и цилиндрическому взрывам в изотермической атмосфере, а кружками и треугольниками показаны аналогичные данные для стандартной атмосферы. Как видно, для волн, распространяющихся вниз к Земле, результаты расчетов для обоих типов атмосферы оказываются близкими. Для волн, идущих вверх, наблюдается заметная разница в двух рассматриваемых решениях, вызванная увеличением различия в атмосферных функциях с ростом высоты. При сравнении этих результатов следует иметь в виду, что изотермическая атмосфера может задаваться, вообще говоря, по-разному, поскольку в выражениях (1) для  $p$  и  $\rho$  постоянные параметры  $p_\infty$  и  $\rho_\infty$  можно выбирать соответственно по значениям на уровне моря или в центре взрыва, или в любой другой опорной точке атмосферы (от этой точки проводится отсчет высот  $z$ ); этот выбор определит также характерную высоту  $H_*$ . Таким образом, величины  $p$  и  $\rho$  в стандартной и изотермической атмосферах будут совпадать только в одной этой опорной точке, а затем с изменением высоты будут расходиться.

В наших расчетах выбиралась такая изотермическая атмосфера, для которой параметры у Земли совпадали с параметрами стандартной атмосферы, что наиболее оправдано с точки зрения реше-

ния обратной задачи для Тунгусского метеорита. (Для большей строгости можно принять во внимание среднюю высоту рельефа в месте катастрофы). Однако при таком выборе может оказаться, что в центре взрыва параметры обеих атмосфер будут заметно отличаться, особенно при больших высотах взрыва. Вследствие этого при расчетах взрывов в стандартной и изотермической атмосферах на начальном участке при малых расстояниях  $r_v$  может быть ощутимая разница в результатах, что и наблюдается на рис. 7 в цилиндрическом случае, когда высота взрыва  $H_1 = 13$  км значительна. Если изотермическую атмосферу выбрать с опорной точкой в центре взрыва, то влияние неизотермичности атмосферы можно будет проследить в более наглядном и «чистом» виде.

Весьма существенным фактором при расчете ударных волн и определении энергии Тунгусского взрыва, при котором происходило сильное нагревание окружающей среды, может стать учет реальных термодинамических свойств воздуха при высоких температурах. До сих пор на это обстоятельство не обращалось должного внимания и все исследования распространения ударных волн Тунгусского метеорита проводились лишь в рамках модели совершенного газа с показателем адиабаты  $\gamma = 1,4$ .

Как показывают расчеты Г. Броуда [4], учет реальных термодинамических свойств воздуха при высоких температурах и давлениях может в широком интервале избыточных давлений снизить эффективность точечного взрыва до 50%. Тогда для получения такой же интенсивности ударной волны, как в совершенном газе, в случае реального воздуха потребуется соответствующее увеличение энергии источника взрыва. Это связано с тем, что при высоких температурах значительная часть энергии затрачивается на диссоциацию и ионизацию воздуха. Поскольку температура в центральной части возмущенной области спадает с течением времени довольно медленно, энергия, затраченная на указанные процессы, будет переходить обратно в ударную волну постепенно на поздней стадии ее движения. Из сказанного ясно, что при определении параметров Тунгусского метеорита по наземным разрушениям необходимо учитывать высокотемпературные эффекты при взрыве.

При расчетах движения ударных волн при высоких температурах должно использоваться термодинамическое описание состояния среды, отражающее ее реальные свойства. В этом случае обычно уравнения состояния представляются в виде тех или иных аналитических выражений, аппроксимирующих имеющиеся таблицы термодинамических функций воздуха. В литературе известен ряд таких аппроксимаций, пригодных для широкого диапазона изменения параметров. Например, для калорического и термического уравнений состояния воздуха даны аппроксимирующие выражения, которые имеют максимальную погрешность не более 10% во всем диапазоне изменения плотности и давления, представляющем интерес при воздушных взрывах [28].

Применительно к Тунгусской проблеме нами были проведены расчеты взрыва зарядов в изотермической атмосфере с учетом изменения термодинамических свойств воздуха при высокой температуре, при этом использовались аппроксимации из работы [28]. На приведенном выше рис. 7 крестиками нанесены соответствующие численные результаты для случая взрыва сферического заряда с энергией  $E_0 = 10^{23}$  эрг на высоте  $H_0 = 8$  км в реальном воздухе. Как видно, во всем рассмотренном интервале расстояний как для нижней, так и для верхней части ударной волны избыточное давление на фронте оказывается меньше, чем в случае совершенного газа (сплошная линия). Это снижение избыточного давления максимально на начальном участке из-за имеющихся здесь высоких температур и при  $r_b \approx 1$  км составляет около 75%, а затем с падением температуры постепенно уменьшается до 10% на уровне Земли. Надо также иметь в виду, что на начальной стадии взрыва протекание физико-химических превращений вызывает сильное снижение температуры по сравнению со случаем взрыва в совершенном газе. Из этих расчетов следует, что учет реальных высокотемпературных свойств воздуха при решении обратной задачи о Тунгусском метеорите может привести к увеличению оценки энергии взрывной волны до 30%. Более точный ответ на этот вопрос можно будет получить после проведения детальных расчетов.

При полете и разрушении метеоритов могут играть существенную роль эффекты излучения. При движении тел со скоростью более 10 км/с в плотной атмосфере воздух в ударном слое вблизи тела нагревается до температур выше 10 000°К и начинает светиться, излучая энергию в окружающее пространство. Тепловые потоки на поверхности тела также в сильной степени зависят от процесса радиации (см., например, [15]). При быстром распаде метеорита в нижних слоях атмосферы (взрывная стадия), который сопровождается образованием мощной ударной волны, обеспечивающей нагрев воздуха до высоких температур, радиационный перенос энергии также может являться важным фактором.

При Тунгусском явлении эффекты излучения, несомненно, вносили серьезный вклад в общий энергетический баланс. Об этом говорят соответствующие данные наблюдений [22], которые вкратце напомним. При полете Тунгусского метеорита имело место сильное свечение, яркость которого превосходила солнечную; значит, температура в головной части баллистической волны составляла 6 000—10 000 К. Очевидцы в пос. Ванавара ощущали значительное тепловое воздействие, которое по оценкам [22] соответствовало тепловому импульсу 0,1—3 кал/см<sup>2</sup>. В зоне вываленного леса выявлена область первичного радиационного ожога [5, 6], которая вытянута вдоль траектории и имеет центр, смещенный относительно эпицентра вывала леса. Ряд оценок [19, 22, 29] показывает, что суммарный тепловой импульс от излучения, необходимый для ожога деревьев, составляет 10—15 кал/см<sup>2</sup> при продолжительности действия 1,5—2 с.

Вопросы о влиянии излучения на движение и разрушение метеоритов и об их светимости в зависимости от условий полета изучены довольно слабо. До последнего времени на основе имеющейся информации о Тунгусском явлении были указаны лишь очень приблизительные общие оценки энергии излучения, которая могла составлять 10—15% от всей энергии. В этой связи представляет интерес получение более достоверных оценок энергии радиации по результатам модельных газодинамических расчетов взрыва.

В качестве первого шага в этом направлении недавно было проведено численное решение задачи о взрывоподобном расширении объема сильно нагретого газа при наличии излучения. В свете проблемы Тунгусского метеорита рассматривались случаи сферического и цилиндрического объемов с энергиями, величины которых были определены в работах [18, 33]. Эта задача была решена с помощью численного метода (конкретные вычисления на ЭВМ проводил Б. В. Путятин). Перенос излучения здесь учитывался в рамках дифференциального приближения Милна — Эдингтона для серого тела.

Представим сначала результаты расчетов для сферического случая. Здесь рассматривался шар радиусом  $R = 200$  м, наполненный нагретым сжатым газом с температурой  $T_0 = 18\,000$  К, давлением  $p_0 = 569$  кг/см<sup>2</sup> и плотностью  $\rho_0 = 0,005$  г/см<sup>3</sup>, что отвечает энергии  $E_0 = 10^{23}$  эрг. Принималось, что взрывоподобный разлет этого объема происходит в окружающий воздух с постоянными давлением и плотностью, равными их значениям в земной атмосфере на высоте  $H_0 = 6,5$  км.

Для данного случая на рис. 8 показано, как по времени  $t$  изменяются интегральный по объему поток излучения  $q_{0R}$  и полная энергия  $E_{0R}$ , излученная из зоны ударной волны и получающаяся интегрированием зависимости  $q_{0R} = q_{0R}(t)$ . Видно, что радиационный поток сначала быстро увеличивается, а затем с ростом времени падает почти по линейному закону. К моменту  $t = 1,1$  с, когда ударная волна прошла расстояние около 1900 м, максимальная температура упала до 4500 К, величина излученной энергии составила около 3,5% от начальной энергии газа.

Дальнейшее приращение величины  $E_{0R}$  будет незначительно и относительная доля световой энергии может возрасти до 4,5%. Заметим, что, увеличивая начальную температуру, а значит, меняя и плотность при сох-

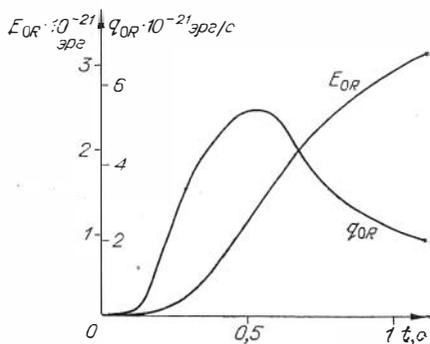


Рис. 8. Интегральный по объему поток излучения  $q_{0R}$  и полная энергия излучения  $E_{0R}$  в сферическом случае.

Рис. 9. Удельный поток излучения  $q_{1R}$  и удельная энергия излучения  $E_{1R}$  в цилиндрическом случае.

ранении начальной энергии газа  $E_0$ , можно добиться усиления эффекта высвечивания.

Во втором случае рассматривался бесконечно длинный цилиндр, который имел начальный радиус  $R = 100$  м и разлетался

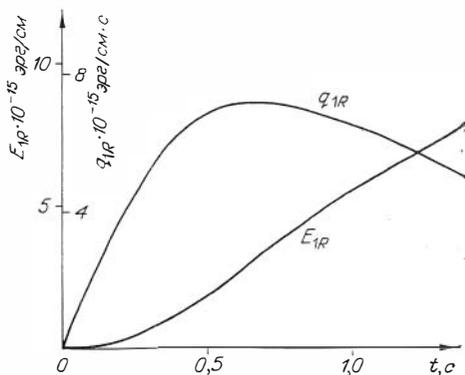
в пространство с параметрами  $p$  и  $\rho$ , отвечающими высоте  $H_1 = 6,5$  км в земной атмосфере. Начальные значения параметров газа внутри цилиндрического объема выбирались из условия, что удельная энергия газа составляет  $1,4 \cdot 10^{17}$  эрг/см, и были таковы:  $T_0 = 12\,600$  К,  $p_0 = 74$  кг/см<sup>2</sup>,  $\rho_0 = 0,001$  г/см<sup>3</sup>.

Численные результаты для этого случая представлены на рис. 9, где в зависимости от времени  $t$  дается изменение удельного потока излучения  $q_{1R}$  и удельной энергии излучения  $E_{1R}$ . Расчеты здесь были доведены до  $t \approx 1,5$  с, когда ударная волна распространилась на расстояние около 1650 м, а максимальная температура за ней понизилась до 4000 К. В этот момент времени излучением было перенесено 6% от начальной энергии разлетающегося газового цилиндра. В дальнейшем развитие процесса радиации замедляется, однако в конце его относительная доля световой энергии может достигнуть 10%.

Полученное численное решение газодинамической задачи о взрыве с учетом излучения позволило более надежно оценить вклад, вносимый этим физическим фактором в общее энерговыделение в условиях, которые могут иметь место в Тунгусском явлении.

Опыт проведенных расчетов подтверждает возможность и желательность включения эффектов излучения во взрывную модель, разработанную для исследования Тунгусского явления.

Обсудим теперь вопрос о характере изменения энергии баллистической волны вдоль траектории крупного космического тела. Летящее тело испытывает действие силы сопротивления (которая, производя работу над окружающим воздухом, вносит в него энергию) и подвергается абляции и разрушению. Проведение траекторных расчетов со строгим учетом указанных факторов осложнено особенно (как, например, в случае Тунгусского метеорита), когда ни физические свойства космического тела, ни протекающие в нем процессы достоверно не известны. Конечно, исследования в этом направлении представляют большой интерес, и здесь следует отметить последние работы С. С. Григоряна [8], Г. И. Петрова



и В. П. Стулова [21], в которых предложены теоретические схемы распада Тунгусского метеорита.

Полезную информацию об энерговыделении при полете тела могут дать даже простые модельные траекторные расчеты. Нами были проведены систематические расчеты квазистационарного движения сферических тел в стандартной атмосфере Земли. Здесь варьировались такие параметры, как скорость, высота и угол входа тела в плотную атмосферу, а также радиус и масса тела. Абляция и унос массы при этом не учитывались, т. е. тело в полете сохраняло свою форму и размеры.

Цель этих расчетов состояла в том, чтобы выяснить, как вдоль траектории может изменяться вносимая телом удельная энергия, которая определяется известной формулой

$$E_1 = \frac{1}{2} c_x \rho V^2 S, \quad (2)$$

где  $c_x$  — коэффициент сопротивления;  $V$  — скорость;  $S$  — площадь миделевого сечения тела;  $\rho$  — плотность воздуха в данной точке атмосферы. В траекторных расчетах главную роль играет баллистический параметр  $B = m/c_x S$  ( $m$  — масса тела). Для сферы постоянной массы и размера баллистический параметр остается неизменным вдоль траектории и может быть выражен через радиус тела  $R_T$  и его плотность  $\rho_T$  формулой

$$B = 1,515 \rho_T R_T. \quad (3)$$

В предположении, что удельная энергия баллистической волны  $E_1$  в рассматриваемой конечной точке траектории с высотой  $H_0$  задана (скажем, она известна из решения обратной задачи), рассчитывалось при разных значениях баллистического параметра  $B$  семейство траекторий, обеспечивающих в этой конечной точке заданную величину  $E_1$ . Результаты расчетов, показывающие типичные зависимости удельной энергии баллистической волны  $E_1$  от высоты полета  $H$ , представлены на рис. 10. Здесь рассмотрен случай, когда в конечной точке траектории  $H_0 = 7$  км,  $E_1 = 1,4 \cdot 10^{17}$  эрг/см, а угол наклона  $\alpha = 40^\circ$ , что отвечает параметрам, полученным в решении авторами для Тунгусского метеорита. Как видно, при больших значениях баллистического параметра  $B$  (т. е. при больших радиусах или больших плотностях тела) удельная энергия  $E_1$  непрерывно увеличивается при полете тела к Земле. В случае же малых значений  $B$  имеет место иное поведение зависимостей  $E_1 = E_1(H)$ , у которых появляется максимум на малых высотах и спад при дальнейшем уменьшении  $H$ . Значит, возможны случаи, когда на конечном участке траектории среднее распределение удельной энергии баллистической волны оказывается почти постоянным.

Если принять некоторую величину плотности тела  $\rho_T$ , то, согласно (3), каждому значению баллистического параметра  $B$  должен соответствовать радиус тела  $R_T$ . При  $\rho_T = 0,1$  г/см<sup>3</sup>, напри-

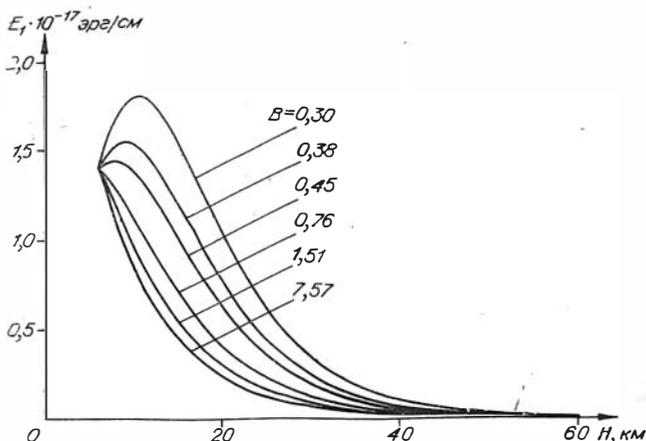


Рис. 10. Удельная энергия баллистической волны  $E_1$  в зависимости от высоты полета  $H$  для сферических тел при разных баллистических параметрах  $B$  (кг/см<sup>2</sup>).

мер, значению  $B=0,30$  кг/см<sup>2</sup> для верхней кривой на рис. 10 будет отвечать  $R_T = 20$  м, а  $B = 7,57$  кг/см<sup>2</sup> для нижней кривой —  $R_T = 500$  м. Заметим также, что при известной  $\rho_T$  в конечной точке траектории можно очевидным путем приближенно оценить другие параметры тела — массу и скорость. Для этого надо использовать равенство (2) и предположение, что полная кинетическая энергия в этой точке равняется энергии взрыва  $E_0$ , определенной по решению обратной задачи.

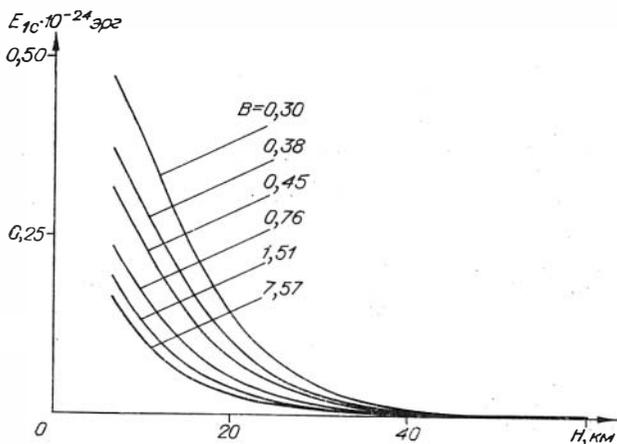


Рис. 11. Суммарная энергия  $E_{1с}$ , вносимая летящим сферическим телом в зависимости от высоты полета  $H$  при разных баллистических параметрах  $B$  (кг/см<sup>2</sup>).

Интегрируя зависимости  $E_1 = E_1(H)$  на участке от точки входа в плотную атмосферу до конечной точки траектории, можно вычислить суммарную величину энергии  $E_{1c}$ , внесенную летящим телом в окружающую среду. На рис. 11 построены соответствующие кривые, полученные по зависимостям, приведенным на рис. 10. Как видно, тело большого размера при полете с гиперзвуковой скоростью вносит в плотные слои атмосферы значительное количество энергии. Даже в диапазоне высот от 60 до 30 км, где воздух еще довольно разреженный, этот вклад может составлять 0,5—1 Мт.

Проводились также отдельные пробные расчеты траекторий с учетом абляции тела, при этом баллистический параметр брался по экспериментальным данным. Естественно, что абляция приводит к дополнительному увеличению удельной энергии  $E_1$  вдоль траектории. Однако качественный вид зависимостей  $E_1 = E_1(H)$  остается здесь таким же, как при полете тела с неизменными массой и размерами.

В целом проведенное в данной работе исследование ряда газодинамических эффектов при распространении ударных волн, сопровождающих полет и взрыв крупного космического тела, показывает возможные пути дальнейшего уточнения траекторных и энергетических параметров Тунгусского метеорита в ходе решения обратной задачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болркина А. П., Бронштэн В. А. Об энергии взрыва Тунгусского метеорита и учете неоднородности атмосферы.— *Астроном. вестн.*, 1975, т. 9, № 3, с. 172—177.
2. Бронштэн В. А. Распространение сферических и цилиндрических взрывных волн в неоднородной атмосфере с учетом противодействия.— *Ж. прикл. механ. и техн. физики*, 1972, № 3, с. 84—90.
3. Бронштэн В. А., Болркина А. П. Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита.— В кн.: *Проблемы метеоритики*. Новосибирск, Наука, 1975, с. 47—63.
4. Бруд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов. М., Мир, 1976. 272 с.
5. Васильев Н. В., Львов Ю. А. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— *Природа*, 1974, № 3, с. 99—101.
6. Воробьев В. А., Ильин А. Г., Шкута Б. Л. Изучение термических пораженных веток лиственниц, переживших Тунгусскую катастрофу.— В кн.: *Проблема Тунгусского метеорита*. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 110—117.
7. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной.— *Ж. вычисл. матем. и матем. физики*. 1961, т. 1, № 6, с. 1020—1050.
8. Григорян С. С. К вопросу о природе Тунгусского метеорита.— *Докл. АН СССР*, 1976, т. 231, № 1, с. 57—60.
9. Зоткин И. Т. Траектория и орбита Тунгусского метеорита.— В кн.: *Метеоритика*. Вып. 27. М., Наука, 1966, с. 109—118.
10. Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М., Наука, 1974. 256 с.
11. Коробейников В. П., Куликовский А. Г., Путятин Б. В. Взрыв цилиндрического заряда в газах.— В кн.: *Всесоюзный симпозиум по методам*

- аэрофизических исследований, 26—29 апреля 1976 г., Новосибирск. Тезисы докладов. Новосибирск, 1976, с. 182.
12. **Коробейников В. П., Марков В. В., Путятин Б. В.** О распространении цилиндрических взрывных волн с учетом излучения и магнитного поля.— Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1977, № 4, с. 133—138.
  13. **Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.** О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 73—89.
  14. **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, № 5, с. 94—100.
  15. **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.
  16. **Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.** Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: IV Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике, 21—28 мая 1976 г., Киев. Киев, Наукова думка, 1976, с. 62—63.
  17. **Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.** Об учете неоднородности атмосферы при расчете взрыва Тунгусского метеорита.— Ж. вычисл. матем. и матем. физики, 1976, т. 17, № 3, с. 737—752.
  18. **Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В.** О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 54—65.
  19. **Курбатский Н. П.** О возникновении лесного пожара в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 69—71.
  20. **Пасечник И. П.** Предварительная оценка параметров взрыва Тунгусского метеорита 1908 года по сейсмическим и барографическим данным.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 24—54.
  21. **Петров Г. И., Стулов В. П.** Движение больших тел в атмосферах планет.— Космич. исследования, 1975, т. 13, № 4, с. 587—594.
  22. **Проблема Тунгусского метеорита.** Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967. 238 с.
  23. **Фаст В. Г.** Статистический анализ параметров Тунгусского вывала.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40—61.
  24. **Фаст В. Г.** Вывал леса, произведенный Тунгусским метеоритом.— В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971, с. 41—42.
  25. **Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А.** О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.
  26. **Шуршалов Л. В.** О расчете ударных волн, распространяющихся в неоднородной атмосфере.— Докл. АН СССР, 1976, т. 230, № 4, с. 803—806.
  27. **Ben-Menahem A.** Source parameters of the Siberian explosion of June 30, 1908, from analysis and synthesis of seismic signals at four stations.— Phys. Earth and of the Planet. Interiors, 1975, v. 11, p. 1—35.
  28. **Brode H. L.** Blast wave from a spherical charge.— Phys. of Fluids, 1959, v. 2, N 2, p. 217—229.
  29. **Glasstone S.** (ed.). The effects of nuclear weapons. U. S. Atomic Commission, Washington, 1964. 730 p.
  30. **Hunt J. N., Palmer R., Penney W.** Atmospheric waves caused by large explosions.— Phil. Transac. Roy. Soc. London. Ser. A, 1960, v. 252, N 1011, p. 275—315.
  31. **Koroheinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.** Gas dynamics of flight and explosion of meteorite bodies in the Earth's atmosphere.— Fluid Dynamics Transactions, 1971, v. 6, pt. II, p. 351—360.
  32. **Koroheinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.** Gas dynamics of the

- flight and explosion of meteorites. — *Astronautica Acta*, 1972, v. 17, N 4/5, p. 339—348.
33. **Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.** Mathematical model and computation of the Tunguska meteorite explosion. — *Acta Astronautica*, 1976, v. 3, N 7/8, p. 615—622.
34. **Lutzky M., Lehto D. L.** Shock propagation in spherically symmetric exponential atmospheres. — *Phys. of Fluids*, 1968, v. 11, N 7, p. 1466—1472.
35. **U. S. Standard Atmosphere.** U. S. Government Printed Office, Washington, D. C., 1962.

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ МЕТЕОРИТИКИ

*А. П. БОЯРКИНА, В. А. БРОНШТЭН, А. К. СТАНЮКОВИЧ*

При входе метеорита с космической скоростью в плотные слои атмосферы формируется сильная ударная волна, которая распространяется на большие расстояния от траектории метеорита и при определенных условиях достигает поверхности Земли. Процесс движения метеорита может сопровождаться взрывоподобным выделением энергии, что приводит к формированию ударных волн квазисферического взрыва, которые также могут достигать Земли.

Описанию стадий образования и распространения таких волн посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (обзор основных публикаций по этому вопросу дан в работах В. А. Бронштэна [3, 4]). Обычно рассматриваются более общие задачи, не предопределяющие причины возникновения ударных волн. В значительно меньшей степени исследована стадия взаимодействия волн с земной поверхностью. Возникающие при взаимодействии отраженные волны характеризуются параметрами, отличными от соответствующих параметров падающей волны, вследствие чего расчет области разрушений, вызванных ударными волнами, не может проводиться без учета стадии отражения.

Наиболее остро этот вопрос встал перед исследователями Тунгусского падения 1908 г., сопровождавшегося, как известно, грандиозным вывалом тайги под действием ударных волн, порожденных метеоритом. Натурное изучение области разрушений позволило выявить ее конфигурацию и определить линии тока распространяющейся вдоль поверхности результирующей ударной волны [26]. Таким образом, появилась возможность решения обратной задачи: выяснение геометрии и параметров падающей волны, траектории метеорита и величины энерговыделения на различных участках траектории. Для этого первостепенную важность приобретает знание режимов отражения ударной волны в зависимости от ее начальных параметров.

Один из наиболее простых режимов — регулярное отражение — применительно к метеоритным падениям рассмотрен в 1956 г. К. П. Станюковичем [24]. Он привел зависимости, характеризующие течение за отраженной волной при произвольном угле падения (но не выше критического) и произвольной интенсивности падающей волны. Кроме этого, был рассмотрен случай скользящего падения при распространении полусферической волны от кратерообразующего метеорита. Режим регулярного отражения для частного случая малых углов падения рассматривал также М. А. Цикулин [30]. Е. В. Маслов [18] при оценке высоты и величины энерговыделения для сферической модели Тунгусского взрыва приближенно учитывал процесс отражения волны в двух вариантах: в акустическом приближении, когда избыточное давление отраженной волны вдвое больше избыточного давления падающей волны, и с использованием экспериментальных кривых коэффициента отражения, полученных в США по данным ядерных испытаний. Физическая сторона вопроса автором не рассматривалась, вследствие чего в работе появилось утверждение, что в регулярном режиме осуществляется зеркальное отражение, тогда как это справедливо лишь для бесконечно слабой волны и в некоторых частных случаях. А. В. Золотов [12] в своей оценке тех же параметров для сферического и баллистического случаев также использовал данные по ядерным испытаниям США, однако неверное представление о геометрии взаимодействия баллистической волны с Землей привело к тому, что автор недооценил действие последней и сделал вывод о сферическом характере волны Тунгусского взрыва. В. А. Бронштэн [6] в аналогичной оценке параметров явления с учетом неоднородности атмосферы использовал акустическое приближение, но указал на острую необходимость подробного рассмотрения всех стадий отражения [4]. Цикл работ В. П. Коробейникова, П. И. Чушкина и Л. В. Шуршалова [15, 16 и др.], посвященный численному расчету различных вариантов зоны разрушений Тунгусского взрыва, в части, касающейся учета отражения, основан на экспериментальных данных Г. Л. Бруда [8]. Несмотря на то, что эти авторы не ставили задачей подробное рассмотрение физической стороны процесса отражения, корректное применение экспериментальных данных позволило им получить качественное соответствие расчетных картин и наблюдаемого вывала.

Тем не менее до последнего времени отсутствовали работы, в которых проводился бы детальный анализ всех режимов отражения, возникающих при метеоритных падениях. Это зачастую приводило к принципиальным ошибкам [12]. Достаточно упомянуть, что с 1966 по 1975 г. из публикации в публикации кочует ошибочная схема процесса отражения ударных волн при Тунгусском падении, по которой баллистическая волна, падающая на Землю под углом  $10-15^\circ$ , отражается в нерегулярном режиме [14, 19, 22, 30].

## СИСТЕМЫ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПОЛЕТЕ И ВЗРЫВЕ В АТМОСФЕРЕ КРУПНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Так же, как и любое другое тело, движущийся в земной атмосфере метеорит в случае, если его скорость превышает звуковую, порождает систему воздушных ударных волн. При скоростях входа 11—32 км/с метеорит, обладающий достаточно большой начальной массой, может достичь плотных слоев атмосферы и сохранить часть космической скорости. Ударные волны, возникающие при таком гиперзвуковом движении с числом Маха  $30 \div 100$ , достигают земной поверхности и могут не только быть зафиксированными приборами, но и произвести разрушения на местности. Хорошо известны катастрофические последствия при Тунгусском явлении в 1908 г., заключающиеся в грандиозном вывале тайги на площади свыше 2200 км<sup>2</sup> [26, 28]. Явления меньшего масштаба наблюдались в США и Канаде при падении метеоритов Ревелсток, Вилна и при пролете нескольких крупных болидов. Ударные волны в этих случаях достигали поверхности Земли и вызывали сильное сотрясение почвы. В слабой (инфразвуковой) стадии они фиксировались приборами на расстоянии до 1600 км от траектории [13]. При падении в 1947 г. в СССР Сихотэ-Алинского метеоритного дождя разбивались оконные стекла, осыпалась штукатурка, разрушилась кирпичная печь [10].

Рассмотрим возможные волновые картины при различных вариантах падения крупных метеоритов, достигающих нижних слоев атмосферы. На рис. 1 схематически изображены четыре таких случая.

Случай А. Чисто баллистическая волна. Ее интенсивность зависит от скорости полета метеорита и расстояния точки фронта волны от траектории [24]. Распространение баллистической волны при сверхзвуковом движении в атмосфере обычных тел рассматривалось многими авторами. О. В. Добровольский [11] показал, что унос массы с поверхности метеорита приводит к большей интенсивности баллистической волны по сравнению с неплавящимся и неиспаряющимся телом. М. А. Цикулин на основании закона плос-

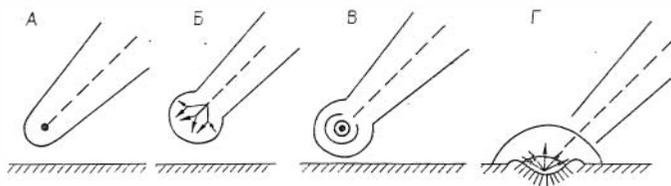


Рис. 1. Возможные волновые картины при движении в атмосфере крупных метеоритов и их соударении с земной поверхностью. Не показаны процессы отражения и взаимодействия волн между собой.

ких сечений (предполагается квазицилиндричность «метеоритных» волн) получил аналитические зависимости, характеризующие их распространение в атмосфере [30]. Расчеты квазицилиндрических «метеоритных» волн в неоднородной атмосфере были выполнены В. А. Бронштэном [5—7] и В. П. Коробейниковым и др. [15, 16].

**Случай Б.** Предложен в 1966 г. Г. И. Покровским [20]. Баллистическая волна претерпевает трансформацию за счет прогрессивного дробления метеоритного тела, что приводит к ее усилению на конечном участке траектории. Этот режим экспериментально моделировался М. А. Цикулиным [30] при помощи двух отрезков детонирующего шнура с различной удельной энергией. В. П. Коробейников и др. [15] получили теоретическую модель этой волновой картины, рассмотрев взрыв полубесконечного цилиндрического заряда с переменной по длине удельной энергией.

**Случай В.** Является предельным режимом предыдущего. При этом предполагается, что выделение энергии на конечном участке траектории происходит мгновенно, что приводит к формированию ударной волны сферического взрыва. Этот случай также рассматривался в упомянутых работах В. А. Бронштэна и В. П. Коробейникова. Практически все существующие численные расчеты Тунгусского взрыва основаны на комбинации этой модели с моделью баллистической волны.

**Случай Г.** Полусферическая воздушная ударная волна, возникающая при взрыве метеорита на поверхности Земли с образованием метеоритного кратера. Этот вариант впервые рассматривался К. П. Станюковичем [24]. В настоящее время существует тенденция распространять на этот случай зависимости, известные для химических и ядерных взрывов на поверхности Земли, путем введения эффективного тротилового эквивалента соударения [2]. При этом предполагается, что действием баллистической волны можно пренебречь, как имеющей значительно меньшую интенсивность.

При анализе разрушений, которые производит ударная волна, нельзя ограничиться рассмотрением только параметров самой волны. При контакте фронта волны с поверхностью Земли происходит процесс отражения, характеризующийся возникновением новых ударных волн. При этом разрушающие параметры определяются газодинамическими величинами за фронтом отраженной волны. Дальнейший анализ основан на двух основных допущениях. Во-первых, будем считать, что в каждой точке зоны разрушений волна является плоской. Это вполне справедливо при больших масштабах явления. Во-вторых, считаем профиль падающей волны прямоугольным. Несмотря на то, что в действительности взрывные волны являются нестационарными, на начальной стадии отражения мы получим качественно правильные результаты.

Обозначим давление за фронтом отраженной волны  $p_2$ . Учтывая, что во всех режимах отражения за фронтом отраженной волны формируется поток ударно-нагретого газа, движущийся па-

параллельно земной поверхности со скоростью  $v_2$ , определим разрушающие параметры волны как  $\Delta p_2 = p_2 - p_0$ ,  $q_2 = \rho_2 v_2^2 / 2$ , где  $\Delta p$  — избыточное давление,  $q_2$  — скоростной напор. На объект, находящийся в потоке за фронтом отраженной волны, действует аэродинамическая сила

$$Q = C_x S \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \cong \gamma_l C_x S p_2 \frac{M_2^2}{2}, \quad (1)$$

где  $C_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления тела;  $S$  — площадь мишени тела;  $\rho_2$ ,  $p_2$ ,  $M_2$  — плотность, давление и число Маха за отраженной волной;  $\gamma_l$  — эффективное отношение удельных теплоемкостей газа.

В воздухе для слабых волн  $\gamma_l = 1,4$ . При достаточно сильных волнах как за падающей, так и за отраженной волной возбуждаются внутренние степени свободы молекул газа и происходят физико-химические превращения. При этом  $\gamma_l$  уменьшается. В дальнейшем мы будем рассматривать только слабые волны с  $\gamma_l = \gamma = 1,4$ . Коэффициент аэродинамического сопротивления тела  $C_x$  зависит от его геометрии и числа Маха потока  $M_2$ . При увеличении  $M_2$  от 0 до 1  $C_x$  растет и имеет максимум при  $M_2 = 1$ , а при  $M_2 > 1$  величина  $C_x$  вновь уменьшается. Давление  $p_2$  в среде за отраженной волной в несколько раз превышает давление за падающей волной. Число  $M_2$  может быть больше или меньше соответствующего числа Маха потока за падающей волной, что зависит от ее параметров.

Для характеристики падающей волны удобно использовать число Маха волны  $M_0$ , т. е. отношение ее скорости  $D$  к скорости звука в невозмущенной среде  $c_0$ . При постоянном  $M_0$  в зависимости от угла падения волны  $\varphi_0$  возможны различные режимы отражения.

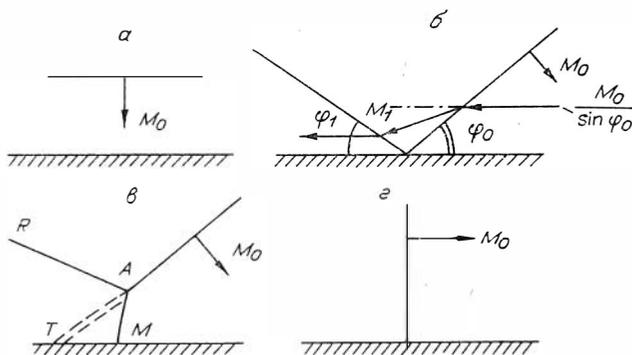


Рис. 2. Возможные режимы отражения ударной волны от твердой поверхности: нормальный (а), регулярный (б), нерегулярный (в), скользящий (г).

Вариант, показанный на рис. 2, а соответствует прямому отражению ударной волны при  $\varphi_0 = 0$ . Такое отражение при падении метеоритов осуществляется, например, в эпицентре воздушного взрыва. Горизонтальная составляющая скорости потока здесь отсутствует, т. е.  $v_2 = 0$ . Перепад давлений за отраженной волной при  $\gamma = \text{const}$  определяется по формуле

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma (M_0 - 1)}{(\gamma - 1) M_0^2 + 2}. \quad (2)$$

При  $\varphi_0 = 90^\circ$  (см. рис. 2, в) падающая волна скользит вдоль поверхности. Этот режим соответствует распространению полусферической волны поверхностного взрыва. Давление, плотность, температура, число Маха  $M_2$  и скоростной напор  $q_2$  определяются при  $\gamma = 1,4$  из соотношений для прямого скачка уплотнения

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{p_1}{p_0} = \frac{1}{6} (7M_0^2 - 1), \quad (3)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{6M_0^2}{5 + M_0^2}, \quad (4)$$

$$\frac{T_2}{T_0} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{(7M_0^2 - 1)(M_0^2 + 5)}{36M_0^2}, \quad (5)$$

$$M_2^2 = \frac{25(M_0^2 - 1)^2}{(7M_0^2 - 1)(M_0^2 + 5)}, \quad (6)$$

$$q_2 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} = 0,7 p_2 M_1^2. \quad (7)$$

Из (6) можно легко определить, что при  $M_0 = 2,068$   $M_2 = 1$ . т. е. коэффициент аэродинамического сопротивления максимален,

### РЕГУЛЯРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

При наклонном падении в зависимости от условий отражения возможны две конфигурации волн. Наиболее простым является регулярное отражение (см. рис. 2, б). Пусть ударная волна с числом Маха  $M_0$  падает на поверхность под углом  $\varphi_0$ . В подвижной системе координат газ втекает в волну с числом Маха  $M_0/\sin \varphi_0$ , при переходе через нее отклоняется на угол  $\Theta_1$  и приобретает число Маха  $M_1$ . Если  $\gamma = 1,4$ , то

$$\text{tg } \Theta_1 = \text{ctg } \varphi_0 \frac{M_0^2 - 1}{1,2M_0^2/\sin \varphi_0 - (M_0^2 - 1)}, \quad (8)$$

$$M_1^2 = \frac{M_0^2}{\sin^2 \varphi_0} \left( \frac{1}{7M_0^2 - 1} + \frac{5}{5 + M_0^2} \right) + \left( \frac{5}{7M_0^2 - 1} - \frac{5M_0^2}{5 + M_0^2} \right). \quad (9)$$

После перехода через отраженную волну поток снова течет параллельно стенке, т. е. поворачивается в противоположную сторону на угол  $\Theta_1$ , причем

$$\operatorname{tg} \Theta_1 = \operatorname{ctg} (\Theta_1 + \varphi_2) \frac{\sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2) - \frac{1}{M_1^2}}{1,2 - \left[ \sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2) - \frac{1}{M_1^2} \right]}. \quad (10)$$

Уравнения (8) — (10) полностью определяют конфигурацию волн при регулярном отражении. После того, как по формулам (8) и (9) определены  $\Theta_1$  и  $M_1$ , методом подбора или графически решается уравнение (10), из которого находится угол отражения  $\varphi_2$ , причем из двух возможных решений выбирается соответствующее более слабой волне [2]. Параметры потока за отраженной волной определяются по формулам

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{7}{6} M_1^2 \sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2) - \frac{1}{6}, \quad (11)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{6M_1^2 \sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2)}{5 + M_1^2 \sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2)}, \quad (12)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (13)$$

$$\left( \frac{u_2}{u_1} \right)^2 = \cos^2 (\Theta_1 + \varphi_2) + \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 \sin^2 (\Theta_1 + \varphi_2), \quad (14)$$

$$\left( \frac{u_1}{u_0} \right)^2 = \cos^2 \varphi_0 + \left( \frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^2 \sin^2 \varphi_0. \quad (15)$$

Здесь  $u$  — скорость потока в подвижной системе координат. Параметры за падающей волной рассчитываются по формулам (3) — (5). Относительно объекта на поверхности скорость потока  $v_2$  и число Маха  $M_2$  будут:

$$v_2 = \frac{D}{\sin \varphi_0} - u_2, \quad (16)$$

$$M_2 = \frac{v_2}{c_2}, \quad (17)$$

где  $c_2^2 = \gamma p_2 / \rho_2$ .

Анализ зависимостей, определяющих регулярное отражение ударных волн, показывает, что такой режим имеет место не при любом значении угла падения волны  $\varphi_0$ .

При регулярном отражении поток газа, втекающего в падающую волну, при переходе через нее поворачивается на угол  $\Theta_1$  и приобретает число Маха  $M_1 < M_0 / \sin \varphi_0$ . При переходе через отраженную волну он поворачивается снова на угол  $\Theta_1$  и начинает течь параллельно стенке со скоростью  $u_2$ .

**Предельные углы перехода от регулярного к маховскому отражению**

| $M_0$ | $P_1/P_0$ | $\Phi_0$ пр | $\Phi_2$ пр | $M_0$ | $P_1/P_0$ | $\Phi_0$ пр | $\Phi_2$ пр. |
|-------|-----------|-------------|-------------|-------|-----------|-------------|--------------|
| 1,000 | 1,000     | 90,00       | 90,00       | 1,617 | 2,884     | 40,30       | 46,05        |
| 1,030 | 1,070     | 74,50       | 80,00       | 1,680 | 3,126     | 40,25       | 45,10        |
| 1,051 | 1,121     | 61,10       | 73,20       | 1,732 | 3,333     | 39,90       | 44,20        |
| 1,076 | 1,185     | 55,90       | 67,30       | 1,790 | 3,573     | 39,75       | 43,40        |
| 1,105 | 1,257     | 52,10       | 64,00       | 1,852 | 3,837     | 39,70       | 42,65        |
| 1,141 | 1,353     | 49,55       | 60,85       | 1,916 | 4,118     | 39,70       | 42,10        |
| 1,181 | 1,459     | 47,55       | 58,45       | 1,972 | 4,370     | 39,50       | 41,45        |
| 1,219 | 1,566     | 45,80       | 56,60       | 2,031 | 4,647     | 39,40       | 41,00        |
| 1,262 | 1,690     | 44,50       | 54,95       | 2,092 | 4,941     | 39,35       | 40,45        |
| 1,309 | 1,833     | 43,55       | 53,30       | 2,151 | 5,232     | 39,25       | 39,95        |
| 1,354 | 1,972     | 42,60       | 51,60       | 2,212 | 5,542     | 39,20       | 39,40        |
| 1,405 | 2,137     | 42,00       | 50,45       | 2,275 | 5,873     | 39,20       | 39,05        |
| 1,455 | 2,303     | 41,40       | 49,25       | 2,397 | 6,534     | 39,10       | 38,30        |
| 1,510 | 2,495     | 41,05       | 48,00       | 2,460 | 6,892     | 39,10       | 37,90        |
| 1,562 | 2,679     | 40,60       | 47,00       | 2,523 | 7,258     | 39,10       | 37,55        |

Однако существует строго определенный угол  $\Theta_{1\text{ пр}}(M_1)$ , на который может повернуться поток, прошедший через косую ударную волну. Таким образом, если угол  $\Theta_1 > \Theta_{1\text{ пр}}$ , то после перехода через отраженную волну газ уже не может течь параллельно стенке и набегают на нее под некоторым углом. При фиксированном  $M_0$  величина угла  $\Theta_{1\text{ пр}}$  однозначно определяется значением  $\Phi_0$ , и регулярное отражение ударной волны от поверхности возможно лишь при углах падения  $\Phi_0 \leq \Phi_{0\text{ пр}}$ . В таблице приводятся рассчитанные значения предельного угла  $\Phi_{0\text{ пр}}$  и соответствующего угла отражения  $\Phi_{2\text{ пр}}$  для чисел Маха падающей волны от 1 до 2,523 при  $\gamma = 1,4$ . Для волн большей интенсивности зависимость  $\Phi_{0\text{ пр}} = f(M_0)$  приведена в виде графика [2 и др.] и в виде таблиц [1].

**НЕРЕГУЛЯРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН**

Итак, мы выяснили, что при закритических углах падения волны на поверхность поток газа после перехода через отраженную волну начинает набегать на поверхность под некоторым углом. Наличие в этом случае нормальной к стенке составляющей скорости потока за отраженной волной приводит к тому, что точка контакта падающей и отраженной волн отходит от стенки (см. рис. 2, в). Из этой точки (называемой теперь тройной точкой) на стенку опускается третья, в общем случае криволинейная удар-

ная волна, так называемая волна Маха. Возникновение тройной конфигурации обуславливает появление двух газодинамических областей, в одной из которых находится газ, прошедший последовательно падающую и отраженную волны, а в другой — газ, прошедший через фронт волны Маха. Между этими областями находится зона контактного разрыва. Нормальная к стенке компонента скорости любой частицы газа как в первой, так и во второй области в системе координат, связанной со стенкой, изменяется от значения за фронтом соответствующей ударной волны до нуля на стенке. Вследствие этого волна Маха в точке контакта с поверхностью нормальна к ней. Контактный разрыв прямолинеен в окрестностях тройной точки; в более удаленных от нее областях начинают проявляться явления его неустойчивости с возникновением вихревых течений. Описанная картина отражения называется нерегулярным, или маховским, отражением.

Для маховского отражения даже в идеальном газе до сих пор отсутствуют строгие решения, позволяющие рассчитывать все сложное поле течения и дающие хорошее согласие с экспериментом во всем диапазоне интенсивностей падающих волн. Это связано, в частности, с криволинейностью волн и вихревым характером течения.

Методы численных решений точных нелинейных уравнений только начали развиваться [21]. Аналитические решения возможны в приближенной линейной постановке [17].

Большинство ранних экспериментальных исследований маховского отражения относилось к ударным волнам с  $M_0 < (3 \div 4)$ . Они позволили выявить следующие закономерности:

1. Тройная точка движется по прямой, наклоненной к отражающей плоскости на постоянный угол  $\chi$ .
2. Движение тройной конфигурации является автомодельным.
3. При фиксированной интенсивности падающей волны  $\chi$  возрастает с увеличением  $\Phi_0$ . При  $\Phi_0 = \Phi_{0 \text{ пр}}$ ,  $\chi = 0$ .

Выяснение этих особенностей позволило построить так называемую трехударную теорию. Основное допущение теории — однородность потока в областях, ограниченных ударными волнами, что предполагает прямолинейность всех волн в окрестностях тройной точки и независимость параметров газа в каждой области от расстояния до нее.

Если движение автомодельно, то можно перейти в систему координат, связанную с тройной точкой, и рассматривать

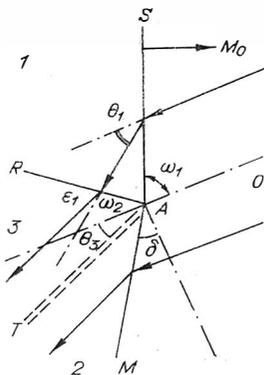


Рис. 3. Тройная конфигурация ударных волн в связанной системе координат:  $AS$  — падающая волна,  $AR$  — отраженная,  $AM$  — волна Маха,  $AT$  — контактный разрыв.

конфигурацию вне связи с отражающей поверхностью (рис. 3). Волновая картина в этом случае будет зависеть только от угла втекания потока  $\omega_1$  и интенсивности падающей волны. Взаимное расположение волн определяется совместным решением уравнений, характеризующих движение газа через области 0—1—3 и область 2. Условием, «замыкающим» систему уравнений, является равенство давлений в областях 2 и 3 и параллельность соответствующих потоков.

Пусть нам заданы число Маха падающей волны  $M_0$  и угол втекания  $\omega_1$ . Газ считаем идеальным с  $\gamma = 1,4$ . Угол поворота потока  $\Theta_1$ , число Маха  $M_1$  за падающей волной и угол поворота потока  $\varepsilon$  при переходе через отраженную волну определяются по формулам, аналогичным (8)—(10), с подстановкой  $\omega_1, \omega_2$  вместо  $\varphi_0, \varphi_2$  во всех трех уравнениях и  $\text{tg } \varepsilon = \text{tg } (\Theta_1 - \Theta_3)$  вместо  $\text{tg } \Theta_1$  в левой части уравнения (10). Давление в области 3 определится из соотношения

$$\frac{p_3}{p_0} = \frac{1}{36} (7M_0^2 - 1) [7M_0^2 \sin^2 (\Theta_1 + \omega_2) - 1]. \quad (18)$$

Угол поворота потока  $\Theta_3$  и давление  $p_2$  в области 2 будут:

$$\text{tg } \Theta_3 = \text{tg } \delta \frac{\cos^2 \delta - \frac{1}{M_0^2}}{1,2 - \left( \cos^2 \delta - \frac{1}{M_0^2} \right)}, \quad (19)$$

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{1}{6} \left( 7M_0^2 \frac{\cos^2 \delta}{\sin^2 \omega_1} - 1 \right). \quad (20)$$

Определив по (8) и (9) с учетом указанных выше замен значения  $\Theta_1$  и  $M_1$ , задаваясь рядом значений  $\omega_2$ , по (10) и (18) находим соответствующие величины угла  $\Theta_3$  и отношения давлений  $p_3/p_0$ . Задаваясь также рядом значений угла наклона волны Маха  $\delta$ , определяем  $\Theta_3$  и  $p_2/p_0$  по (19) и (20).

Точка пересечения построенных по уравнениям (10), (18)—(20) ударных поляр для отраженной волны и волны Маха в координатах  $(p_3/p_0, \Theta_3)$  определяет искомую конфигурацию. В общем случае поляры могут иметь две точки пересечения. Реальной картине соответствует точка с меньшим значением  $\Theta_3$ , поскольку волна Маха относится к так называемому «сильному семейству» ударных волн.

Экспериментальные работы [25, 31, 34 и др.] подтвердили справедливость трехударной теории для волн с  $M_0 > 1,5$ , однако для волн меньшей интенсивности наблюдались существенные расхождения с теорией. Наблюдения показали, что отклонения связаны с дозвуковым течением за отраженной волной, что нарушает основные предпосылки трехударной теории о прямолинейности волн и однородности потоков. Возникновение дозвуковых зон

с резкими градиентами параметров течения делает существенным влияние вязкости газа, которым пренебрегали в трехударной теории. Приведенный [33] численный расчет маховского отражения по трехударной теории с учетом вязких сил показал прекрасное совпадение с экспериментом.

Трехударная теория позволяет рассчитывать взаимное расположение волн в тройной конфигурации и газодинамические параметры во всех областях, если известен угол  $\chi$  движения тройной точки. Угол втекания  $\omega_1$  связан с углом падения волны  $\varphi_0$  соотношением

$$\omega_1 = \varphi_0 - \chi. \quad (21)$$

Существующие в настоящее время аналитические методы не позволяют определять угол  $\chi$  в общем случае. Х. Кабанн [32] предложил, пренебрегая криволинейностью волны Маха, считать ее отрезком прямой, перпендикулярной к отражающей поверхности, т. е. заранее ориентировать тройную конфигурацию относительно стенки. Нетрудно убедиться, что в этом случае  $\chi$  совпадает с нашим углом  $\delta$ . На этом приближении, которое легло в основу так называемой элементарной теории маховского отражения (ЭТМО), основан ряд работ, посвященных определению параметров потока за отраженной волной в нерегулярном режиме. Среди них особо следует отметить обширные расчеты Г. М. Арутюняна и Л. В. Карчевского [1], проделанные для газов с различными показателями адиабаты.

Экспериментальное изучение применимости ЭТМО для расчета маховского отражения показывает, что гипотеза о прямолинейности волны Маха оправдывается для падающих волн умеренной интенсивности при углах падения  $\varphi_0 = 47-60^\circ$  [9, 23, 29 и др.]. В этом диапазоне экспериментальные значения  $\chi$  отличаются от рассчитанных по ЭТМО на  $2-3^\circ$ . При больших углах падения значения  $\chi$  превышают расчетные, а при меньших — наоборот. Для практических расчетов по трехударной теории можно воспользоваться экспериментальными значениями  $\chi$ . На рис. 4 даны графики значений угла  $\chi$  для различных интенсивностей падающих воздушных ударных волн  $\pi_1 = p_0/p_1$  в функции угла падения  $\varphi_0$  по данным В. Блекнэя и А. Тауба [31].

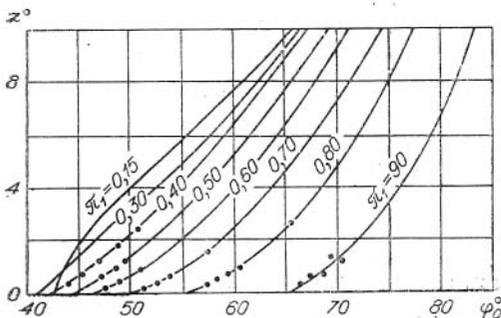


Рис. 4. Значения угла движения точки в функции угла падения и интенсивности волны по данным [31].

С точки зрения действия ударной волны на объекты, находящиеся на земной поверх-

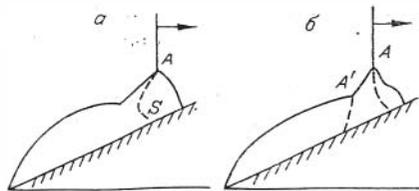
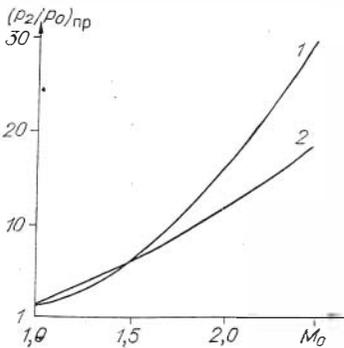


Рис. 6. Аномальные режимы отражения: с изломом на отраженной волне (а), двойное маховское (б).

← Рис. 5. Перепад давления  $p_2/p_0$  в предельном режиме для двух типов отражения ударной волны.

Воздух,  $\gamma = 1,4$ .

1 — регулярное отражение, 2 — маховское.

ности, представляет интерес отношение давлений  $p_2/p_0$ . При фиксированном  $M_0$  оно меняется с увеличением угла падения от  $0$  до  $90^\circ$ . При нормальном отражении ( $\varphi_0 = 0$ )  $p_2/p_0$  определяется формулой (2). По мере возрастания  $\varphi_0$   $p_2/p_0$  сначала уменьшается, а затем, с приближением  $\varphi_0$  к  $\varphi_{0\text{ пр}}$ , становится равным, а для слабых ударных волн и несколько большим, чем при нормальном отражении. Максимум  $p_2/p_0$  соответствует  $\varphi_0 = \varphi_{0\text{ пр}}$ . При наступлении маховского отражения расчетное значение  $p_2/p_0$  резко падает, а затем плавно уменьшается до перепада в падающей волне при  $\varphi_0 = 90^\circ$ . Некоторые отклонения замечены для волн с  $M_0 < 1,5$ . На рис. 5 приведены теоретические кривые давления  $(p_2/p_0)_{\text{пр}}$  в функции  $M_0$  для переходного режима. Можно заметить, что расчет как будто предсказывает незначительное повышение давления при переходе к маховскому отражению для слабых волн. В действительности этот факт связан с погрешностями трехударной теории в диапазоне слабых волн, о котором говорилось выше; изменение режимов отражения происходит с плавным изменением газодинамических параметров [9, 25 и др.].

Новейшие экспериментальные исследования Л. Г. Гвоздевой и В. П. Фокеева [9, 25, 29] показали, что плавное изменение  $p_2/p_0$  осуществляется также и в диапазоне сильных волн. Это связано с возникновением в переходной области режима двойного маховского отражения. Эксперимент на клине с углом при вершине  $24^\circ$  показывает, что в воздухе при скорости ударной волны около  $900$  м/с на отраженной волне появляется излом (рис. 6, а), а при скорости  $1400$  м/с возникает вторая тройная точка  $A'$  (рис. 6, б). Давление за первой волной Маха соответствует расчетному, а давление за второй — приближается к давлению за регулярно отраженной волной. При углах падения, близких к предельным, первая и вторая тройные точки сближаются, причем результирующее давление становится равным давлению регулярного отраже-

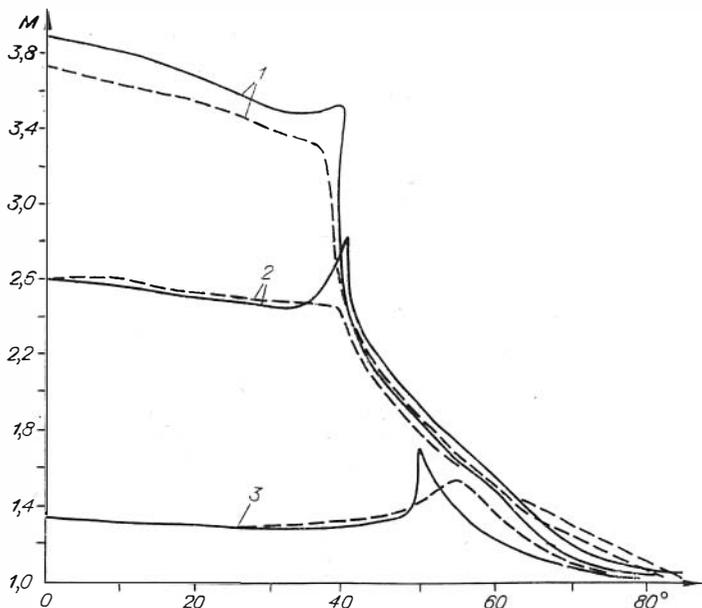


Рис. 7. Сравнение теоретических значений перепада давлений  $p_2/p_1$  с экспериментом [8].

1 —  $M_0 = 2,28$ ; 2 —  $M_0 = 1,67$ ; 3 —  $M_0 = 1,14$ ; штриховая линия — эксперимент; сплошные кривые — трехударная теория и теория регулярного отражения.

ния. В диапазоне сильных волн существенно также влияние неустойчивости контактного разрыва.

Перечисленные особенности нерегулярного отражения хорошо объясняют расхождения в теоретически рассчитанных авторами настоящей работы значениях перепада давлений в отраженной волне в функции угла падения волны с экспериментальными значениями Г. Л. Броуда [8]. На рис. 7 в качестве примера приведены три теоретические и три экспериментальные кривые для ударных волн с различными числами Маха. Основное расхождение теории и эксперимента для волн с  $M_0 = 2,28$  и  $1,67$  наблюдается в зоне перехода от регулярного к маховскому отражению ( $\varphi_0 = 35-40^\circ$ ). Менее значительное расхождение наблюдается при  $\varphi_0 = 60-80^\circ$ . Их можно объяснить не учтенной в расчете криволинейностью волн. В диапазоне  $\varphi_0 = 40-60^\circ$  кривые практически совпадают. Для слабой волны ( $M_0 = 1,14$ ) совпадения нет во всем диапазоне маховского отражения, что связано с неправомерным применением здесь трехударной теории. Не вполне ясна причина расхождения теоретической и экспериментальной кривых для  $M_0 = 2,28$  в области нормального и регулярного отражений. Поскольку в справедливости теории для этих режимов сомневаться не приходится, причину следует искать

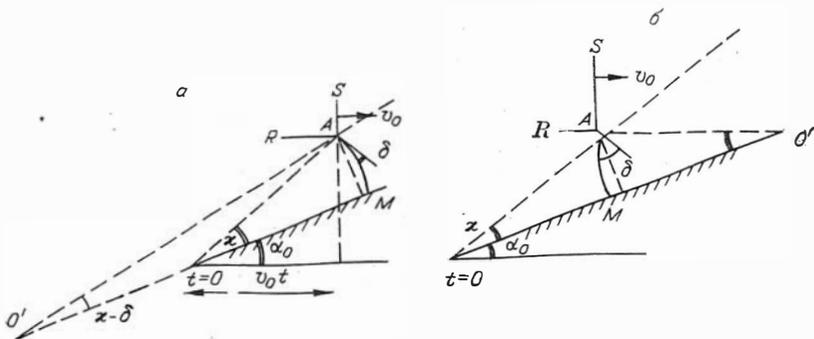


Рис. 8. К оценке влияния криволинейности волны Маха.

в инструментальных ошибках при проведении эксперимента [8].

В заключение оценим влияние на давление за отраженной волной искривления волны Маха в одинарной маховской конфигурации для случая  $\chi \neq \delta$ . При этом давление в точке контакта волны Маха со стенкой будет определяться скоростью ее перемещения вдоль стенки, отличающейся от нормальной компоненты скорости потока, втекающего в волну в окрестностях тройной точки. Рис. 8 показаны два возможных случая маховского отражения с криволинейной волной Маха (рис. 8, а — при  $\chi > \delta$ , рис. 8, б — при  $\chi < \delta$ ). Представляя в обоих случаях волну Маха в виде дуги окружности с центром в точке  $O$  (положение которого и текущий радиус окружности изменяются во времени) при условии, что, во-первых, волна Маха нормальна к поверхности клина в точке контакта  $M$  и, во-вторых, в окрестностях тройной точки волна Маха представляет собой скачок, наклоненный под углом  $90^\circ + \delta$  по отношению к направлению втекающего потока. Из очевидных геометрических соотношений найдем, что отрезок  $OM$ , определяющий скорость перемещения точки  $M$  вдоль поверхности клина, будет определяться выражениями

$$OM = \frac{u_0 \cos \chi}{\cos(\alpha_0 + \chi)} t \left\{ 1 + \operatorname{tg} \chi \frac{[1 - \cos(\chi - \delta)]}{\sin(\chi - \delta)} \right\} \text{ при } \chi > \delta$$

и

$$OM = \frac{u_0 \cos \chi}{\cos(\alpha_0 + \chi)} t \left\{ 1 - \operatorname{tg} \chi \frac{[1 - \cos(\delta - \chi)]}{\sin(\delta - \chi)} \right\} \text{ при } \chi < \delta$$

или, в общем случае, поскольку  $\sin(\delta - \chi) = -\sin(\chi - \delta)$ ,  $\cos(\delta - \chi) = \cos(\chi - \delta)$ ,

$$OM = \frac{u_0 \cos \chi}{\cos(\alpha_0 + \chi)} t \left\{ 1 + \operatorname{tg} \chi \frac{[1 - \cos(\chi - \delta)]}{\sin(\chi - \delta)} \right\}.$$

Поскольку движение тройной точки автомодельно, найдем величину скорости перемещения точки  $M$  вдоль поверхности клина

$$u_M = \frac{d(OM)}{dt} = \frac{u_0 \cos \chi}{\cos(\alpha_0 + \chi)} \left\{ 1 + \operatorname{tg} \chi \frac{[1 - \cos(\gamma - \delta)]}{\sin(\chi - \delta)} \right\}. \quad (22)$$

Нетрудно показать, что нормальная компонента скорости потока, втекающего в волну Маха в окрестностях тройной точки, определяется выражением

$$u_A = \frac{u_0 \cos \delta}{\cos(\alpha_0 + \chi)}. \quad (23)$$

Используя (22) и (23), найдем отношение скоростей  $u_M/u_A$ :

$$\frac{u_M}{u_A} = \frac{\cos \chi}{\cos \delta} \left\{ 1 + \operatorname{tg} \chi \frac{1 - \cos(\chi - \delta)}{\sin(\chi - \delta)} \right\}. \quad (24)$$

В частном случае при  $\chi \rightarrow \delta$

$$\lim_{\chi \rightarrow \delta} \frac{1 - \cos(\chi - \delta)}{\sin(\chi - \delta)} = \lim_{\chi \rightarrow \delta} \frac{\sin(\chi - \delta)}{\cos(\chi - \delta)} = 0,$$

вследствие чего  $u_M = u_A$ . При регулярном отражении  $\chi = 0$ ,  $\delta = 0$  и  $u_M = u_A$ .

Интересующая нас величина изменения давления за волной Маха по отношению к давлению в окрестностях тройной точки связана с изменением скорости потока по закону  $p_M/p_A \sim (u_M/u_A)^2$ . Численная оценка показывает, что в случае  $\chi = 10-15^\circ$ ,  $\delta = \chi \pm 5^\circ$  криволинейность волны Маха мало влияет на параметры потока ( $\delta p \sim 1\%$ ). При больших значениях  $|\chi - \delta| \delta p$  возрастает, но во всем диапазоне возможных значений  $\chi$  не превышает 10—15%.

### АНАЛИЗ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ПАДЕНИИ КРУПНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Итак, мы рассмотрели возможные режимы отражения ударной волны от поверхности, указали границы их существования и получили зависимости, характеризующие разрушающие параметры в каждом случае. Как показывает простейший анализ, при любом варианте падения крупного метеорита (см. рис. 1) после достижения ударной волной земной поверхности в зависимости от ее интенсивности и угла падения может осуществиться тот или иной режим отражения. Рассмотрим области существования различных режимов на примере баллистической волны со сферическим завершением для случая плавного сопряжения баллистической и сферической волн, однако его легко обобщить на любой из случаев А — В (см. выше). Обратимся к рис. 9.

При углах наклона траектории 10—40° (что обычно принимается для Тунгусского падения) баллистическая волна, дойдя до земной поверхности в эпицентральной точке  $O$ , начинает отражаться. В тыловой части зоны разрушений в плоскости траектории

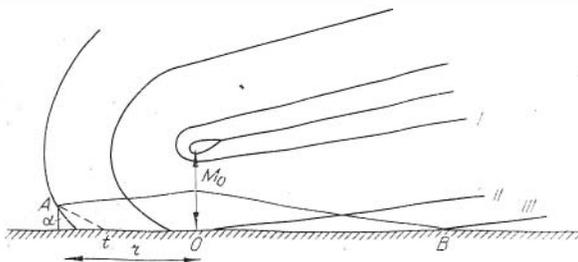


Рис. 9. Взаимодействие баллистической волны со сферическим завершением с земной поверхностью в плоскости траектории:

I—III — положение волны в различные моменты времени.

угол падения всегда меньше предельного, поэтому здесь осуществляется регулярное отражение. По мере удаления от проекции траектории возрастает угол падения волны и уменьшается ее интенсивность. В случае, если в некоторой точке при интенсивности волны  $\Delta p_1$  угол падения  $\varphi_0$  достигает предельного значения при данном  $\Delta p_1$ , формируется тройная конфигурация и начинается режим маховского отражения. Разрушающие параметры в переходной зоне максимальны, вследствие чего разрушения здесь будут происходить на больших расстояниях от проекции траектории по сравнению с регулярным и маховским режимом при том же значении  $\Delta p_1$ . На рис. 10 приведена картина вывала леса в Тунгусской тайге по данным В. Г. Фаста и др. [27]. Мы видим, что в тыловой части действительно существует указанная область. Численный расчет [15] (рис. 11) и модельный эксперимент [14] дают ту же картину. Заметим, что в случаях Б и В учет взаимодействия сферической и баллистической волн между собой приводит к усилению результирующей волны в тыловой части, что усугубляет рассмотренный эффект.

Во фронтальной части зоны разрушений с поверхностью Земли взаимодействует волна сферического взрыва. В эпицентральной точке  $O$  отражение нормальное. По мере удаления от эпицентра за область малых углов падения волны, где осуществляется регулярное отражение, следует область маховского отражения. Эти рассуждения справедливы в том случае, если ударная волна, пройдя область малых углов падения, не ослабевает настолько, что для нее не будет существовать предельного значения угла падения, т. е. отражение всюду будет регулярным. На существование такого режима взаимодействия указывали В. П. Коробейников и др. [16].

Рассмотрим еще один возможный режим взаимодействия сферической волны с поверхностью. На рис. 12 приведены зависимости предельного расстояния от эпицентра  $r_c$  точки  $C$  начала маховского отражения в функции начальной энергии взрыва  $E_0$

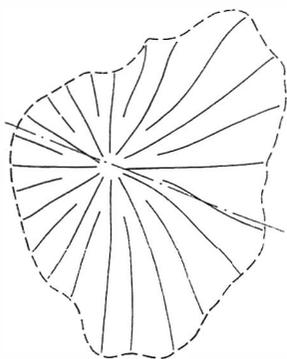


Рис. 10. Картина вывала леса в Тунгусской тайге по данным В. Г. Фаста и др. [27]. Сплошные линии — линии ударной волны, штриховая — граница вывала.

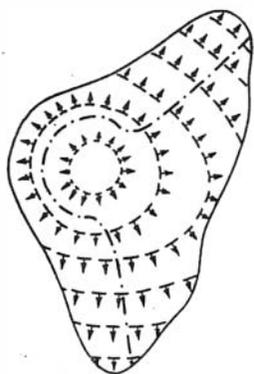
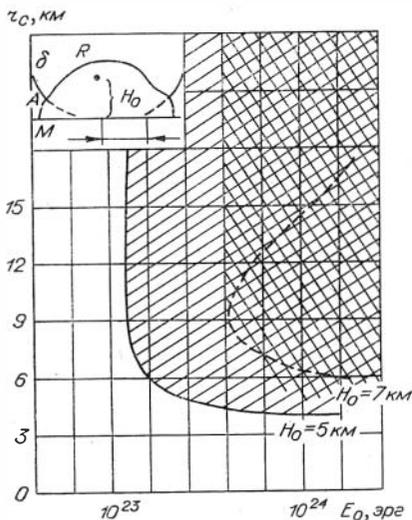


Рис. 11. Расчетная картина разрушений [15] в Тунгусской тайге. Угол наклона траектории метеорита  $40^\circ$ , высота центрального взрыва 6,5 км, энергия баллистической волны  $6,3 \cdot 10^{16}$  эрг/см, энергия сферического взрыва  $5,8 \times 10^{22}$  эрг.

В неоднородной атмосфере для двух значений высоты взрыва  $H_0$ . При расчете зависимостей использовались данные В. А. Бронштэна [6, 7] и таблица. Незаштрихованная область соответствует зоне регулярного отражения, заштрихованная — зоне маховского. Штриховая линия в заштрихованной области соответствует такому углу наклона падающей волны и такой интенсивности



падающей волны в силу ее затухания вновь становятся меньшими, чем предельные. Кажется бы, здесь снова должно наступить регулярное отражение, однако, поскольку тройная точка уже сформирована и отраженная волна удалена от поверхности Земли на высоту  $H$ , обратный ее переход к точке

Рис. 12. Расстояние  $r_c$  от эпицентра сферического взрыва в неоднородной атмосфере, на котором осуществляется переход от регулярного отражения к маховскому (заштрихованная область) в функции энергии, для различных значений высоты взрыва.

контакта падающей волны с поверхностью физически неосуществим. В этом режиме можно предполагать существование аномальных криволинейных или двойных маховских конфигураций. Этот случай не описан ни в одной из известных авторам работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Г. М., Карчевский Л. В. Отраженные ударные волны. М., Машиностроение, 1973. 376 с.
2. Баум Ф. А., Каплан С. А., Станюкович К. П. Введение в космическую газодинамику. М., Физматгиз, 1958. 424 с.
3. Бронштэн В. А. Проблемы движения в атмосфере крупных метеоритных тел. М., Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.
4. Бронштэн В. А. Воздушные волны Тунгусского метеорита.— Астроном. вестн., 1969, т. 3, № 4, с. 214—222.
5. Бронштэн В. А. Распространение сильной цилиндрической волны в неоднородной атмосфере.— Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1970, № 6, с. 108—111.
6. Бронштэн В. А. Распространение воздушных волн Тунгусского метеорита с учетом неоднородности атмосферы.— Астроном. вестн., 1972, т. 6, № 1, с. 22—28.
7. Бронштэн В. А. Распространение сферических и цилиндрических взрывных волн в неоднородной атмосфере с учетом противодавления. — Ж. прикл. механики и техн. физики, 1972, № 3, с. 84—90.
8. Броуд Г. Л. Действие ядерного взрыва.— В кн.: Действие ядерного взрыва.— М., Мир, 1971, с. 31—35.
9. Гвоздева Л. Г., Предводителева О. А., Фокеев В. П. Давление и тепловые потоки в стенку клина при маховском отражении ударных волн.— В кн.: Теплообмен и физическая газодинамика. М., Наука, 1974, с. 156—165.
10. Дивари Н. Б. Явления, сопровождающие падение метеоритного дождя и его атмосферная траектория.— В кн.: Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. Т. 1. М., Наука, 1959, с. 26—98.
11. Добровольский О. В. Взрывная волна, связанная с движением метеоритного тела.— Бюл. Сталинабад. астроном. обсерватории, 1952, № 6, с. 11—16.
12. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 года. Минск, Наука и техника, 1969. 202 с.
13. Зоткин И. Т. Тунгусские метеориты падают каждый год! — Природа, 1974, № 11, с. 83.
14. Зоткин И. Т., Цикулин М. А. Моделирование Тунгусского взрыва.— Природа, 1966, № 6, с. 81—89.
15. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеоритных тел.— В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 73—89.
16. 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—101.
17. Лудлофф Г. Ф. Аэродинамика взрывных волн.— В кн.: Проблемы механики. М., ИЛ, 1955, с. 553—582.
18. Маслов Е. В. К вопросу о высоте и мощности взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 1. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 103—112.
19. Петров Г. И., Стулов В. П. Новая гипотеза о Тунгусском метеорите.— Земля и Вселенная, 1975, № 4, с. 74—75.
20. Покровский Г. И. О взрыве метеоритных тел, движущихся в атмосфере.— В кн.: Метеоритика. Вып. 27. М., Наука, 1966, с. 103—108.
21. Русанов В. В. Расчет взаимодействия нестационарных ударных волн с препятствиями.— Ж. вычисл. матем. и матем. физики, 1961, т. 1, № 2, с. 267—280.

22. **Сворень Р.** Версия «Гигантская снежинка». — Наука и жизнь, 1975, № 6, с. 22—23.
23. **Семенов А. Н., Сыпцикова М. Н., Березкина М. К.** Экспериментальное изучение особенностей маховского отражения в ударной трубе. — Ж. теорет. физики, 1970, т. 40, № 5, с. 1033—1047.
24. **Станюкович К. П.** Система воздушных ударных волн при полете и взрыве метеоритов. — В кн.: Метеоритика. Вып. 14. М., Наука, 1956, с. 62—70.
25. **Ударные волны в реальных газах/Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г., Лобастов Ю. С. и др. М., Наука, 1968. 196 с.**
26. **Фаст В. Г.** Статистический анализ параметров Тунгусского вывала. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 40—61.
27. **Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А.** О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.
28. **Флоренский К. П.** Предварительные результаты Тунгусской метеоритной комплексной экспедиции 1961 г. — В кн.: Метеоритика. Вып. 23. М., Наука, 1963, с. 3—29.
29. **Фокеев В. П.** Изменение давления на поверхности при переходе от маховского к регулярному отражению ударных волн. — В кн.: Тезисы докладов I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям. М., 1973, с. 56—57.
30. **Цикулин М. А.** Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М., Наука, 1969. 88 с.
31. **Bleakney W., Taub A. H.** Interaction of shock waves. — Rev. Mod. Phys., 1949, v. 21, N 4, p. 584—605.
32. **Sabannes H.** Lois de la reflexion des ondes de choc dans les ecoulements plans non-stationnaires. ONERA publ., 1955, N 8, p. 1—29.
33. **Shao T. S.** Numerical solution of plane viscous shock reflection. — J. Comp. Phys., 1967, v. 1, N 3, p. 367—381.
34. **Smith W. R.** Mutual reflection of two shock waves of arbitrary strengths. — Phys. of Fluid, 1959, v. 2, N 5, p. 533.

## О МЕТОДАХ РАСЧЕТА ВЗРЫВНОЙ И БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ВОЛН ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

В. А. БРОНШТЭН

В 1969 г. автор настоящей статьи обратил внимание исследователей на необходимость при расчетах воздействия на местность воздушных волн Тунгусского метеорита — баллистической и взрывной — учитывать неоднородность атмосферы [3]. Рост давления невозмущенного воздуха с приближением к земной поверхности создает дополнительный фактор, который, наряду с противодействием и расширением объема, охваченного возмущением, обуславливает ослабление интенсивности волны. Это ослабление особенно заметно для слабых волн и для волн, распространяющихся с большой высоты.

Для расчета распространения слабых ударных волн (т. е. таких, где нельзя пренебречь противодействием, точнее, при  $\Delta p/p < 40$ ) в 1969—1971 гг. был разработан «метод параллельных слоев», идея которого заключается в следующем. Атмосфера раз-

бывается на ряд тонких параллельных слоев, внутри каждого из которых она считается однородной, а на границах слоев плотность и давление меняются. При подходе волны к границе слоя интенсивность ее также меняется на величину, определяемую решением задачи о распаде произвольного разрыва. Идея метода была предложена автором, полное аналитическое решение задачи выполнено Л. В. Овсянниковым [18] и, несколько иным путем, автором [4, 5]. В частности, для перехода от одномерной задачи к двумерной (для цилиндрической волны) нами был использован принцип плоских сечений.

Этим методом (метод Бронштэна — Овсянникова, далее сокращенно БО) в 1972—1974 гг. была выполнена серия расчетов воздушных волн Тунгусского метеорита, опубликованных в [1, 6].

Одновременно в 1971—1976 гг. большую серию расчетов волн Тунгусского метеорита провели В. П. Коробейников, П. И. Чушкин и Л. В. Шуршалов [9—13, 20, 23]. Учет неоднородности атмосферы они производили другим приближенным методом, изложенным в работе М. Луцки и Д. Лехто [24]; в нем используется модифицированное правило подобия Сакса (метод Луцки — Лехто, далее сокращенно ЛЛ).

Поскольку вопрос о сравнительных достоинствах и недостатках обоих приближенных методов БО и ЛЛ, начиная с 1975 г., стал предметом дискуссии [1, 2, 15—17], перешедшей в попытку В. П. Коробейникова, П. И. Чушкина и Л. В. Шуршалова совершенно дискредитировать результаты, полученные А. П. Бояркиной и автором [1, 6], мы вынуждены рассмотреть здесь все спорные моменты более подробно, чем это делалось до сих пор. Не отрицая того, что в этих работах был допущен ряд ошибок и неправильных утверждений (см. [2]), мы не можем согласиться с целым рядом замечаний в адрес нашей работы [13, 17].

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ БО и ЛЛ

Метод БО подробно изложен в работах В. А. Бронштэна [4, 5], Л. В. Овсянникова [18], А. П. Бояркиной и В. А. Бронштэна [1], и мы не будем останавливаться здесь на его математической стороне. Назовем лишь предположения, положенные в его основу:

1. Атмосфера предполагается изотермической и экспоненциальной.

2. Принято так называемое секторное приближение, т. е. предполагается, что возмущение распространяется по прямой линии вдоль некоторого луча, при этом пренебрегается оттоком энергии вверх и перетоком массы вниз.

3. Для цилиндрической волны принят принцип плоских сечений, т. е. возмущение от данной точки траектории метеорита считается распространяющимся в плоскости, проходящей через эту точку и перпендикулярной траектории.

4. Изменение избыточного давления  $q = \Delta p/p$  на фронте волны на малом пути представляется суммой двух компонент, из которых первая равна соответствующему изменению  $q$  для однородной атмосферы с начальным давлением в рассматриваемой точке, а вторая определяется приращением  $q$  за счет изменения начального давления и равна главной части этого приращения.

5. Действие гравитации (за исключением экспоненциального изменения давления атмосферы с высотой) не учитывается.

Правило Сакса (в его первоначальной форме) позволяет сделать пересчет параметров ударной волны, заданных для одного набора условий перед фронтом, на любой другой их набор. При этом все величины берутся в безразмерной форме, а атмосфера считается однородной.

В методе ЛЛ используется модифицированное правило Сакса, состоящее в том, что избыточное давление на расстоянии  $R$  от точки взрыва в неоднородной атмосфере приравнивается избыточному давлению в той же точке на том же расстоянии, но в однородной атмосфере с давлением, равным давлению в рассматриваемой точке. Метод ЛЛ не исчерпывается применением модифицированного правила Сакса, поскольку в [24] обосновывается правило подобия, связывающее  $\Delta p/p$  с отношением  $\Delta p/p_c$ , где  $p_c$  — давление в точке взрыва. Далее там же доказывается, что это правило подобия обобщает правило Сакса на случай неоднородной экспоненциальной атмосферы, и сравниваются результаты, полученные с помощью модифицированного правила Сакса и численными расчетами в одномерном лагранжевом приближении с использованием метода искусственной вязкости.

В методе ЛЛ использованы те же предположения 1, 2 и 5, что и в методе БО, а вместо предположения 4 — изложенное выше модифицированное правило Сакса (МПС). Предположение 3, не фигурирующее в работе [24], также принято в расчетах В. П. Коробейникова и его соавторов. Таким образом, единственное отличие в исходных предположениях методов БО и ЛЛ состоит в том, что в первом из них используется приближение параллельных слоев, а во втором — модифицированное правило подобия Сакса. В первом методе реальный непрерывный ход давления заменяется ступенчатым, во втором — участком постоянного давления. Очевидно, что первое приближение должно быть ближе к истине, чем второе, тем более, что в расчете на ЭВМ можно как угодно уменьшить шаг (масштаб ступенек) или использовать аналитическое решение, полученное путем предельного перехода [4, 5, 18], когда масштаб ступенек стремится к нулю.

Однако сравнение обоих приближенных методов с точными (в пределах секторного приближения и без учета силы тяжести) расчетами Х. С. Кестенбойма и др. [8] показывает, что на значительном участке метод ЛЛ дает несколько лучшие результаты, чем метод БО, особенно для случая более мощного взрыва (рис. 1). Зато в случае менее мощного взрыва и на больших расстояниях

метод БО оказывается более близким к точным расчетам (рис. 2).

В обеих последних работах В. П. Коробейников и его соавторы [14, 17] указали, однако, что расчеты Х. С. Кестенбойма и др. [8] не могут считаться точными, поскольку они: а) произведены в секторном приближении и б) не учитывают силы тяжести. Разумеется, эти упрощения снижают точность расчетов Х. С. Кестенбойма и др. [8], и с этой точки зрения В. П. Коробейников с соавторами правы.

Как показывают приведенные в работах В. П. Коробейникова и др. [13, 14, 17] графики, расчеты по методу ЛЛ хорошо согласуются с точными расчетами по уравне-

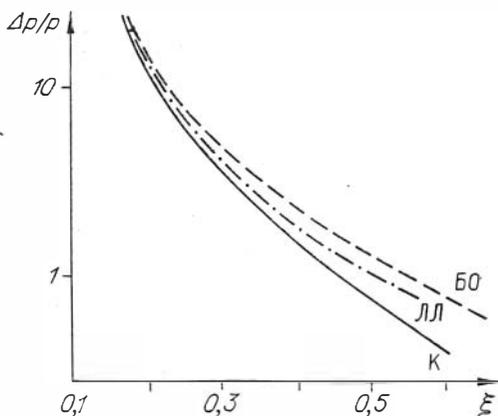


Рис. 1. Ход величины избыточного давления в сферической ударной волне в функции относительного расстояния  $\xi$  ( $E_0 = 10^{24}$  эрг,  $H_0 = 8$  км). Здесь и на рис. 2: К — расчет Х. С. Кестенбойма и др. [8] в секторном приближении без учета тяготения, БО — расчет методом Бронштэна — Овсянникова, ЛЛ — расчет методом Луцки — Лехто (модифицированное правило Сакса).

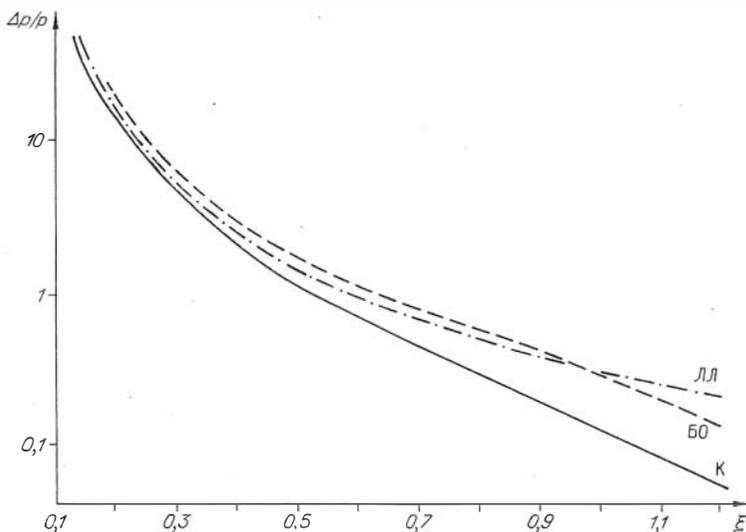


Рис. 2. Ход величины избыточного давления в сферической ударной волне в функции относительного расстояния  $\xi$  ( $E_0 = 10^{23}$  эрг,  $H_0 = 8$  км).

ниям газовой динамики с учетом ускорения силы тяжести, тогда как расчеты по методу БО дают ход избыточного давления, близкий к построенному без учета тяготения. Но тогда приходится сделать вывод, что в методе ЛЛ происходит случайная взаимная компенсация двух эффектов — недооценки неоднородности атмосферы и учета действия силы тяжести — на распространение ударной волны. Эта случайная компенсация может хорошо действовать в одном примере и плохо — в другом. Во всяком случае, в самом методе ЛЛ учет силы тяжести не заложен.

Расчеты по методу БО, как показывают графики, приведенные В. П. Коробейниковым и др. [14, 17], качественно следуют расчетам Х. С. Кестенбойма и др. [8], что неудивительно, поскольку и в тех, и в других сила тяжести не учитывалась. Для того, чтобы получить более близкое соответствие точным расчетам, необходимо ввести в формулы нашего метода член, содержащий ускорение силы тяжести. Эту задачу мы постараемся решить в дальнейшем.

### ОБ ЭНЕРГИИ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ И НАКЛОНЕ ТРАЕКТОРИИ

Остановимся на других замечаниях В. П. Коробейникова и его соавторов по нашей работе. В одной из статей [14] они пишут о нашей работе [6]: «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)...». Это заявление основано на непонимании авторами сделанных нами предположений. По нашему мнению, над точкой  $A$ , находящейся в 30 км от эпицентра назад вдоль проекции траектории, Тунгусское тело испытало резкое дробление, которое усилило интенсивность испарения и энергию  $E_1$  баллистической волны (на единицу длины пути) за счет так называемой абляционной волны, интенсивность которой при больших скоростях превышает интенсивность собственно баллистической волны, что было показано еще О. В. Добровольским в 1952 г. [7]. Это наше предположение вытекало из почти прямой формы восточной границы зоны вывала [6]. Очевидно, что для суждения о массе и скорости Тунгусского тела надо использовать интенсивность баллистической волны до дробления, а не после, поскольку лишь в первом случае мы можем считать, что имеем дело с единым крупным телом. Приведенная В. П. Коробейниковым и др. [14] оценка скорости Тунгусского тела  $v = 44$  км/с (вместо нашей  $v = 26$  км/с) совершенно нереальна.

В то же время наша гипотеза о дроблении Тунгусского тела, правдоподобная сама по себе, не является необходимым следствием анализа поля вывала леса, так как при расчетах по принципу плоских сечений не учитывается концевой эффект. Его учет привел бы к выпуклости восточной границы поля вывала, чего на самом деле нет.

Мы не отрицаем, что в наших работах [1, 6] энергия баллистической волны на последнем участке траектории была завышена. Причиной этого, по-видимому, был неучет влияния силы тяжести, о чем говорилось выше. Общая энергия Тунгусского взрыва, безусловно, не превышает 40 Мт тротилового эквивалента, а скорее всего, она еще в 2—3 раза ниже. Нами была также допущена ошибка в расчете скоростного напора.

Остановимся еще на одном замечании В. П. Коробейникова и др. [14]: «Значения  $H_0$  и  $\alpha$  высоты взрыва и наклона траектории проведенными расчетами не обоснованы, а приняты фактически по показаниям очевидцев». Напомним, что нами были приняты как наиболее вероятные значения  $H_0 = 7,5 \pm 2,5$  км и  $\alpha \leq 15^\circ$ . Большие значения  $\alpha$  не согласуются с фактом наблюдения Тунгусского болида над Преображенкой, в 300 км к востоку от эпицентра. Авторы [14] из своих расчетов получили  $\alpha = 40^\circ$ . В этом случае высота болида над Преображенкой была бы 260 км. Конечно, если они рассматривают некоторую абстрактную математическую задачу, то могут получить и признать оптимальным любое решение, удовлетворяющее условиям задачи. Но если они хотят изучать реально наблюдавшееся явление, именуемое Тунгусским метеоритом, они обязаны учитывать имеющиеся наблюдательные данные и отбрасывать как негодные все решения, которые этим данным противоречат.

Однако в дискуссии об угле наклона траектории стоит обратить внимание еще на одну возможность. Очевидно, что наклон большей части траектории не превышал  $15^\circ$  по причинам, изложенным выше. С другой стороны, согласно В. П. Коробейникову и др. [14], оптимальное решение соответствует  $\alpha = 40^\circ$ . Но если Тунгусское тело имело отрицательное аэродинамическое качество или приобрело его в процессе разрушения, угол наклона пути мог измениться и траектория могла стать более крутой. Влияние аэродинамического качества на траекторию тела рассмотрено в работе В. А. Хохрякова [19].

Достойны сожаления отдельные излишне категорические выражения, к которым прибегали порой В. А. Коробейников с соавторами в этой дискуссии. Между тем основные выводы наших работ и работ группы В. П. Коробейникова отличаются лишь в численной оценке некоторых параметров Тунгусского явления. Никаких принципиальных расхождений у нас с ними нет.

Автор рад сообщить, что недавно в ходе плодотворных совместных обсуждений (главным образом с П. И. Чушкиным и Л. В. Шуршаловым) все спорные вопросы были выяснены, и точки зрения согласованы и уточнены.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бояркина А. П., Бронштэн В. А. Об энергии взрыва Тунгусского метеорита и учете неоднородности атмосферы. — *Астроном. вестн.*, 1975, т. 9, № 3, с. 172—177.

2. **Бояркина А. П., Бронштэн В. А.** Ответ на замечания В. П. Коробейникова, П. И. Чупкина и Л. В. Шуршалова по нашей статье.— *Астроном. вестн.*, 1977, т. 11, № 1, с. 70—71.
3. **Бронштэн В. А.** Воздушные волны Тунгусского метеорита.— *Астроном. вестн.*, 1969, т. 3, № 4, с. 214—222.
4. **Бронштэн В. А.** Распространение сферических и цилиндрических ударных волн в неоднородной атмосфере с учетом приводавления.— *Ж. прикл. матем. и теор. физики*, 1972, № 3, с. 84—90.
5. **Бронштэн В. А.** Распространение воздушных волн Тунгусского метеорита с учетом неоднородности атмосферы.— *Астроном. вестн.*, 1972, т. 6, № 1, с. 22—28.
6. **Бронштэн В. А., Бояркина А. П.** Расчеты воздушных волн Тунгусского метеорита.— В кн.: *Проблемы метеоритики*. Новосибирск, Наука, 1975, с. 47—63.
7. **Добровольский О. В.** Взрывная волна, связанная с движением метеоритного тела.— *Бюл. Сталинабад. астроном. обсерватории*, 1952, № 6, с. 11—16.
8. **Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А.** Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М., Наука, 1974. 256 с.
9. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** О гидродинамических эффектах при полете и взрыве в атмосфере Земли крупных метеорных тел.— В кн.: *Метеоритика*. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 73—89.
10. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** Об ударных волнах при полете и взрыве метеоритов.— В кн.: *Метеоритика*. Вып. 33. М., Наука, 1974, с. 79—80.
11. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** О зоне наземных разрушений при воздушном взрыве крупного метеорита.— *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1974, № 5, с. 94—100.
12. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** Об ударных волнах при полете и взрыве метеоритов.— В кн.: *Проблемы метеоритики*. Новосибирск, Наука, 1975, с. 20—46.
13. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита.— В кн.: *IV Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике*, 21—28 мая 1976 г., Киев. Киев, Наукова думка, 1976, с. 62—63.
14. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** О расчете наземных разрушений при воздушном взрыве метеорита.— В кн.: *Космическое вещество на Земле*. Новосибирск, Наука, 1976, с. 54—65.
15. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** О статье А. П. Бояркиной и В. А. Бронштэна («Об энергии взрыва Тунгусского метеорита и учете неоднородности атмосферы»).— *Астроном. вестн.*, 1977, т. 11, № 1, с. 69.
16. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** Об учете неоднородности атмосферы при расчете взрыва Тунгусского метеорита.— *Ж. вычисл. матем. и матем. физики*, 1977, т. 17, № 3, с. 737—752.
17. **Коробейников В. П., Чупкин П. И., Шуршалов Л. В.** Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита. (См. наст. сб.).
18. **Овсянников Л. В.** Приближенный метод пересчета закона распространения одномерных ударных волн.— *Ж. прикл. матем. и теор. физики*, 1972, № 1, с. 10—15.
19. **Хохряков В. А.** О взаимодействии космических тел с атмосферами планет.— *Космич. исследования*, 1977, т. 15, вып. 2, с. 203—207.
20. **Шуршалов Л. В.** О расчете ударных волн, распространяющихся в неоднородной атмосфере.— *Докл. АН СССР*, 1976, с. 230, № 4, с. 803—806.
21. **Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.** Gas dynamics of the flight and explosion of meteorite bodies in the Earth's atmosphere.— *Fluid Dynamics Trans.*, 1971, v. 6, pt. 11, p. 351—360.
22. **Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shurshalov L. V.** Gas dynamics of the flight and explosion of meteorites.— *Astronautica Acta*, 1972, v. 17, N 4/5, p. 339—348.

23. Korobeinikov V. P., Chushkin P. I., Shidlovskaja L. V., Shurshalov L. V. The modelling and calculation of some cosmic phenomena of blast type.— Lect. Notes Phys., 1976, v. 59, p. 268—273.
24. Lutzky M., Lehto D. Shock propagation in spherically symmetric exponential atmosphere. Phys. of Fluids, 1968, v. 11, N 7, p. 1466—1472.

## О ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ВЕКТОРА ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПОЧВ В РАЙОНЕ ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

А. П. БОЯРКИНА, В. Д. ГОЛЬДИН, С. Д. СИДОРАС

Как известно, остаточная намагниченность горных пород определяется магнитным полем Земли в момент образования породы, а также последующими изменениями этого поля под воздействием мощных магнитных возмущений [2,6 и др.]. Так как таковые имели место при Тунгусском падении 1908 г. [3], то могли оказать воздействие на магнитные свойства пород района падения Тунгусского метеорита. В связи с этим с лета 1969 г. было начато изучение остаточной намагниченности пород этого района с использованием методов, принятых в палеомагнитных исследованиях [6]. Для этого комплексными экспедициями Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР, Томского государственного университета и Томского отделения ВАГО в 1969—1976 гг. проводилась палеомагнитная съемка района, в результате чего отобрано и проанализировано 897 образцов с общей площади ~15 тыс. км<sup>2</sup>.

Объектом исследования послужили ориентированные образцы рыхлых осадочных пород (почв). Образцы отбирались в приповерхностном слое в форме куба со стороной 2—4 см и гранями, параллельными современному магнитному меридиану, т. е. направлению север — юг. Образцы пропитывались клеем БФ, обклеивались бумагой, и на их верхней грани наносилась стрелка, указывающая направление на север.

Для каждого образца в лабораторных условиях на базе Красноярской геологической экспедиции и лаборатории геофизических методов разведки при Томском политехническом институте были получены следующие характеристики: магнитная восприимчивость  $\kappa$ , модуль вектора остаточной намагниченности  $I_n$ , его направление относительно координатной сетки, характеризующееся углом  $D$  и наклоном  $I$ , а также значение фактора  $Q = I_n/0,58 \kappa$  [5].

Результаты работ 1969—1972 гг. опубликованы в работах С. Д. Сидораса и А. П. Бояркиной [1, 4, 5] и заключаются в следующем:

1. В районе падения Тунгусского метеорита наблюдается отклонение вектора остаточной намагниченности от современного гео-

магнитного поля, характеризуемого в данном районе величинами  $D \simeq 10^\circ$ ,  $I \simeq 78^\circ$ .

2. Границы этого эффекта на расстоянии до 30 км от эпицентра взрыва Тунгусского метеорита установить не удалось.

3. Для исследуемого района характерны повышенные значения  $I_n$  и  $\kappa$ .

4. Существует зона с наибольшим разбросом векторов, примыкающая с западной стороны к эпицентру взрыва.

Основной задачей последующих экспедиций явилось покрытие палеомагнитной съемкой районов, удаленных от эпицентра взрыва более чем на 30 км. В настоящей работе изложены результаты изучения поведения направления вектора остаточной намагниченности на большой территории.

Полученное поле направлений остаточной намагниченности подверглось статистической обработке на основе обычно используемого в палеомагнетизме распределения Фишера [6]. Для оценки направления на произвольно выбранном участке исследуемой площади по  $n$  рядовым значениям  $I_i$ ,  $D_i$  проб с данной территории вычислялись величины  $I_{cp}$ ,  $D_{cp}$  по формулам

$$I_{cp} = \arcsin \frac{\sum_1^n \sin I_i}{R}, \quad (1)$$

$$D_{cp} = \arctg \frac{\sum_1^n \cos I_i \sin D_i}{\sum_1^n \cos I_i \cos D_i}, \quad (2)$$

где

$$R = \sqrt{\left(\sum_1^n \cos I_i \sin D_i\right)^2 + \left(\sum_1^n \cos I_i \cos D_i\right)^2 + \left(\sum \sin I_i\right)^2}. \quad (3)$$

Для оценки кучности распределения векторов рассчитывался параметр кучности ( $K$ ):

$$K = \frac{n-1}{n-R}, \quad (4)$$

а также угол доверия [6] среднего направления  $D_{cp}$  и  $I_{cp}$  при доверительном уровне  $p = 0,05$ , определяемый значениями  $\Delta D$  и  $\Delta I$ , по формулам

$$\cos(\Delta I) = 1 - \frac{n-R}{R} \left[ \left(\frac{1}{p}\right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \right], \quad (5)$$

$$\Delta D = \frac{\Delta I}{\cos I_{cp}}. \quad (6)$$

При этом отклонение  $D_{cp}$  и  $I_{cp}$  от истинного с вероятностью 0,95 не превосходит величин  $\Delta D$  и  $\Delta I$ .

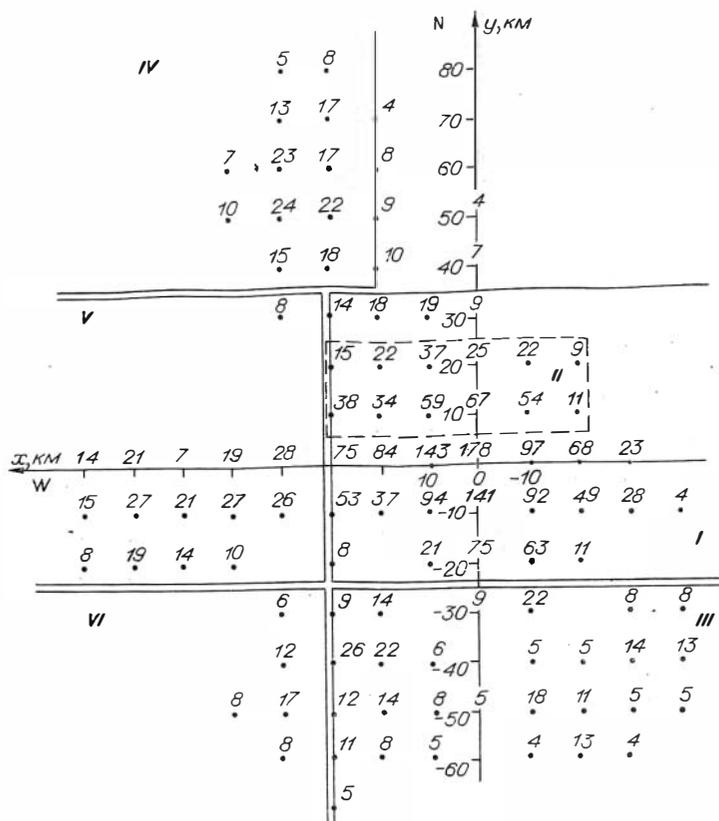


Рис. 1. Условная схема отбора образцов в районе падения Тунгусского метеорита. Число над каждой точкой означает количество включенных в обработку проб, попавших в круг радиуса 10 км с центром в данной точке. Римскими цифрами обозначены области, результаты обработки которых сведены в таблицу.

Для характеристики территориальной структуры вектора остаточной намагниченности исследуемая площадь была покрыта квадратной сеткой с шагом 10 км. Каждый узел принимался за центр окружности с радиусом 10 км, для которой определялись статистические характеристики по формулам (1)–(6) для всех проб, находящихся внутри нее. На рис. 1 изображено поле значений  $n$ , т. е. количества проб в исследуемом круге, представляющее собой условную схему отбора образцов. Значение  $n$  расположено над точкой соответствующего центра круга (узла). На рис. 2 изображено векторное поле склонений  $D$  (учитывались круговые зоны, содержащие не менее 10 образцов).

Анализ поля  $D$  показывает, что если в узлах, расположенных вблизи эпицентра взрыва Тунгусского метеорита, значения  $D_{cp}$

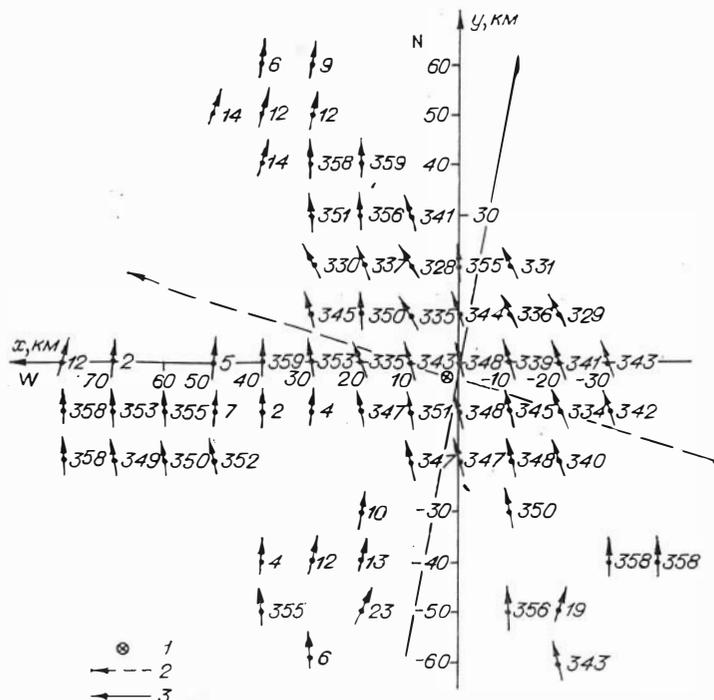


Рис. 2. Поле склонений  $D_{cp}$  — вектора остаточной намагниченности в координатной сетке север — юг, запад — восток.  
 1 — эпицентр взрыва; 2 — траектория полета Тунгусского метеорита; 3 — склонение современного геомагнитного поля в районе Подкаменной Тунгуски.

отклоняются от истинного на  $20-40^\circ$ , причем с северной, северо-восточной и восточной сторон границы этого явления остаются открытыми, то в остальных направлениях на расстоянии  $20-40$  км эти значения становятся близкими к нормальному. Исключение составляют группы проб дальних юго-востока и запада, где наблюдается слабое отклонение вектора, не превосходящее, однако, угол доверия  $\Delta D$ .

Для получения более представительных статистических оценок параметров исследуемая территория была разбита на укрупненные участки (см. рис. 1), объединяющие образцы по признаку однородности  $D$ . Результаты расчетов сведены в таблицу, из которой видно, что если на участках III—VI склонение вектора остаточной намагниченности в пределах полученного угла доверия близко к нормальному, то на участке I существует статистически достоверное отклонение последнего приблизительно на  $30^\circ$ . Более тщательный анализ поля  $D$  позволяет на фоне участка I выделить участок II с еще большим отклонением от нормального склонения ( $\sim$  на  $40^\circ$ ). Что же касается средних значений магнитных наклонений векто-

**Статистические характеристики направления вектора остаточной намагниченности для разных участков (см. рис. 1)**

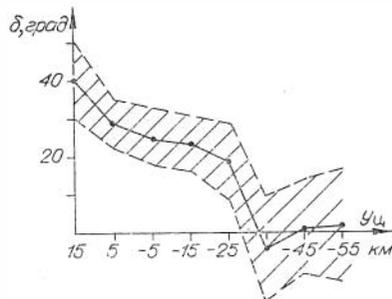
| Номер участка | Колич. образцов | $D_{\text{ср}} \pm \Delta D$ , град | $J_{\text{ср}} \pm \Delta J$ , град | Кучность |
|---------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------|
| I             | 577             | $343,5 \pm 4,6$                     | $79,3 \pm 0,9$                      | 47,7     |
| II            | 116             | $330,7 \pm 10,0$                    | $79,7 \pm 1,8$                      | 53,9     |
| III           | 80              | $8,8 \pm 9,9$                       | $74,7 \pm 2,6$                      | 38,0     |
| IV            | 67              | $10,6 \pm 11,8$                     | $79,4 \pm 2,2$                      | 65,1     |
| V             | 117             | $0,4 \pm 11,2$                      | $77,1 \pm 2,5$                      | 28,0     |
| VI            | 31              | $1,8 \pm 10,4$                      | $71,7 \pm 3,3$                      | 48,2     |

ров, то по всем участкам они близки к нормальному. Исключение представляют участки III и VI, на которых наблюдается отклонение на  $3-6^\circ$ .

Следует отметить наличие постепенного перехода аномального состояния склонения  $D$  к нормальному по мере удаления точек отбора проб от центральных областей к периферии по всем направлениям, кроме северного, северо-восточного и восточного, где границы эффекта остаются открытыми. Для иллюстрации на рис. 3 приведено изменение отклонения  $\delta = D_0 - D$  (склонение современного геомагнитного поля) при удалении к югу от области наибольшего отклонения (участок II в таблице); в качестве областей осреднения брались прямоугольные полосы с  $-30 \text{ км} \leq x \leq +30 \text{ км}$  и шириной по оси  $y$  в 20 км. Там же нанесена область доверия для  $\delta$ , построенная исходя из расчетов по формуле (6) при доверительном уровне  $p = 0,05$ . Из рис. 3 видно, что величина  $\delta$  по мере удаления участка осреднения к югу постепенно уменьшается и на расстоянии  $\sim 30$  км в пределах ошибки становится равной нулю.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что в районе падения Тунгусского метеорита в окрестности до 20 км и более от эпицентра взрыва наблюдается отклонение склонения вектора остаточной намагниченности рыхлых пород (почв). Это могло явиться результатом мощного магнитного возмущения [3], имев-

Рис. 3. Изменение значения  $\delta = D_0 - D$  при удалении к югу от зоны наибольшего отклонения (зона II, см. таблицу и рис. 1) ( $D_0$  и  $D$  — склонения геомагнитных полей — современное и среднее наблюдаемое);  $y_{\text{ц}}$  — ордината центра симметрии зоны, для которой определялась  $D$ . Заштрихована область доверия  $\delta$  с доверительным уровнем  $p = 0,05$ .



шего место при Тунгусской катастрофе. Эффект, постоянно ослабевающий, исчезает в северо-западном, западном и южном направлениях. Что касается других направлений, то для оконтуривания границ эффекта требуется дополнительная палеомагнитная съемка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бояркина А. П., Сидорас С. Д. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита. — Геол. и геофизика, 1974, № 3, с. 79—84.
2. Белоконов В. И., Кочегурова В. В., Шолпо Л. Е. Методы палеомагнитных исследований горных пород. Л., Недра, 1973. 247 с.
3. Ковалевский А. Ф. Магнитный эффект взрыва Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 187—194.
4. Сидорас С. Д., Бояркина А. П. Палеомагнитные исследования в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1971. 39 с.
5. Сидорас С. Д., Бояркина А. П. О результатах палеомагнитных исследований в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 64—73.
6. Храмов А. Н., Шолпо Л. Е. Палеомагнетизм. Л., Недра, 1967. 251 с.

### РОЛЬ ФАЗОВОГО ВЗРЫВА КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТЕОРИТОВ

М. М. МАРТЫНЮК

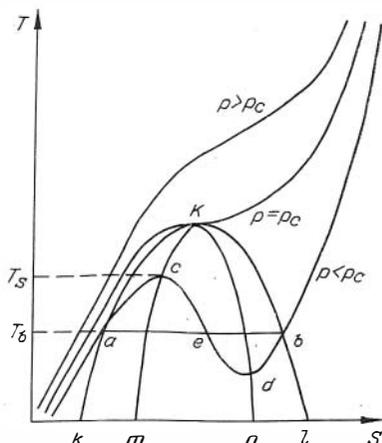
#### КИНЕТИКА ФАЗОВОГО ВЗРЫВА

При исследовании процесса абляции вещества метеорита во время его движения в атмосфере необходимо учитывать особенности фазового перехода жидкости в пар в условиях большой скорости нагрева. Для иллюстрации этих особенностей рассмотрим диаграмму состояний температура  $T$  — энтропия  $S$  для однокомпонентного вещества в области перехода (см. рисунок).

При медленном нагреве жидкости под давлением  $P$ , которое ниже критического давления  $p_c$ , переход происходит в точке кипения  $T_b$  и сопровождается скачком энтропии (отрезок  $ab$ ). Теоретически возможен непрерывный переход  $acbdb$ , который сопровождается перегревом жидкости с заходом в область метастабильной фазы  $ac$  и в область неустойчивости фазы  $ced$ . Метастабильная и неустойчивая фазы обладают избыточной свободной энергией, поэтому они взрывообразно переходят в равновесное двухфазное состояние. Такого рода переход будем называть фазовым взрывом жидкости [9].

Метастабильные и термодинамически неустойчивые состояния жидкости могут быть получены в условиях достаточно большой мощности нагрева. Это возможно благодаря тому, что за короткое время нагрева до температуры  $T > T_b$  успевает испариться лишь незначительная доля жидкости, что обусловлено сравнительно

Диаграмма состояний температура — энтропия для однокомпонентного вещества в области перехода жидкость — пар.



малой скоростью испарения. Действительно, скорость испарения определяется параметром

$$\omega = n_s \cdot \nu \cdot \exp[-\Lambda + E)/RT], \quad (1)$$

где  $n_s$  — число атомов на единице поверхности жидкости;  $\nu$  — средняя частота колебаний атомов;  $\Lambda$  — мольная теплота испарения;  $E$  — энергия активации вязкого течения жидкости;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — температура поверхности жидкости.

Скорость перемещения межфазной границы при испарении в вакуум без учета обратной конденсации равна

$$u = \frac{\alpha \omega}{n} = \frac{1}{2} \alpha c_0 \cdot \exp[-(\Lambda + E)/RT], \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент испарения ( $\alpha \leq 1$ );  $n$  — число атомов жидкости в единице объема;  $c_0$  — скорость звука в жидкости.

При равномерном нагреве жидкости до температуры  $T > T_0$  за время  $t$  со скоростью  $\varepsilon = T/t$  толщина испарившегося слоя равна

$$\delta = \int_0^t u dt = \frac{1}{2} \alpha c_0 t \cdot \frac{RT}{\Lambda + E} \cdot \exp[-(\Lambda + E)/RT]. \quad (3)$$

Эта формула может быть получена, если допустить, что  $\varepsilon = \frac{dT}{dt} = \text{const}$ , и ограничиться первым членом асимптотического разложения получающейся интегро-экспоненциальной функции при  $\frac{\Lambda + E}{RT} \gg 1$ , что выполняется в рассматриваемой области температур.

Из (2) и (3) следует, что средняя скорость перемещения межфазной границы за время нагрева равна

$$\bar{u} = \frac{\delta}{t} = u \frac{RT}{\Lambda + E}. \quad (4)$$

Представляет интерес провести оценку  $u$ ,  $\delta$ ,  $\bar{u}$  для предельной температуры  $T_s$  существования метастабильной жидкости.

Линия потери термодинамической устойчивости фазы  $mckdn$  (см. рисунок), называемая спинодалью, определяется условиями  $(\partial T/\partial S)_p = T/C_p = 0$  и  $(\partial p/\partial V)_T = 0$  ( $V$  — объем,  $C_p$  — теплоемкость при постоянном давлении). Ветвь спинодали  $mck$  яв-

ляется линией точек предельного перегрева метастабильной жидкости; экспериментальные данные для предельного перегрева органических жидкостей [11] дают возможность приближенно представить ее уравнением

$$\frac{p}{p_c} = \frac{10T}{T_c} - 9, \quad (5)$$

где  $T_c$  — критическая температура.

Модифицированное уравнение состояния Бергло [9] дает для  $T_s$  значения, близкие к (5). Из (5) следует, что при изменении  $p$  от 0 до  $p_c$  точка  $T_s$  повышается от  $0,9 \cdot T_c$  до  $T_c$ . Данные, полученные в опытах с электрическим взрывом проводников, показывают (см. ниже), что для железо-никелевых и каменных расплавов при  $p = \frac{1}{2} p_c$  можно принять приближенные значения:  $T_s = 0,95 T_c$ ;  $T_c = 7000$  К.

Для железа в нормальной точке кипения  $\Lambda = 82,2$  ккал/моль,  $E \ll \Lambda$ ,  $\Lambda/RT_s = 5,9$ ,  $\exp(-\Lambda/RT_s) = 2,74 \cdot 10^{-3}$ ; среднее значение скорости звука в температурном интервале от точки плавления до  $T_s$  примем равным  $c_0 = 2000$  м/с. Подставив эти значения в (2), при  $\alpha = 1$  получим скорость межфазной границы в точке спинодали  $u_s = 2,74$  м/с. При  $t_s = 1,96 \cdot 10^{-5}$  с (см. приведенные ниже оценки  $t_s$  по формуле (15)), согласно (3) и (4),  $\delta_s = 0,91 \cdot 10^{-3}$  см,  $\bar{u}_s = 0,46$  м/с. В реальных условиях из-за наличия обратной конденсации, меньшего значения  $\alpha$  и охлаждения поверхности в процессе испарения значения  $u_s$ ,  $\delta_s$  и  $\bar{u}_s$  должны быть намного меньше. Эти оценки показывают, что при  $t_s \leq 10^{-5}$  с вклад испарения со свободной поверхности жидкого металла при его нагреве вплоть до предельных температур существования конденсированного состояния незначительный.

Для вязких каменных расплавов скорость испарения намного меньше. Это обусловлено большим значением энергии активации вязкого течения  $E$  в формулах (1) — (4). Для расплавов некоторых минералов, например для кварца,  $E$  близко к теплоте испарения железа. Если считать, что  $E = 0,5 \Lambda$ , а значения  $\alpha$ ,  $\Lambda$ ,  $T_s$  и  $c_0$  принять такими же, как и для железа, то для вязких каменных расплавов имеем  $(\Lambda + E)/RT_s = 8,8$ ;  $\exp[-(\Lambda + E)/RT_s] = 1,51 \cdot 10^{-4}$ ;  $u_c = 15$  см/с. Оценки, выполненные ниже, показывают, что испарение каменных расплавов незначительно при  $t_s \leq 4,9 \cdot 10^{-4}$  с; из (3) и (4) следует, что при  $t_s = 4,9 \cdot 10^{-4}$  с  $\delta_s = 0,83 \cdot 10^{-3}$  см,  $\bar{u}_s = 1,7$  см/с.

В перегретой жидкости происходит образование и рост зародышей пара. При небольшом перегреве зародыши возникают на готовых центрах, например на газовых включениях. Так как число этих центров невелико, то при достаточно большой скорости парения испарением внутрь таких зародышей можно пренебречь [10]. В окрестности спинодали возможно гомогенное образование зародышей пара на флуктуациях плотности. Согласно теории Фольме-

ра — Френкеля — Зельдовича, после мгновенного перегрева жидкости до температуры  $T$  через время  $t$  частота гомогенной нуклеации равна

$$I = nB \exp(-\Delta G_c/kT) \exp(-\tau/t), \quad (6)$$

где  $\Delta G_c$  — работа образования критического зародыша;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\tau$  — время установления стационарного процесса гомогенной нуклеации;  $B$  — функция, которая в сравнении с экспоненциальными множителями слабо зависит от  $T$ .

Согласно теории Ю. Кагана [4], когда образование зародыша лимитируется только кинетикой испарения,

$$B = \alpha \left( \frac{2\sigma}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости;  $m$  — масса атома. Если рост зародыша лимитируется вязкостью  $\eta$ , то

$$B = \frac{\sigma}{\eta} \left( \frac{\sigma}{kT} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Согласно (8), для жидких металлов в окрестности спинодали  $B = 2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ; для каменных расплавов с большим значением  $\eta$  величина  $B$  должна быть на несколько порядков ниже.

Из [10] следует, что

$$\tau = \frac{\pi k T r_c^2}{\omega \sigma \Omega^2}, \quad (9)$$

где  $r_c$  — радиус критического зародыша при температуре  $T$ ;  $\Omega$  — объем на один атом в критическом зародыше пара. Для жидких металлов оценки по формуле (9) при  $T = T_s = 0,95T_c$  и данные для электрического взрыва проводников дают  $\tau = (5-10) \cdot 10^{-8} \text{ с}$ .

Переход метастабильной жидкости в двухфазное состояние без нарушения стационарности процесса гомогенной нуклеации ( $t_s \gg \gg \tau$ ) будем называть стационарным фазовым взрывом. Из (6) следует, что при  $t \gg \tau$  частота нуклеации  $I = I_0$  является весьма резкой функцией перегрева жидкости  $\Delta T = T - T_b$ . В линейном приближении для  $\Delta G_c$

$$I_0 = nB \exp(-A/\Delta T^2), \quad (10)$$

где  $A$  в окрестности спинодали можно считать постоянным. Для цезия при  $p = \frac{1}{2} p_c$  в интервале температур перегрева от 0,90 до 0,95 $T_c$   $I_0$  возрастает от 1 до  $10^{23} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ; при  $T < 0,90T_c$   $I_0 < 1$ .

Таким образом, из изложенных выше оценок следует, что при нагреве металлов за время  $t_s = 10^{-5} \text{ с}$  (скорость нагрева  $\varepsilon = 5 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^{10} \text{ К/с}$ ) испарение через свободную поверхность жидкости и испарение внутрь гетерогенных зародышей пара незначительно

вплоть до точки спинодали  $T_s$ . Для вязких каменных расплавов нижняя граница скорости нагрева, по крайней мере, на порядок ниже. В окрестности  $T_s$  резко интенсифицируется процесс гомогенной нуклеации, который в данных условиях и определяет кинетику стационарного фазового взрыва. Время распада метастабильной жидкости при  $T = T_s$ , по-видимому, сравнимо со значением характерного времени  $\tau$ .

### НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ КАК ФАЗОВЫЙ ВЗРЫВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Ценные сведения о природе фазового взрыва металлических жидкостей дают исследования электрического взрыва проводников [10]. Этот взрыв происходит при разряде через проводник конденсаторной батареи, заряженной до напряжения в несколько киловольт; взрыв в воздухе сопровождается ослепительной вспышкой света и звуком, более сильным, чем при выстреле из винтовки. Ударные волны, возникающие при взрыве проводников в воде, разрушают крепкие горные породы.

После начальной точки взрыва проводник быстро расширяется, что и вызывает возникновение ударной волны в окружающей среде; удельное сопротивление металла после этой точки возрастет на несколько порядков. Осциллографические измерения энтальпии и сопротивления показали, что в этой точке жидкий металл находится в метастабильном состоянии при температуре  $T_s$ , намного превышающей его нормальную температуру кипения  $T_k$ . При дальнейшем нагреве происходит взрывное закипание перегретого жидкого металла в окрестности спинодали вследствие бурного развития процесса гомогенной нуклеации.

Резкое увеличение удельного сопротивления жидкой ртути на линии насыщения начинается при температуре  $T_s = 0,80 T_c$  [6]. Если такое соотношение выполняется и для других металлов, оно дает возможность определить критическую температуру металла по данным для электрического взрыва проводников. Значение  $T_s$  может быть рассчитано по энтальпии металла в начальной точке его электрического взрыва и по его теплоемкости [8, 9].

Для значений  $T_c$  четырнадцати металлов, рассчитанных таким методом, а также для  $T_c$  щелочных металлов и ртути справедливо выражение

$$T_c = a + b\Lambda_0, \quad (11)$$

где  $\Lambda_0$  — теплота сублимации металла при  $T = 0$ . Уточненные в сравнении с [8] значения коэффициентов в (11) равны:  $a = 860$  К,  $b = 63$  моль К/ккал. Соотношение (11) дает возможность рассчитывать  $T_c$  для любого металла по данным  $\Lambda_0$ . Из него, в частности, следует, что  $T_c$  равна: для железа — 7080 К, никеля — 7310 К, кремния — 7650 К. Значения  $T_c$  для этих элементов незначительно

отличаются друг от друга, поэтому для железо-никелевых и каменных метеоритов можно принять среднее значение  $T_c = 7350 \text{ К}$  и соответствующее ему значение точки спинодали  $T_s = 0,95 \cdot T_c = 7000 \text{ К}$  для  $p = \frac{1}{2} p_c$ . Такое значение нами было использовано для оценок различных величин, характеризующих нагрев метеоритов (см. первый раздел статьи).

### ФАЗОВЗРЫВНАЯ АБЛЯЦИЯ НЕПРОЗРАЧНЫХ МЕТЕОРИТОВ

Рассмотрим простейшую схему, моделирующую процесс нагрева приповерхностного слоя метеорита при его движении в атмосфере. Пусть тепло, возникающее при торможении метеорита, передается в этом слое только по механизму теплопроводности, тогда для нагрева поверхности от  $T = 0$  до  $T = T_s$  за малое время  $t_s$ , для которого испарением с поверхности можно пренебречь, необходима плотность потока энергии [5]

$$q_s = T_s \cdot \bar{c}_p \bar{D} \cdot \left( \frac{\pi \kappa}{4 t_s} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

где  $\bar{C}_p$  и  $\bar{D}$  — средние значения удельной теплоемкости и плотности вещества метеорита;  $\kappa$  — температуропроводность этого вещества; величина  $T_s \cdot \bar{C}_p \cdot \bar{D}$  — плотность энтальпии при  $T = T_s$ . Скорость прогрева приповерхностного слоя определяется выражением  $(\kappa/t_s)^{1/2}$ ; глубина прогрева, на которой температура экспоненциально понижается в  $l$  раз, равна

$$a_s^1 = (\kappa \cdot t_s)^{1/2}. \quad (13)$$

Испарение приводит к понижению температуры поверхности, поэтому максимум температуры будет находиться внутри приповерхностного слоя. При установившемся режиме испарения в окрестности спинодали глубина прогретого слоя определяется отношением

$$a_s = \kappa/u_s. \quad (14)$$

Для железа  $\kappa = 0,25 \text{ см}^2/\text{с}$ , поэтому  $a_s = 0,91 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ . Значение  $\kappa$  для каменных расплавов оценим по данным для окиси кремния при  $T = 1200 \text{ К}$ :  $C_p = 1,66 \text{ Дж/г} \cdot \text{К}$ ,  $D = 2,4 \text{ г/см}^3$ , теплопроводность  $k = 0,05 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$ , что дает  $\kappa = k/(C_p D) = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$  и  $a_s = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ .

Следует заметить, что толщина слоя в  $10^{-3}$  вполне достаточна для реализации в нем процесса гомогенной нуклеации в окрестности спинодали, так как радиус критического зародыша в этом случае, по крайней мере, на три порядка меньше и составляет примерно  $5 \cdot 10^{-7} \text{ см}$ .

При  $q < q_s$  максимальная температура в слое меньше  $T_s$ , и слой разрушается посредством испарения. Фазовзрывной ме-

механизм разрушения вступит в силу при таком значении  $q = q_s^*$ , которому соответствуют  $t = t_s^*$  и толщина испарившегося слоя  $\delta_s = \delta_s^*$ , равная примерно  $a_s^*$ . Из этого условия находим характерное время нагрева  $t_s^*$ , при котором один механизм сменяется другим:

$$t_s^* = \frac{\kappa}{u_s^2} \cdot \frac{\Lambda + E}{RT_s}. \quad (15)$$

Из (13) следует, что для железа  $t_s^* = 1,96 \cdot 10^{-5}$  с; для вязких расплавов ( $E = 0,5 \text{ \AA}$ )  $t_s^* = 4,9 \cdot 10^{-4}$  с.

Значение  $q_s^*$  равно сумме двух потоков: потока  $q_1 = H_s a_s^* \bar{D} / t_s^*$ , затраченного на фазовзрывное разрушение слоя  $a_s^*$ , и потока  $q_2 = \Lambda \bar{D} a_s^* / t_s^*$ , затраченного на испарение такого же слоя ( $\Lambda$  — удельная теплота сублимации,  $H_s$  — удельная энтальпия жидкой фазы при  $T = T_s$ ). Для расплава железа  $C_p = 0,19$  кал/г,  $D = 7$  г/см<sup>3</sup>,  $\Lambda = 1,77$  ккал/г,  $\Lambda/H_s = 1,3$ , поэтому  $q_2 = 2,4 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $q_1 = 1,9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>,  $q_2 = 4,3 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для вязких каменных расплавов аналогичные оценки дают  $q_s^* = 0,72 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, что в 60 раз ниже, чем для железа.

При постоянном значении  $q_s > q_s^*$  режим фазовзрывного разрушения метеоритов должен иметь пульсирующий характер: после взрыва слоя толщины  $a_s$  прогревается следующий слой такой же толщины и взрывается через время  $t_s \leq t_s^*$ . Средняя линейная скорость этого процесса равна

$$\bar{u}_f = \frac{\kappa}{u_s \cdot t_s}. \quad (16)$$

Для железа при  $t_s = 10^{-8}$  с  $q_s = 1,7 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\bar{u}_f = 900$  м/с.

Средняя плотность потока энергии, которая идет на нагревание передней части невращающегося метеорита, составляет [7]

$$q = \frac{1}{2} \beta \rho v^3, \quad (17)$$

где  $\beta$  — коэффициент теплопередачи;  $v$  — скорость метеорита;  $\rho$  — плотность воздуха, являющаяся экспоненциальной функцией высоты  $h$ :

$$\rho = \rho_0 \exp(-h/h_0), \quad (18)$$

где, согласно [7],  $\rho_0 = 1,6$  кг/м<sup>3</sup>,  $h_0 = 7$  км.

Условие, определяющее фазовзрывной механизм разрушения приповерхностного слоя метеорита, состоит в выполнении неравенства  $q \geq q_s^*$ , которое с помощью формул (17) и (18) может быть представлено в виде

$$\ln v \geq \frac{h}{3h_0} + K, \quad (19)$$

где

$$K = \frac{1}{3} \ln \left( \frac{2q_s^*}{\beta \cdot \rho_0} \right).$$

## Высота и скорость движения метеорита, при которых испарительный механизм разрушения сменялся фазовзрывным механизмом

| h, км | V, км/с  |   | h, км | V, км/с  |   |
|-------|--|---|-------|--|---|
|       | железный метеорит<br>*<br>( $q_s^* = 4,3 \cdot 10^6$<br>Вт/см <sup>2</sup> ,<br>$\beta = 0,15$ ) | каменный метеорит<br>*<br>( $q_s^* = 0,72 \cdot 10^6$<br>Вт/см <sup>2</sup> ,<br>$\beta = 0,15$ ) |       | железный метеорит<br>*<br>( $q_s^* = 4,3 \cdot 10^6$<br>Вт/см <sup>2</sup> ,<br>$\beta = 0,15$ ) | каменный метеорит<br>*<br>( $q_s^* = 0,72 \cdot 10^6$<br>Вт/см <sup>2</sup> ,<br>$\beta = 0,15$ ) |
| 0     | 6,86   | 1,82  | 30    | 28,6   | 7,58  |
| 5     | 8,75   | 2,30  | 35    | 36,3   | 9,60  |
| 10    | 11,1   | 2,93  | 40    | 46,2   | 12,2  |
| 15    | 14,0   | 3,71  | 45    | 58,6   | 15,5  |
| 20    | 17,8   | 4,72  | 50    | 74,3   | 19,7  |
| 25    | 22,5   | 5,97  |       |  |   |

Для расчетов по формуле (19) необходимо знание коэффициента теплопередачи  $\beta$ . В [7] для  $\beta$  рекомендуются следующие значения: для тел размером порядка 1 см  $\beta = 0,15$ , для тел меньших размеров  $\beta$  больше. С учетом этих рекомендаций нами рассчитаны минимальные значения  $v$  как функции  $h$  при выполнении равенства в условии (19) (см. таблицу). Расчет показывает, что фазовзрывное разрушение каменных метеоритов достигается при меньших скоростях полета, чем железных.

При движении метеорита со скоростью, удовлетворяющей условию (19), в воздухе возникает ударная баллистическая волна, на которую должны накладываться ударные волны, генерируемые пульсирующим фазовзрывным разрушением приповерхностного слоя. Минимальное значение частоты пульсаций  $1/l_s^*$  в суммарной ударной волне равно 50 кГц для железных метеоритов и 2 кГц для каменных. В конечной точке траектории может произойти практически точечный фазовый взрыв оставшейся части метеорита. Такой взрыв легче реализуется для каменных вязких метеоритов, которые дробятся на конечном участке траектории на части, радиус которых сравним с глубиной прогрева приповерхностного слоя. Условия для такого взрыва особенно благоприятны в случае метеоритов, состоящих из полупрозрачных пород. Точечным фазовым взрывом космического вещества, по-видимому, можно объяснить часто наблюдаемый взрыв болидов в конечной точке их траектории.

### ВЗРЫВ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА КАК ФАЗОВЫЙ ВЗРЫВ КОСМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Карта вывала леса в районе взрыва Тунгусского метеорита показывает, что основные разрушения в тайге были произведены действием сильной ударной сферической волны, порожденной взрывом, близким к точечному взрыву; действие ударной баллистической волны проявилось в гораздо меньшей степени. Автором данной статьи была выдвинута гипотеза [8] о том, что взрыв Тунгусского

метеорита в основном определялся фазовым взрывом вещества, который произошел на конечном небольшом участке траектории полета космического тела.

Для обоснования этой гипотезы важное значение имеют данные о свойствах «метеоритных шариков», найденных в слоях торфа, относящихся к 1908 г., в районе взрыва. Исследования показали [1, 2], что большинство этих шариков имеют размер  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  см и состоят из прозрачного стекловидного вещества, основными компонентами которого являются  $\text{SiO}_2$  (65—76%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4—14%) и  $\text{Na}_2\text{O}$  (11—14%); многие шарики содержат сферические полости. Можно ожидать, что эти шарики образовались вследствие фазового взрыва вещества метеорита.

Состав метеоритных шариков [2] и сравнительно небольшая высота взрыва дают основание считать, что метеорит перед входом в атмосферу представлял собой монолит или совокупность крупных тел, обладающих хорошей прозрачностью для светового излучения и большой вязкостью расплава. При начальной скорости в несколько десятков километров в секунду метеорит уже на высоте 80 км создал в атмосфере сильную ударную баллистическую волну с температурой на фронте более  $10^5\text{K}$  [12]. Ультрафиолетовое и видимое излучение фронта волны, проникая в глубь вещества метеорита, производило объемный нагрев его приповерхностного слоя. Глубину прогрева можно определить по толщине слоя  $d$ , в котором поглощается половина лучистого потока энергии. В ультрафиолетовой области для плавленного и кристаллического кварца ( $\text{SiO}_2$ )  $d = 5-10$  мм, для корунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  $d = 1$  мм; это дает основание принять для вещества метеорита значение  $d = 1-5$  мм. При малой плотности лучистого потока энергии расплавленный слой толщины  $d$  разрушался под действием аэродинамических нагрузок и обычного кипения. При плотностях, превышающих критическое значение, происходил периодический фазовый взрыв приповерхностного слоя. Длительность циклов пульсирующего фазового взрыва  $t_s = q_s / H_s \bar{D} d$  для прозрачного Тунгусского космического тела намного больше, чем для железных или каменных метеоритов, и при плотности лучистого потока  $q_s = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> составляла около 0,1 с. За такое время при средней скорости испарения  $\bar{u}_s = 1,7$  см/с испарится слой вещества  $d = 1,7$  мм, сравнимый с  $d$  при больших плотностях потока  $\delta_s < d$ .

Каждый цикл взрыва порождал в теле метеорита сильную, сходящуюся к центру ударную волну, под действием которой происходило интенсивное дробление остальной твердой массы. Мелкие кусочки и капли отставали от основной массы метеоритного вещества; крупные куски продолжали движение в более плотных слоях атмосферы и дробились под действием последующих циклов фазового взрыва. Когда средний радиус частиц достиг значения  $r = 2d = 2-10$  мм, оставшаяся масса метеорита полностью взорвалась по фазовзрывному механизму, причем взрыв был близким к точечному.

Энерговыведение при фазовом взрыве вещества определяется избыточной энтальпией метастабильной фазы  $H_s - H_b$ , равной разности энтальпии жидких фаз в точке спинодали  $H_s$  и в нормальной точке кипения  $H_b$  [9]. Для железа  $T_b = 3135$  К,  $T_s = 7000$  К, теплоемкость жидкой фазы  $C_p = 46$  Дж/моль·К, поэтому  $H_s = H_b = 176$  кДж/моль =  $3,15$  кДж/г =  $22$  кДж/см<sup>3</sup>. Для SiO<sub>2</sub> при таком же температурном интервале перегрева  $T_s - T_b$  и  $C_p = 73$  Дж/моль·К  $H_s - H_b = 282$  кДж/моль =  $6,42$  кДж/г =  $7,1$  кДж/см<sup>3</sup>. В обоих случаях энерговыведение, рассчитанное на единицу объема, превышает тепловой эффект при взрыве тротила ( $6$  кДж/см<sup>3</sup>). Полная энергия Тунгусского взрыва, рассчитанная по разрушительному действию ударной сферической волны [3], составляет  $(3-5) \cdot 10^{23}$  эрг. При удельном энерговыведении в  $6,42$  кДж/г масса вещества, взорвавшегося на конечном участке траектории движения метеорита, составляет  $(5-8) \cdot 10^6$  т.

Так как для железа и окиси кремния избыточная энтальпия примерно вдвое меньше теплоты испарения, то после завершения фазового взрыва вещество испарилось лишь наполовину, а оставшая масса диспергировалась на мелкие капельки вследствие большой интенсивности зародышей пара. Если на конечном участке траектории полета метеорит обладал еще достаточно большой скоростью, то доля мелкодисперсной жидкой фазы меньше, так как капельки частично испарились за счет собственной кинетической энергии.

Возникший в результате взрыва вещества метеорита пар с начальной температурой около  $7000$  К и плотностью, составляющей примерно десятую часть от плотности конденсированной фазы, быстро расширялся, что привело к образованию мощной ударной волны, приведшей к основным разрушениям в тайге. Раскаленный фронт этой волны и потоки горячих паров метеоритного вещества вызвали ожоги деревьев.

При большой степени расширения пары охлаждались и конденсировались. В случае достаточно быстрого расширения достигается практически предельное переохлаждение и зародыши жидкости возникают на флуктуациях плотности; размер критического зародыша в этих условиях составляет около  $10^{-6}$  см. Таким образом, в результате взрыва Тунгусского метеорита должны возникнуть «метеоритные шарики» двух типов: шарики, полученные при диспергировании жидкой фазы, и шарики, полученные при конденсации пара. Найденные в районе падения метеорита шарики размером  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  см, по-видимому, относятся к шарикам первого рода; прямым доказательством этого служит наличие в них сферических пустот, которые могли образоваться в кипящей жидкости в процессе ее взрыва. Шарик, возникший из паровой фазы, должны иметь меньшие размеры. Их, по-видимому, следует искать за пределами вывала леса, куда они могли быть снесены ветром.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Н. В., Львов Ю. А., Вронский Б. И. и др. Поиски мелкодисперсного космического вещества в торфах района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 141—146.
2. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Состав микросферул из торфов района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 32. М., Наука, 1973, с. 147—149.
3. Иванов К. Г. Об энергии Тунгусского метеорита. — В кн.: Метеоритика. Вып. 21. М., Наука, 1961, с. 44—45.
4. Каган Ю. Кинетика гомогенной нуклеации в перегретой жидкости. — Ж. физ. химии, 1960, т. 34, № 1, с. 92—101.
5. Карлслю Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., Наука, 1964. 470 с.
6. Кикоин И. К., Сенченков А. П. Электропроводность и управление состоянием ртути в области температур 0—2000°C и давлений 200—5000 атмосфер. — Физика металлов и металловедение, 1967, т. 24, вып. 5, с. 813—858.
7. Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе. М., Изд-во АН СССР, 1956. 293 с.
8. Мартынюк М. М. Взрывной переход жидкости в пар. — В кн.: Проблемы статистической физики и теории поля. М., 1976, с. 37—50.
9. Мартынюк М. М. Фазовый взрыв метастабильной жидкости. — Физика горения и взрыва, 1977, т. 13, № 2, с. 4—21.
10. Мартынюк М. М., Цапков В. И., Пантелейчук О. Г., Каримходжаев И. Исследование физических свойств металлов методом импульсного нагрева. М., 1972. 28 с.
11. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М., Наука, 1972. 94 с.
12. Станюкович К. П., Шалпмов В. П. О движении метеорных тел в атмосфере Земли. — В кн.: Метеоритика. Вып. 20. М., Наука, 1960, с. 54—71.

### ТУНГУССКАЯ КАТАСТРОФА 1908 г. В СВЕТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ МЕТЕОРНЫХ ЯВЛЕНИЙ \*

*В. Ф. СОЛЯНИК*

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Причины возникновения свечения метеорных тел на высотах  $H \geq 150$  км в рамках физической теории метеорных явлений до сих пор не вполне ясны.

В зоне свободно-молекулярного режима, где плотность воздуха  $\rho \leq 10^{-9}\rho_0$ , аэродинамические эффекты и ударные волны возникнуть не могут.

Заслуживают внимания следующие факты:

- 1) диаметр «световой шапки» метеорного тела на 2 порядка больше диаметра самого тела;
- 2) летящее метеорное тело оставляет за собой высокоионизированный проводящий след с большим содержанием слабо рекомбинирующих свободных электронов ( $n \geq 10^9$  эл/см<sup>3</sup>);

\* Статья печатается в дискуссионном порядке.

3) нередко отмечаются повторные вспышки метеоров на трассе полета, их распад и дробление;

4) среди каменных метеоритов встречаются так называемые ахондриты (с малым содержанием металлов), которые не имеют ни регмаглиптов, ни характерной коры плавления и падают на Землю довольно спокойно, хотя и вторгаются в ее атмосферу со скоростью не менее 12 км/с. Отсюда видно, что аэродинамическое воздействие воздуха на такие тела незначительно;

5) фотографии метеоров, снятые с обтюратором, ясно показывают, что резкого торможения, а следовательно, и большой силы сопротивления воздуха фактически нет;

6) при вторжении на Землю крупных железных метеорных тел происходит их интенсивное дробление на трассе полета (примером служит Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь). Несложные расчеты показывают, что дробление вязких железоникелевых метеорных тел с пределом прочности  $\sigma_{\text{п}} = 4500 \text{ кг/см}^2$  при реальных скоростях движения никак не может быть вызвано аэродинамическими силами [8]. Тем не менее происходит дробление таких тел;

7) существуют так называемые электрофонные болиды и связанные с ними метеороэлектрические явления, описанные в работе И. С. Астаповича [1], что свидетельствует о некоторых зарядах таких тел.

Эти, а также другие факты, на которых здесь нет возможности останавливаться, дают основания для привлечения теории электричества к рассмотрению метеорной проблемы.

Если допустить, что свечение метеорных тел в зоне свободно-молекулярного режима обусловлено их зарядом, то, полагая тело шаром со «световой шапкой» на внешней стороне (в дальнейшем будем называть ее короной тела), для отчетливой видимости короны напряженность поля должна быть порядка  $E = 10^2 \div 10^4 \text{ В/см}$  (в зависимости от плотности окружающей среды). Исходя из закона Кулона, получаем, что у поверхности тела напряженность поля должна быть порядка  $10^6 \div 10^8 \text{ В/см}$ . Такая высокая напряженность поля в глубоком вакууме в принципе достижима, так как напряжение пробоя составляет здесь  $\geq 10^6 \text{ В/см}$  [15]. Но при такой напряженности развивается автоэлектронная, вторичная электронная эмиссия, и очень похоже, что имеет место даже взрывной характер электронной эмиссии, недавно открытый томскими исследователями [17].

Скорость движения метеорных тел в высоких слоях атмосферы  $v$  существенно больше 5 км/с. Этого достаточно, чтобы преодолеть потенциальный барьер и вызвать ударами налетающих на тело молекул воздуха выбивание внешних электронов с поверхности тела, что ведет к положительному зарядению тела. Так как отрицательное электрическое поле Земли (хотя и малое) существует и на больших высотах, то рождающийся след метеорного тела в таком поле ведет к усилению зарядения самого тела.

При вторжении метеорного тела все механизмы заряжения тела действуют в одном направлении, и тело оказывается заряженным положительно. Этого могло бы и не быть при выходе тела из атмосферы. Заметим, что напряженность порядка  $10^8$  В/см является для прочных железных метеорных тел предельной, так как пондеромоторные силы поля взрывают при этом тело подобно бомбе. Далее это будет показано более подробно.

Косвенным подтверждением весьма высокой напряженности поля у поверхности железного (по спектральным данным) метеорного тела является след тела. Замечая, что всякий процесс заряжения тела есть разделение разноименных зарядов, полагая, как минимум, плотность свободных электронов в следе  $n = = 10^9$  эл/см<sup>3</sup> [7] и исходя из закона сохранения заряда, получим, что даже 0,01 % свободных электронов в следе, выбитых из поверхности тела, достаточно для обеспечения предельного положительного заряжения тела. Само метеорное тело и активная часть его следа являются, по существу, своеобразным электрическим диполем.

Отсюда следует, что ряд проблем, не нашедших решения в рамках современной теории метеоров и аэродинамики, получает простое и естественное объяснение в свете электрической картины метеорных явлений. Оказывается, что и многие другие факты, не затронутые здесь и кажущиеся загадочными (например, появление неймановых линий в структуре железных метеоритов), становятся очевидными при новом подходе к проблеме.

Итак, решающими для снятия ряда трудностей и противоречий в теории метеоров являются не аэродинамические, а электрические процессы. На необходимость учета электрической природы метеорных явлений автор обратил внимание специалистов в своем выступлении на пленуме Астросовета АН СССР еще в 1951 г. [2].

Позднее [12, 13] автором сделана попытка объяснить Тунгусскую катастрофу 1908 г. с электрической точки зрения. Однако в то время еще не было достаточных данных для превращения гипотезы в теорию, способную разрешить ряд вопросов и противоречий, накопившихся в метеорной астрономии, и это делается автором в настоящей работе.

### НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Делаются следующие допущения.

1. Метеорное тело рассматривается как однородное, изотропное тело шаровой формы.

2. Земная поверхность на площади в несколько квадратных километров рассматривается как проводящая плоскость.

3. Поле индуцированных отрицательных зарядов на земной поверхности (с момента начала фазы разряда между метеорным телом и Землей) рассматривается как поле, обусловленное поло-

жительным точечным зарядом (головной части потока тел) на высоте  $h_k$ , км.

4. Поскольку скорость метеорного тела  $v \ll c$ , магнитное поле зарядов не учитывается.

Приняты всесистемные единицы, в которых результаты выглядят более ощутимо и привычно:  $\rho$  — расстояние на земной поверхности, км;  $E$  — напряженность электрического поля, В/см;  $Q$  — заряд тела или потока тел, Кул;  $Q_0$  — исходный заряд первичного тела, Кул;  $R$  — радиус тела, м;  $\sigma_{\text{п}}$  — предел прочности вещества тела, кг/см<sup>2</sup>;  $h_k$  — высота тела над земной поверхностью в момент начала разряда, км;  $F$  — сила взаимодействия метеорного тела с Землей в момент нахождения его на высоте  $h_k$ , кг;  $W$  — собственная электрическая энергия тела, эрг;  $W_0$  — удельная электрическая энергия, приходящаяся на грамм веса, эрг/г.

Ниже приводятся некоторые формулы, необходимые для анализа Тунгусской катастрофы 1908 г. Они получены на основе формул электростатики, имеющих в книге И. Е. Тамма [14].

Предельная напряженность электрического поля у поверхности метеорного тела определяется только пределом прочности вещества метеорного тела на разрыв  $\sigma_{\text{п}}$ . Как известно, пондеромоторные силы электрического поля действуют по внешней нормали к поверхности электрически заряженного тела (независимо от знака заряда) и стремятся растянуть и разорвать тело.

Из теории упругости следует, что если к телу по всей поверхности приложены одинаковые растягивающие нормальные напряжения  $\sigma$ , то внутри него напряжения будут такими же, т. е. напряженное состояние тела оказывается однородным. Отсюда следует, что когда  $\sigma = \sigma_{\text{п}}$ , тело неизбежно взрывается. Это относится не только к шаровому телу, но и к любому телу выпуклой формы [16].

Максимально допустимая напряженность электрического поля у поверхности тела определяется формулой

$$E_m = 1,49 \cdot 10^9 \sqrt{\sigma_{\text{п}}} \quad (1)$$

Предельный заряд  $Q_m$ , который можно сообщить телу, до его разрушения равен:

$$Q_m = \frac{1}{9} \cdot 10^{-7} \cdot E_m R^2. \quad (2)$$

Собственная электрическая энергия такого заряженного тела составляет

$$W = 1,23 \cdot 10^{13} \sigma_{\text{п}} R^3. \quad (3)$$

Удельная электрическая энергия  $W_0$  равна:

а) для железного метеорного тела при  $\sigma_{\text{п}} = 4500$  кг/см<sup>2</sup>,  $E = 10^9$  В/см

$$W_0 = 1,7 \cdot 10^9 \text{ эрг/г}, \quad (4)$$

т. е. она сопоставима с удельной энергией обычных взрывчатых веществ типа тротила;

б) для каменного метеорного тела ввиду его незначительной механической прочности на разрыв  $E_m \leq 10^7$  В/см, а  $W_0$  примерно на 2 порядка меньше, чем у железного тела.

Рассмотрим пример. Пусть имеется железное метеорное тело, для которого  $\sigma_{\text{п}} = 4500$  кг/см<sup>2</sup> (как у Сихотэ-Алинского метеорита) и радиус  $R = 1$  м. Вес такого тела будет около 32 т,  $E_m = 10^8$  В/см. Тогда  $Q_m = 1,1$  Кул, а  $W = 5,5 \cdot 10^{16}$  эрг. Обращают на себя внимание кажущийся незначительным максимальный заряд и очень большая собственная электрическая энергия заряженного тела.

Когда достигается максимальная напряженность поля у поверхности тела и оно взрывается, мгновенно падает и напряженность поля. Если тело при дальнейшем движении вновь взрывается, то, очевидно, действуют механизмы заряжения, доводящие тело вновь до предельно напряженного состояния. Мы видели ранее, что такие механизмы заряжения существуют, так как только они способны вызвать интенсивное и непрерывное дробление прочных железо-никелевых метеорных тел на трассе их полета (как это было, например, с Сихотэ-Алинским метеоритом).

Можно показать, что при таком дроблении общий заряд потока тел непрерывно растет. Величина этого заряда  $Q$  определяется формулой

$$Q = \alpha Q_0, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент возрастания заряда тела при дроблении. Этот коэффициент может быть найден из анализа конкретных случаев падения метеоритов или оценен на базе чисто теоретических соображений о скорости нарастания заряда при исследовании повторных вспышек метеоров.

Электрическая энергия потока частей сохранялась бы неизменной, если бы не происходило непрерывное рассеивание массы первичного тела. Фактически собственная энергия потока тел очень быстро убывает во времени. Расчеты показывают, что при непрерывном дроблении первичного тела потенциал, а следовательно, и напряженность поля в некоторой окрестности потока непрерывно убывают. Это означает, что диаметр короны тела при его дроблении непрерывно уменьшается по мере приближения тела к Земле.

Область индуцированных на земной поверхности зарядов, где напряженность поля может достигать пробойного значения  $E = 3 \cdot 10^4$  В/см и быть больше ее, назовем «пятном напряженности». «Пятно напряженности» перемещается вместе с метеорным телом. Если траектория полета метеорного тела — пологая кривая, то скорость перемещения «пятна» и скорость тела мало отличаются друг от друга.

При вертикальном падении метеорита «пятно напряженности» как бы застывает на месте, но диаметр его растет.

В последнем случае при падениях крупных железных метеоритов неизбежно возникновение электроэрозионным путем метеоритных кратеров на земной поверхности до непосредственного контакта тел с Землей.

Критическая высота  $h_k$  тела над земной поверхностью, при которой начинает развиваться лавинный разряд между телом и Землей, находится из формулы

$$h_k = \sqrt{\frac{180 \cdot Q}{E_1}}, \quad (6)$$

где  $E_1$  — напряженность индуцированного поля в центре «пятна напряженности» в начальный момент развития пробоя.  $E_1 = 3 \cdot 10^4$  В/см для сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении. Не следует думать, что как только достигнута эта напряженность и начинается пробой, дальше напряженность не растет. Напряженность должна расти обязательно до тех пор, пока не закончится обменный процесс между зарядами. Весь этот процесс длится малые доли секунды, но он неизбежно должен иметь место, иначе мы не можем понять механизма эрозии при электрической обработке металлов [5].

Сила взаимодействия головной части потока тел с Землей на высоте  $h_k$  находится по закону зеркального отображения из формулы

$$F = 918 \cdot \frac{Q^2}{4h_k^3}. \quad (7)$$

Когда начинается обменный процесс между зарядами и их нейтрализация, силы электростатического взаимодействия этих зарядов, связанных с Землей и телом, могут достигать фантастических значений. В них и скрыта суть дела, равно как и ответ на вопрос, почему никакие сколь угодно прочные металлы не способны противостоять электрической эрозии при разряде.

Для оценки заряда диаметра возникающего на земле кратера или оценки «пятна напряженности» приводим формулу

$$Q = 1,43 \cdot 10^{-2} \cdot E \cdot \rho^2, \quad (8)$$

где  $\rho$  — расстояние от центра «пятна напряженности» до заданной точки, км;  $E$  — максимальное значение напряженности индуцированного на Земле поля на заданном расстоянии  $\rho$ ;  $Q$  — суммарный заряд потока головной части метеорных тел.

#### АНАЛИЗ ТУНГУССКОЙ КАТАСТРОФЫ 1908 г.

Весьма важное описание своеобразного ожога леса в зоне катастрофы приведено в книге Е. Л. Кримова [6]. Е. Л. Кримова является одним из первых исследователей зоны катастрофы, который вместе с Л. А. Куликом еще в 1929 г. видел обстановку на месте, т. е. в наиболее ранний период исследований в этой

зоне. Он так описывает виденное им: «Самая же характерная особенность ожога ..., состоит в том, что на всех концах обломанных ветвей у сухостоя всегда имеется уголек, причем самый излом всегда направлен книзу и идет косо. В результате обломанный конец ветки с угольком на нем имеет своеобразный вид, напоминающий по определению Л. А. Кулика «птичий коготок» (с. 170).

В другом месте Е. Л. Кривов подчеркивает, что ожог был мгновенным и не вызвал лесного пожара, иначе не могли бы сохраниться тончайшие сучки с угольком на конце.

Для дальнейшего очень важна работа Н. В. Васильева и Ю. А. Львова [3], где устанавливается, что радиус полосы ожога в направлении полета тела вдвое больше, чем в перпендикулярном направлении.

Очень интересные данные приводятся в сборнике работ томских исследователей (КСЭ) [9].

Заметим, что ожог «птичий коготок» должен быть отчетливо виден не в центре катастрофы, а на расстоянии в 5—6 км в направлении, перпендикулярном к вертикальной плоскости полета тела. В центральной зоне разрушений картина очень сложна, здесь ее серьезно мог исказить пожар.

Из приведенного описания ожога, данного Е. Л. Кривовым, вытекает, что такой ожог леса мог быть результатом местного электрического пробоя, который нельзя смешивать с лавинным пробоем в центральной зоне катастрофы.

Так как при полете заряженного положительно тела на земной поверхности индуцируются отрицательные заряды, то концы веток по отношению к земле являются анодом, и напряженность поля здесь еще выше, чем у земли. Когда начинается местный пробой, возникают пондеромоторные силы, стремящиеся пригнуть к земле ветки деревьев. Во время пробоя анод страдает больше всего, концы веток обламываются, и на них возникает уголек со стороны земли. Когда пробой заканчивается, ветки возвращаются в исходное положение и уголек оказывается расположенным косо и имеющим вид «птичьего коготка». Но для того, чтобы это стало возможным, нужно время, существенно большее, чем при обычном разряде, который длится малые доли секунды. Обычный разряд мог бы вызвать только свечение.

Оценим теперь время местного пробоя. Найдем величину заряда метеорного тела из формулы (8). Полагая на границе ожога  $\rho = 7,5$  км,  $E = 3 \cdot 10^4$  В/см, получим  $Q = 2,4 \cdot 10^4$  Кул. Это весьма большой заряд, для размещения которого потребовалось бы тело непомерных размеров.

Так, если бы это был железный метеорит такой же прочности, как Сихотэ-Алинский, то  $E = 10^8$  В/см и радиус тела из формулы (2) оказался бы равным  $R = 147$  м. Так как диаметр короны на 2 порядка больше самого тела, то он оказался бы около 30 км, что совершенно нереально.

Для каменного метеорита при  $E = 10^7$  В/см радиус тела должен быть равным 465 м, что также нереально. Итак, метеорит не мог быть целым, ни каменным, ни железным, но он мог быть сильно раздробившимся железным метеоритом. Обязательно железным он должен быть потому, что каменный метеорит не мог бы выделить той энергии, которая фактически выделилась в зоне катастрофы.

Коэффициент возрастания заряда при дроблении  $\alpha$  был определен автором на основе материалов, содержащихся в сборниках [10, 11], подробно освещающих обстановку падения и морфологические особенности воронок, кратеров и веществ Сихотэ-Алинского метеорита; он оказался равным  $2 \cdot 10^2$ .

Учитывая, что время, в течение которого наблюдался Сихотэ-Алинский метеорит с момента его «возгорания» (диаметр короны мгновенно возрос в 100 раз, примерно на высоте 40 км) до падения, и время, в течение которого был виден Тунгусский метеорит (до разряда над центром катастрофы), сопоставимы, можно положить в данном случае  $\alpha = 200$ . Тогда из формулы (5) получим исходный заряд первичного эквивалентного тела Тунгусского метеорита до его распада,  $Q_0 = 1,2 \cdot 10^2$  Кул. Так как железный метеорит должен был весьма интенсивно дробиться в воздухе, то предельно напряженное состояние тела было достигнуто.

Полагая  $E = 10^8$  В/см, получим из (2) радиус тела  $R = 10,4$  м. При  $\gamma = 7860$  кг/м<sup>3</sup> вес такого тела составит около 40 000 т.

Собственная электрическая энергия тела находится из формулы (3) и составляет  $6,8 \cdot 10^{19}$  эрг, или округленно  $10^{20}$  эрг. Однако это далеко не полная энергия, выделившаяся при разряде. Чтобы показать, в чем же здесь дело, необходимо представить себе картину состояния движущегося тела. Удержать заряд на теле диаметром свыше 20 м и иметь при этом напряженность поля у поверхности тела  $10^8$  В/см в стационарном состоянии совершенно невозможно. Это может быть достигнуто только в динамическом режиме движения тела и его непрерывного заряжения и разряжения. В этом случае события развиваются следующим образом.

Когда развиваются взрывные механизмы электронной эмиссии, достигается предельная напряженность, и тело дробится, части его отбрасываются в хвостовую часть потока. В нижних слоях атмосферы, где плотность воздуха становится достаточно ощутимой, несамостоятельный разряд постепенно переходит в искровой и даже дуговой. Так рождается метеорный хвост, который существенно отличается от следа тела. Возникают токи большой плотности между головной и хвостовой частями. Начинается потрескивание и шипение, как при электросварке, отмечаемые наблюдателями при падениях даже небольших железных метеоритов [1]. Эти токи и порождают регмаглипты и кору плавления на металлических поверхностях частей тела. Естественно, что в период дробления тела рождаются и так называемые линии Неймана в структуре металла.

Когда тело настолько сближается с земной поверхностью, что напряженность индуцированного здесь поля начинает достигать пробойного значения, вся эта громадная энергия, циркулирующая в системе голова — хвост, переключается на разряд с земной поверхностью. Тут-то она и причиняет те разрушения, которые отмечаются при падениях крупных железных метеоритов.

Эту картину можно сделать достаточно наглядной. Представим себе вращающуюся электростатическую машину, между шаровыми разрядниками А и В которой непрерывно идет искрение. Машина находится в состоянии непрерывного заряжения и разряжения. Если теперь связать проводником шарик А с третьим шариком С и поднести его к В на более близкое расстояние с другой стороны, то начнется искрение между В и С. Если удалить шарик С, то искрение будет продолжаться между А и В. Аналогия полная. Различие лишь в энергиях, которые совершенно не сопоставимы.

Представим мысленно некий гигантский конденсатор, в котором накоплен заряд  $Q_0$ . Тогда время, потребное для его разряда, составит примерно  $t_1 = 0,001$  с. Мощность, которая будет развиваться при таком разряде, равна:

$$N = \frac{10^{20}}{0,001} = 10^{23} \text{ эрг/с} = 10^{13} \text{ кВт},$$

что кажется совершенно фантастической величиной. Однако это примерно и есть та мощность, которая развивается в рассматриваемом нами случае.

Высота  $h_k$  метеорного тела над Землей в момент его разряда составит по формуле (6) 12 км.

Скорость, которую могло иметь метеорное тело на этой высоте, можно полагать лежащей в пределах  $8 < v < 15$  км/с.

Так как по данным очевидцев траектория полета потока тел была пологой кривой ( $\beta = 6 \div 10^\circ$ ), то скорость «пятна напряженности» на земной поверхности была примерно такой же, как и скорость тела. Отсюда, используя данные из [3], найдем время, в течение которого длился разряд между телом и Землей, в пределах  $1 < t_2 < 2$  с, т. е. оно было совершенно достаточным, чтобы вызвать ожог леса типа «птичий коготок», о котором говорилось выше, на расстоянии  $\rho = 7,5$  км от вертикальной плоскости полета тела.

При диаметре эквивалентного первичного тела  $D = 20,8$  м в момент разряда диаметр короны при интенсивном дроблении тела мог быть не  $> 100$  м. Это согласуется с данными А. В. Золотова [4], который оценил видимый диаметр тела в 60—70 м.

Полная энергия, выделившаяся при разряде, лежит в пределах  $W = Nt_2 = (1 \div 2) \cdot 10^{23}$  эрг, т. е. тоже находится в хорошем согласии с многими другими оценками.

Сила взаимодействия между телом и Землей  $F$  на высоте  $h_k$  находится из формулы (7) и составляет 918 000 т. Она больше силы

веса метеорного тела почти в 25 раз. Это привлекает внимание. Когда прекращается разряд между телом и Землей, снимаются кулоновские силы взаимодействия тел ударным образом. При большой скорости движения тела это неизбежно приводит к тому, что поток тел взмывает ввысь и вновь начинает работать механизм заряжения и разряжения через «хвост», вновь продолжается дробление и испарение тела.

При большой скорости движения метеорит еще мог двигаться значительное время на нижней границе стратосферы. Легко показать, что если бы он двигался хотя бы еще 20 с, то при той мощности, которая развивается здесь, на 90% метеорит должен был превратиться в пыль и газ.

Первичная масса метеорита, вторгшегося в атмосферу Земли, была, видимо, не менее 200 000 т. Высота «возгорания» его была ниже, чем у Сихотэ-Алинского метеорита. Расчеты показывают, что чем крупнее первичная масса метеорита, тем позднее наступает его предельное заряжение. По-видимому, примерно в 5 раз была большей и его начальная собственная электрическая энергия, которая быстро рассеивалась вместе с массой на траектории полета.

Лавинный разряд в центре катастрофы, длившийся 1—2 с и двигавшийся с космической скоростью, породил цилиндрические волны, которые и вызвали радиальный вывал леса на большом пространстве. Ширину полосы лавинного разряда, на границах которой напряженность поля  $E$  могла достигать значений  $10^7$  В/см (разрушение камня), можно найти по формуле (8). Она равна примерно 820 м. Температура в центре этого лавинного разряда достигала нескольких тысяч градусов.

При этом из хвостовой части болида могли выпасть даже довольно крупные части метеорита (примером служит метеорит Гоба), но искать их надо не в месте катастрофы, а за многие сотни километров от него.

Таким образом, очевидно, что в физической картине Тунгусской катастрофы электрические явления сыграли выдающуюся роль. Дальнейшая разработка этой концепции окажется плодотворной для понимания природы Тунгусской катастрофы в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., Физматгиз, 1958, с. 457—472.
2. Бронштэн В. А. Планетум Комиссии по кометам и метеорам.— Природа, 1951, № 11, с. 87—88.
3. Васильев Н. В., Львов Ю. А. Лучистый ожог деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— Природа, 1974, № 3, с. 99—101.
4. Золотов А. В. Проблема Тунгусской катастрофы 1908 г. Минск, Наука и техника, 1969. 202 с.
5. Золотых В. Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М., Гостехиздат, 1953. 108 с.
6. Кривов Е. Л. Тунгусский метеорит. М., Изд-во АН СССР, 1949. 196 с.

7. Мартин Дж. Вход в атмосферу. М., Мир, 1969. 48 с.
8. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М., ИЛ, 1949. 359 с.
9. Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963. 214 с.
10. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1959. 364 с.
11. Сихотэ-Алинский железный метеоритный дождь. Т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1963. 372 с.
12. Соляник В. Ф. Метеорит и электрическое поле.— Юный техник, 1959, № 3, с. 64—65.
13. Соляник В. Ф. Об электрической природе метеорных явлений и механизме образования метеоритных кратеров.— В кн.: Тезисы докладов научной конференции Алтайского политехнического института. Барнаул, 1962, с. 25—28.
14. Тамм И. Е. Основы теории электричества М., Наука, 1976 (см. с. 19—23).
15. Тарасова В. В., Калинин В. Г. Исследование электрического пробоя в высокоом вакууме.— Ж. теор. физики, 1964, т. XXXV, вып. 4, с. 66.
16. Тимошенко С. П. Теория упругости. М., Гостехиздат, 1934. 244 с.
17. Электронный взрыв.— Наука и жизнь, 1977, № 2, с. 51.

## О БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ ТУНГУССКОГО ВЗРЫВА

*Н. В. ВАСИЛЬЕВ, В. К. ДМИТРИЕНКО, О. П. ФЕДОРОВА*

В последнее время в литературе появились данные о наличии в районе эпицентра Тунгусского взрыва зоны, характеризующейся резким повышением частоты мутаций [6]. Еще раньше здесь были обнаружены и другие биологические эффекты, не получившие пока однозначной интерпретации (ускоренный рост деревьев и др.) [3, 7, 10]. Все это побуждает к продолжению работ, направленных на выявление биологических эффектов, связанных с Тунгусской катастрофой, и на анализ их механизма.

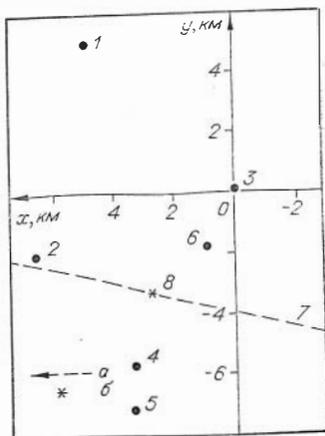
При выборе объектов подобных работ желательно отдавать предпочтение биологическим видам, стабильно населяющим район и не склонным к большим миграциям. Именно среди представителей таких видов могут присутствовать потомки особей, населявших район в момент взрыва 1908 г., сохранившие последствия возможного влияния факторов Тунгусского взрыва на генах. Из представителей фауны междуручья Подкаменной и Нижней Тунгусок выбраны муравьи, привязанность которых к этому микрорайону обитания хорошо известна. Есть все основания полагать, что особи муравьев, обитающие ныне в районе Тунгусской катастрофы, являются прямыми потомками особей, обитавших здесь в 1908 г.

Целью настоящей работы явилось изучение ряда морфометрических признаков у муравьев, обитающих в различных точках района Тунгусской катастрофы.

**Методика работы.** Работа проведена в два этапа. Первый (1969 г.) имел целью обследование небольшого района, непосредственно примыкающего к эпицентру взрыва и расположенного преимущественно в Метеоритной котловине (рис. 1). Во время

Рис. 1. Схема расположения пробных площадей 1969 г.

1 — оз. Чеко; 2 — гора Острая; 3 — гора Фаррингтон; 4 — Чургимский водопад; 5 — пересечение Куликовского зимника с р. Хулмо; 6 — гора Стойнович; а — проекция траектории полета Тунгусского тела; б — проекция эпицентра взрыва.



второго (1974—1975 гг.) изучалась гораздо большая территория (рис. 2). Объектом первого этапа служили муравьи вида *Formica fusca*, второго — *Formica exsecta*, широко распространенные в данном районе. Морфометрия проводилась под бинокулярной лупой, в качестве признаков фиксированы: длина и ширина головы, длина глаза, груди, скапуса, 1-, 2- и 3-го члеников жгутика. Обработка цифрового материала проводилась на ЭВМ с помощью критерия Стьюдента и метода интерполяционной корреляции [4]. Всего в 1969 г. обследовано 6 точек района, а в 1974—1975 гг. — 41 точка. Статистическая обработка этих материалов проведена раздельно.

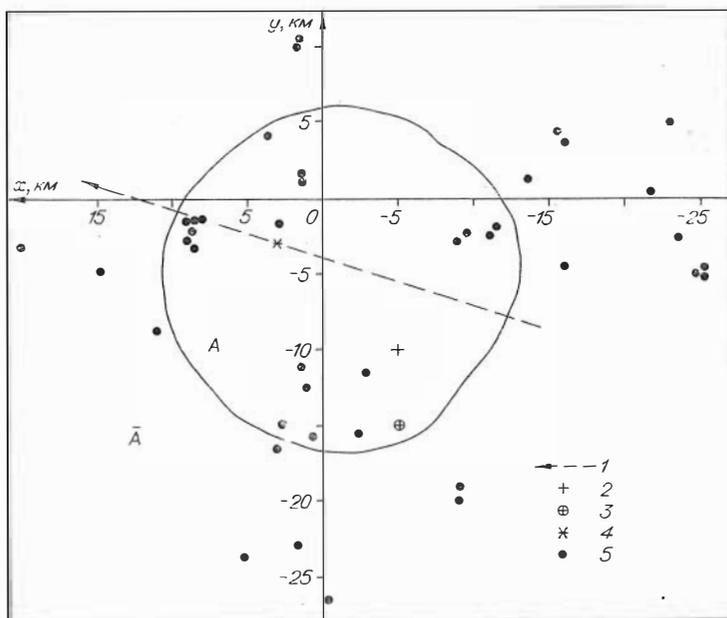


Рис. 2. Схема расположения пробных площадей 1974—1975 гг.

A — центральная зона,  $\bar{A}$  — периферийная; 1 — проекция траектории полета Тунгусского тела; 2 — наиболее вероятный центр распространения изменения длины груди у муравьев вида *Formica exsecta*, 3 — то же, глаза; 4 — проекция эпицентра взрыва; 5 — точки отбора проб.

Таблица 1

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе горы Острой, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках \*

| Морфометрический признак | Гора Стойкович | Гора Фаррингтон | р. Чургим | оз. Чеко | р. Хушма |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------|----------|----------|
| Длина груди              | 0,990          | —               | 0,999     | —        | —        |
| Длина головы             | 0,999          | 0,999           | 0,999     | 0,999    | 0,999    |
| Длина глаза              | 0,999          | 0,999           | 0,999     | 0,999    | —        |
| Ширина головы            | 0,999          | —               | 0,999     | 0,999    | 0,999    |
| Длина скапуса            | 0,999          | 0,999           | 0,999     | 0,999    | 0,999    |
| Длина члеников жгутика   |                |                 |           |          |          |
| 1-го                     | 0,990          | —               | 0,999     | —        | —        |
| 2-го                     | 0,999          | 0,990           | 0,999     | —        | —        |
| 3-го                     | 0,999          | —               | 0,999     | —        | —        |

\* Здесь и в таблице 2—6 прочерки соответствуют различию на уровне достоверности < 99 %.

**Результаты работы.** Цифровые данные, полученные в ходе первого этапа работы, представлены в табл. 1—6.

Анализ этих материалов свидетельствует о неоднородности морфометрических характеристик муравьев, обитающих в различных точках эпицентрального района. При этом среди всех обследованных полигонов резко выделяются пробные площади, расположенные вблизи горы Острой и водопада Чургим. Муравьи, обитающие в этих микрорайонах, по большинству морфометрических признаков резко контрастируют с особями, отловленными на других площадях. Различия между особями муравьев с других пробных площадей гораздо меньше (табл. 7).

Известно, что район горы Острой резко выделяется среди остальных по ряду характеристик. Именно здесь находятся мак-

Таблица 2

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе горы Стойкович, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Фаррингтон | р. Чургим | оз. Чеко | р. Хушма |
|--------------------------|-------------|-----------------|-----------|----------|----------|
| Длина груди              | 0,999       | —               | 0,999     | —        | —        |
| Длина головы             | 0,999       | —               | —         | —        | —        |
| Длина глаза              | —           | 0,999           | 0,999     | 0,999    | —        |
| Ширина головы            | 0,999       | —               | 0,990     | —        | —        |
| Длина скапуса            | 0,999       | —               | 0,999     | —        | 0,990    |
| Длина члеников жгутика   |             |                 |           |          |          |
| 1-го                     | 0,990       | —               | 0,990     | —        | —        |
| 2-го                     | 0,999       | —               | —         | —        | 0,990    |
| 3-го                     | 0,990       | —               | —         | —        | —        |

Таблица 3

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе горы Фаррингтон, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Стойкович | р. Чургим | оз. Чеко | р. Хушма |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------|----------|----------|
| Длина груди              | —           | —              | —         | —        | —        |
| Длина головы             | 0,999       | —              | —         | 0,990    | 0,990    |
| Длина глаза              | 0,999       | —              | —         | —        | 0,999    |
| Ширина головы            | —           | —              | 0,999     | —        | —        |
| Длина скапуса            | 0,999       | —              | 0,999     | —        | —        |
| Длина члеников жгутика   |             |                |           |          |          |
| 1-го                     | —           | —              | 0,999     | —        | —        |
| 2-го                     | 0,990       | —              | —         | —        | —        |
| 3-го                     | —           | —              | —         | —        | —        |

Таблица 4

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе оз. Чеко, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Стойкович | Гора Фаррингтон | р. Чургим | р. Хушма |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------|----------|
| Длина груди              | 0,990       | —              | —               | 0,999     | —        |
| Длина головы             | 0,990       | —              | 0,990           | 0,990     | —        |
| Длина глаза              | 0,999       | —              | —               | —         | —        |
| Ширина головы            | 0,999       | —              | —               | 0,999     | —        |
| Длина скапуса            | 0,999       | —              | —               | 0,999     | —        |
| Длина члеников жгутика   |             |                |                 |           |          |
| 1-го                     | —           | —              | —               | 0,990     | —        |
| 2-го                     | —           | —              | —               | —         | —        |
| 3-го                     | —           | —              | —               | —         | —        |

Таблица 5

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе Чургимского водонада, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Стойкович | Гора Фаррингтон | оз. Чеко | р. Хушма |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|----------|----------|
| Длина груди              | 0,999       | 0,999          | —               | 0,999    | 0,999    |
| Длина головы             | 0,999       | —              | —               | 0,990    | 0,990    |
| Длина глаза              | 0,999       | —              | —               | —        | 0,990    |
| Ширина головы            | 0,999       | 0,990          | 0,990           | 0,999    | 0,999    |
| Длина скапуса            | 0,999       | 0,999          | 0,999           | 0,999    | 0,999    |
| Длина члеников жгутика   |             |                |                 |          |          |
| 1-го                     | 0,999       | 0,990          | 0,999           | 0,990    | —        |
| 2-го                     | 0,999       | —              | —               | —        | 0,990    |
| 3-го                     | 0,999       | —              | —               | —        | 0,990    |

Вероятность различия морфометрических признаков муравьев вида *Formica fusca*, отобранных в районе пересечения Куликовского зямника и р. Хушма, и муравьев, отобранных в остальных пяти точках

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Стойкович | Гора Фаррингтон | р. Чургим | оз. Чеко |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------------|-----------|----------|
| Длина груди              | —           | —              | —               | 0,999     | —        |
| Длина головы             | 0,999       | —              | 0,990           | 0,990     | —        |
| Длина глаза              | —           | —              | 0,999           | 0,990     | —        |
| Ширина головы            | 0,999       | —              | —               | 0,999     | —        |
| Длина скапуса            | 0,999       | 0,990          | —               | 0,999     | —        |
| Длина члеников жгутика   |             |                |                 |           |          |
| 1-го                     | —           | —              | —               | —         | —        |
| 2-го                     | —           | 0,990          | —               | 0,990     | —        |
| 3-го                     | —           | —              | —               | 0,990     | —        |

Таблица 7

Отклонения (в сотых долях миллиметра) величины различных морфометрических признаков от соответствующих средних значений в различных точках отбора проб

| Морфометрический признак | Гора Острая | Гора Стойкович | р. Чургим | р. Хушма | оз. Чеко | Гора Фаррингтон |
|--------------------------|-------------|----------------|-----------|----------|----------|-----------------|
| Длина груди              | -10         | -1             | +15       | -5       | 0        | +4              |
| Длина головы             | -9          | +1             | +11       | +1       | 0        | +6              |
| Длина глаза              | -4          | 0              | +1        | -2       | 0        | +1              |
| Ширина головы            | -9          | +2             | +10       | 0        | 0        | +2              |
| Длина скапуса            | -11         | +5             | +13       | -2       | 0        | +1              |
| Длина члеников жгутика   |             |                |           |          |          |                 |
| 1-го                     | -1          | +1             | +2        | +1       | 0        | 0               |
| 2-го                     | -1          | +1             | +1        | -1       | 0        | 0               |
| 3-го                     | -1          | 0              | +1        | -1       | 0        | 0               |

симумы мутационного эффекта [6] и ускоренного прироста [3] у молодняка сосны, здесь также наблюдается ряд геохимических аномалий, связанных, возможно, с выпадением космического вещества [1, 8], а в торфах слоя 1908 г. имеется зона обогащения сферами предположительно космического происхождения [5], наконец, здесь же расположены точки обогащения сколовым радиоуглеродом [11]. Поэтому выявление в этой же зоне морфометрических особенностей у муравьев представляет определенный интерес. Что касается Чургимского каньона, то этот участок дает относительно высокие (хотя и не выходящие за пределы фона) значения при проведении полевой радиометрии (см. карту-схему в работе Л. В. Кириченко и М. П. Гречушкиной [9]). Здесь же находится второй максимум по мутационному эффекту у сосны.

В связи со сказанным работа была продолжена. Цель второго этапа исследований состояла в том, чтобы дать ответ на вопрос:

Значения среднего  $\bar{x}$ , квадратичного отклонения  $\sigma^2$ , критерия Стьюдента  $t$  некоторых морфометрических признаков проб муравьев из центральной зоны А и периферийной зоны  $\bar{A}$  (см. рис. 2)

| Зона      | Показатель | Морфометрический признак |                        |                        |
|-----------|------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
|           |            | длина груди              | длина головы           | длина глаза            |
| А         | $\bar{x}$  | 1,9361                   | 1,3831                 | 0,3643                 |
|           | $\sigma^2$ | $0,8349 \cdot 10^{-2}$   | $0,4275 \cdot 10^{-2}$ | $0,3759 \cdot 10^{-3}$ |
| $\bar{A}$ | $\bar{x}$  | 1,9053                   | 1,3745                 | 0,3604                 |
|           | $\sigma^2$ | $0,5764 \cdot 10^{-2}$   | $0,4510 \cdot 10^{-2}$ | $0,5597 \cdot 10^{-3}$ |
|           | $t$        | 1,17                     | 0,413                  | 0,561                  |

имеются ли существенные различия между муравьями, обитающими в центральной зоне района катастрофы (район, выделенный на рис. 2 линией) и на его периферии.

Данные, полученные на этом этапе, представлены в табл. 8.

Каких-либо различий между муравьями центральной и периферической зон выявить не удалось.

Для получения ответа на вопрос, имеются ли в зоне катастрофы какие-либо влияния, простекающие из центральной области и оказывающие действие на морфометрические признаки у муравьев, был применен метод корреляционной интерполяции. Последний, как известно [4], позволяет выявить наиболее достоверный центр эффекта, проявляющегося на большой площади, по отдельным случайным наблюдениям при условии, что источник эффекта имеет точечный характер.

Результаты этого расчета показывают, что большинство морфометрических признаков не пеленгует какого-либо центра на обследованной территории.

И лишь два из них выявляют зону, находящуюся примерно в 7—12 км к юго-востоку от эпицентра взрыва. Связь ее с Тунгусской катастрофой проблематична, так как она лежит в стороне как от траектории, так и от других особых линий и точек района. Расчет различий между центральной и периферической зонами с помощью критерия Стьюдента (см. табл. 8) также не позволяет выявить между ними статистически достоверной разницы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при анализе морфометрических признаков муравьев вида *Formica exsecta* на большой территории какой-либо определенной зависимости между величиной признака и расположением пробной площади относительно эпицентра отметить не удается.

**Обсуждение результатов.** Полученные данные свидетельствуют об отсутствии влияния Тунгусской катастрофы на морфометрические признаки у муравьев *Formica exsecta* в той мере, в какой речь идет о всей площади массового повала леса.

Что же касается локальной топографии признаков, относящихся к *Formica fusca*, то здесь нельзя не обратить внимания на совпадение двух выделяющихся на общем фоне площадей с двумя особыми точками центральной зоны района Тунгусской катастрофы — с районом горы Острой и Чургимским каньоном. Особенно существенно то обстоятельство, что оба эти района характеризуются высокими значениями мутационного фона у сосны, кроме того, район горы Острой является особым и по другому признаку: согласно расчетам, проведенным Д. Ф. Анфиногеновым [2], именно он соответствует месту соприкосновения продолжения траектории Тунгусского метеорита с поверхностью Земли при угле наклона траектории в  $40^\circ$ .

Учитывая сказанное, представляется возможным высказать предположение о наличии общей причины увеличения мутационного фона сосны и морфометрических особенностей у муравьев *Formica fusca* в районах горы Острой и Чургимского водопада. Не исключено, что причина обоих явлений стоит в прямой связи с Тунгусской катастрофой. Представляется желательным дальнейшее изучение мутационного фона у муравьев *Formica fusca* в районе центра падения Тунгусского метеорита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 19—24.
2. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 20—21.
3. Васильев Н. В., Батищева А. Г. О связи ускоренного возобновления леса с траекторией падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 149—160.
4. Демин Д. В. Алгоритм статистической оценки параметров Тунгусского падения по данным наземных наблюдений. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 235—237.
5. Долгов Ю. А., Васильев Н. В., Шугурова Н. А. и др. Химический состав силикатных шариков из торфов района падения Тунгусского метеорита. — Докл. АН СССР, 1971, т. 200, № 1, с. 201—204.
6. Драгавцев В. А., Лаврова Л. А., Плеханова Л. Г. Эколого-генетический анализ линейного прироста сосны обыкновенной в районе Тунгусской катастрофы 1908 г. — В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 135—141.
7. Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Шмырев И. К. О расположении зоны с увеличенным после 1908 года приростом старых деревьев в СЗ секторе района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 161—165.
8. Журавлев В. К., Демин Д. В., Вронский Б. И. и др. Результаты шлхового опробования и спектрального анализа почв из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 99—111.

9. Кириченко Л. В., Гречушкина М. П. О радиоактивности почвы и растений в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 139—152.
10. Некрасов В. И., Емельянов Ю. М. К вопросу восстановления таксационных характеристик (докатастрофного) леса в районе падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 123—126.
11. Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н., Васильев Н. В. и др. Оценка степени космогенности силикатной составляющей почв из района падения Тунгусского метеорита по радиоуглеродным данным. (см. наст. сб.)

## О МЕХАНИЗМЕ СТИМУЛЯЦИИ РОСТА РАСТЕНИЙ В РАЙОНЕ ПАДЕНИЯ ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА

*Н. В. ВАСИЛЬЕВ, Л. К. КУХАРСКАЯ, А. П. БОЯРКИНА,  
В. Д. ГОЛЬДИН, Л. Л. КАЗАКЕВИЧ*

Исследования динамики восстановления леса после взрыва Тунгусского метеорита показали, что у многих деревьев наблюдается значительное увеличение прироста, наступившее вскоре после 1908 г. По данным экспедиций 1958—1964 гг., изложенным в работах Ю. М. Емельянова, В. И. Некрасова и др. [5, 12], установлено, что ускоренный прирост деревьев наблюдается в целом ряде пунктов обследованного района. Это относится и к молодым 40—50-летним древостоям, появившимся после падения метеорита, и к деревьям, пережившим катастрофу. Эффект наиболее отчетлив в северо- и юго-западном секторах района. Он прослеживается в отношении всех пород деревьев, растущих в районе падения Тунгусского метеорита, и имеет длительный характер: лишь в последние десятилетия стимуляция начинает постепенно угасать [4, 6].

В настоящее время существуют две точки зрения на природу ускоренного роста деревьев в послекатастрофный период. Объяснение влиянием экологических факторов основано на том, что механическое воздействие взрыва метеорита привело к вывалу леса на огромной территории и значительному повреждению крон оставшихся деревьев. В результате условия произрастания улучшились: увеличилась освещенность, изменились тепловой баланс и гидрологический режим почв. Пожар способствовал повышению содержания минеральных веществ в почве [3]. Однако с этих позиций трудно объяснить некоторые обстоятельства, важнейшими из которых являются:

1. Отсутствие сходства формы зон вывала, пожара и ускоренного прироста [4, 11, 15, 16].

2. Результаты математического анализа указывают на связь явления из числа многих факторов только с одним — с траекторией полета Тунгусского тела [5].

3. Наличие эффекта стимуляции за пределами области повала леса, произведенного взрывной волной Тунгусского метеорита [6].

Вторая точка зрения предполагает возможное влияние на

рост деревьев стимулирующих факторов, связанных с веществом, которое могло быть внесено в результате распыления взорвавшегося Тунгусского метеорита [12].

Целью настоящей работы было определение наличия или отсутствия связи между биогеохимическими характеристиками почв и динамикой прироста семян в условиях модельного эксперимента.

Методика нашей работы состояла в следующем.

1. Отбор проб проводился таким образом. Для взятия образцов выбиралось ровное, незатопляемое паводковыми водами место. С площади 1 м<sup>2</sup> вручную удалялись опад, мелкие кустарнички и моховой покров. Затем по углам квадрата и в центре его брали образцы верхнего горизонта почвы с площади 1 дм<sup>2</sup> и на глубину 3—5 см каждый. Взятые образцы тщательно перемешивали и из их суммы отбирали 1,0—1,5 кг материала в матерчатый мешок. Обработка образцов почв проводилась на базе Института леса и древесины СО АН СССР и кафедры неорганической химии Красноярского медицинского института.

2. Почвоведческий анализ выполнен согласно общепринятым методикам. В качестве показателей использованы типы почвы и ее цвет, рН водной вытяжки, содержание гумуса, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований, степень насыщения почвы основаниями и элементный состав.

3. Элементный состав почв определен путем эмиссионного спектрального анализа, проведенного методом просыпки на дифракционном спектрографе № 8 с решеткой 600 штрихов на 1 мм (приставка УСА-5). Пробы сжигались в электрической дуге с силой переменного тока 20 А при цели прибора 20 мк. Дешифровка осуществлялась визуальным методом сравнения с помощью электропроектора. Используются эталоны для растений, приготовленные на искусственной основе.

4. Приготовление водной вытяжки: 5 г измельченной почвы эмульгировали в 50 мл дистиллированной воды, встряхивали в течение 6 ч на качалке со скоростью 120 об/мин и затем центрифугировали.

5. Степень физиологической активности вытяжек почвенных образцов оценивались по Ю. В. Ракитину и В. Е. Руднику [3]. В качестве тест-объектов использованы семена пшеницы сорта Скала и огурцов сорта Подмосковные. Первые являются представителями однодольных, а вторые — двудольных растений. Это позволяет выявить возможное селективное действие вытяжек по отношению к различным классам растительных объектов. Семена проращивали в фарфоровых кюветах размером 90 × 130 × 50 мм. На дно кюветы укладывали стеклянную прямоугольную рамку, на которую клали стеклянную пластинку, а последнюю покрывали фильтровальной бумагой. В каждую кювету наливали по 60 мл дистиллированной воды, которая увлажняла бумагу. Семена, обработанные исследуемыми вытяжками (семена пшеницы замачивались в течение 18 ч, а огурцы — 6 ч при 25°C), раскладывались

на бумаге рядами. Камера накрывалась стеклом. Проращивание велось при 25°C в течение 96 ч. Контролем служили семена, замоченные в дистиллированной воде.

6. Биологические испытания воздействия вытяжек на прорастание семян сосны обыкновенной, всхожесть и рост проростков проводили по методу И. И. Журавлева. Сущность его состоит в следующем. Семена сосны стерилизовали в течение 30 мин в 0,02%-ном растворе  $KMnO_4$ , промывали дистиллированной водой, после чего в течение 20 мин обрабатывали вытяжками из почвенных образцов. Обработанные таким образом семена раскладывали в чашки Петри на влажную фильтровальную бумагу и проращивали трое суток. По истечении этого срока подсчитывали процент прорастания в сравнении с контролем. Проросшие семена высаживали в почву и наблюдали 40 дней.

Взятие проб проведено в рамках программы Комплексной метеоритной экспедиции Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР, Томского отделения ВАГО и Томского государственного университета. Работа выполнена в два этапа: во время первого (1973 г.) было взято 26 образцов, во время второго (1974 г.) — 48.

Ориентировочный анализ результатов исследования 26 образцов, взятых экспедицией 1973 г., выявил наличие наибольшего роста некоторых видов семян на почвах из районов, прилегающих к эпицентру взрыва Тунгусского метеорита. Эти данные послужили основанием для продолжения указанных работ в 1974 г. Результаты, изложенные ниже, относятся именно к этим исследованиям. Всего в 1974 г. было отобрано и изучено 48 образцов почв. Схема их отбора представлена на рисунке.

Большинство образцов в типологическом плане оказалось довольно однородным (различные варианты подзолистых почв), что подтверждает вывод А. А. Ерохиной [7] об однообразии почв района падения Тунгусского метеорита.

В то же время ближайшие окрестности эпицентра взрыва характеризуются пониженными значениями ряда почвенных показателей, к которым относятся: сумма обменных оснований, степень насыщения основаниями и содержание в почве гумуса. Перечисленные особенности присущи сравнительно небольшой по площади территории, обозначенной на рисунке как зона I. По мере удаления от нее средние значения названных параметров становятся практически постоянными (зоны II и III — см. рисунок и таблицу).

Зона I характеризуется также более высокими показателями роста стеблей пшеницы. В отношении других показателей существенных различий не обнаружено.

Что касается элементного анализа, то тут дело обстоит следующим образом. Из 32 элементов, на которые был произведен анализ, в почвах обнаружены следующие: Pb, Cu, Zn, Co, V, Sc, Sn, Ti, Mo, Cr, Ni, Mn, La, Ba, Be, Sr, Zr, Nb, B, P, Ag, Y, I, Li, Yb.

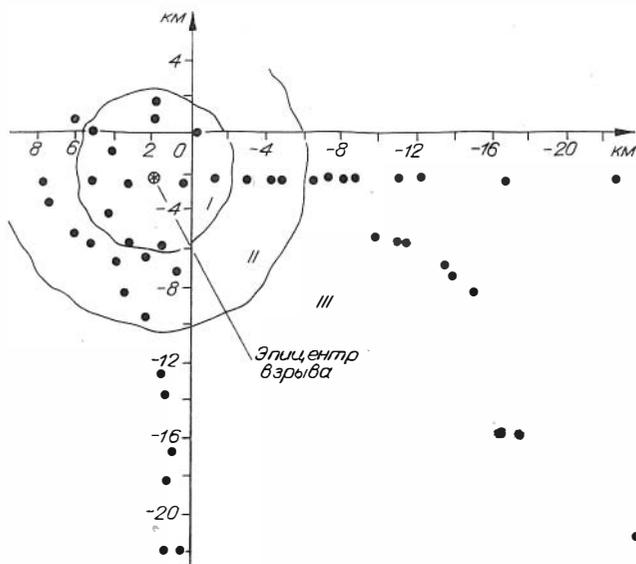


Схема отбора проб почв в районе падения Тунгусского метеорита (I—III — зоны усреднения параметров, см. ниже таблицу).

Большинство из них распределены по исследуемой территории более или менее равномерно и каких-либо аномальных зон не создают. В то же время концентрации некоторых элементов обнаруживают определенные территориальные закономерности. Это относится, прежде всего, к La, Y, Yb, Be, P и Zg, концентрации которых в окрестности эпицентра (зона I) выше, чем в зонах II и III, т. е. в удаленных районах (см. рисунок и таблицу). Постепенное снижение содержаний в почвах зоны I к зоне III дают Pь, Nb и Ag. Наконец, содержания Zn и Mo характеризуются примерно одинаковыми значениями в I и II зонах и существенно меньшими в III зоне. Результаты, полученные по изучению территориальных распределений микроэлементов на исследуемой территории, совпадают с более ранними, полученными путем флорометрической и металлографической съемок [9, 10].

Таким образом, установлено, что почвы области эпицентра взрыва Тунгусского метеорита отличаются от относительно удаленных районов почвоведческими характеристиками, элементарным составом и влиянием на некоторые биологические объекты.

Дальнейшая статистическая обработка имела целью исследование корреляционных связей между общими почвоведческими характеристиками, элементарным составом проб и действием их на биологические объекты. В результате расчета и анализа парных коэффициентов корреляции  $\rho$  не обнаружено достоверных поло-

Средние значения некоторых почвенных характеристик и длины стебельков пшеницы в различных территориальных зонах (см. рисунок)

| Показатель                       | I          | II         | III        |
|----------------------------------|------------|------------|------------|
|                                  | $M \pm m$  | $M \pm m$  | $M \pm m$  |
| Гумус, %                         | 6,7±,5     | 7,3±0,5    | 7,5±0,4    |
| Сумма обменных оснований, М-экв  | 29,52±2,50 | 33,49±1,84 | 34,01±1,57 |
| Степень насыщения основаниями, % | 62,6±2,3   | 74,6±1,9   | 75,3±1,9   |
| La ( $\cdot 10^{-3}\%$ )         | 5,4±1,4    | 1,3±0,4    | 1,9±0,4    |
| Y ( $\cdot 10^{-3}\%$ )          | 5,7±1,2    | 2,1±0,3    | 3,0±0,3    |
| Be ( $\cdot 10^{-4}\%$ )         | 2,4±0,2    | 1,5±0,1    | 1,7±0,1    |
| Yb ( $\cdot 10^{-4}\%$ )         | 1,5±0,4    | 0,4±0,2    | 0,6±0,2    |
| P ( $\cdot 10^{-2}\%$ )          | 8,0±0,6    | 6,0±0,7    | 5,8±0,4    |
| Zr ( $\cdot 10^{-3}\%$ )         | 11,1±1,0   | 7,7±0,5    | 7,5±0,4    |
| Ag ( $\cdot 10^{-6}\%$ )         | 4,0±0,1    | 1,0±0,1    | 0,5±0,1    |
| Pb ( $\cdot 10^{-4}\%$ )         | 8,0±0,9    | 5,2±0,6    | 3,2±0,3    |
| Nb ( $\cdot 10^{-4}\%$ )         | 7,2±0,8    | 3,2±1,0    | 1,1±0,6    |
| Zn ( $10^{-3}\%$ )               | 11,3±1,1   | 11,5±1,5   | 8,0±0,5    |
| Mo ( $\cdot 10^{-3}\%$ )         | 7,2±0,4    | 7,1±0,3    | 5,7±0,4    |
| Длина стебля пшеницы, мм         | 8,1±0,7    | 7,1±0,6    | 6,8±0,3    |

жительных линейных связей между микроэлементным составом почв и действием почвенных вытяжек на семена огурцов и сеянцы сосны.

Иначе обстоит дело с длиной стебля и корня пшеницы. Здесь наблюдается положительная линейная связь длины стеблей пшеницы с содержаниями в почвах Yb ( $\rho = +0,73$ ;  $\mathcal{P} > 0,99$ ), La ( $\rho = +0,42$ ;  $\mathcal{P} > 0,95$ ) и Y ( $\rho = +0,28$ ;  $\mathcal{P} > 0,95$ ) (и длины корня пшеницы — с содержаниями Yb ( $\rho = +0,69$ ;  $\mathcal{P} > 0,99$ ) и La ( $\rho = +0,34$ ;  $\mathcal{P} > 0,90$ )). При этом какой-либо линейной связи длины стебля и корня пшеницы с общими агрохимическими характеристиками (рН водной вытяжки, содержанием в почве обменных оснований и гумуса, степенью насыщения основаниями, гидролитической кислотностью и др.) выявлено не было.

Заслуживает внимания и еще одно обстоятельство. Установлена высокодостоверная связь между некоторыми агрохимическими показателями и элементными характеристиками почв. Так, обратная линейная зависимость наблюдается между содержаниями в почвах гумуса, с одной стороны, и Pb ( $\rho = -0,28$ ;  $\mathcal{P} > 0,95$ ) и Nb ( $\rho = -0,27$ ;  $\mathcal{P} > 0,95$ ) — с другой, суммой обменных оснований с теми же микроэлементами ( $\rho = -0,28$  и  $-0,30$  при  $\mathcal{P} > 0,95$ ), а также степенью насыщения основаниями Pb ( $\rho =$

= -0,43;  $\mathcal{P} > 0,99$ ), Nb ( $\rho = -0,47$ ;  $\mathcal{P} > 0,999$ ) и Ag ( $\rho = -0,29$ ;  $\mathcal{P} > 0,95$ ). Это обстоятельство можно объяснить двояким образом: либо содержание данных микроэлементов отражается на агрохимических показателях почв, либо, наоборот, конкретные агрохимические особенности последних имеют значение для процессов миграции и накопления микроэлементов. Дальнейшее изучение этого вопроса представляет несомненный интерес.

Изложенные выше материалы свидетельствуют о том, что водные вытяжки из почвенных образцов, взятых вблизи эпицентра взрыва Тунгусского метеорита, стимулируют прорастание семян пшеницы. Этот эффект не связан с общими агрохимическими характеристиками почв и коррелирует с содержаниями в них La, Yb и Y.

Возникает вопрос: имеет ли это явление отношение к выпадению космического вещества? Учитывая то обстоятельство, что метеоритная котловина является разрушенным жерлом палеовулкана [14], нетрудно представить себе степень сложности геохимии данного района. Вполне логично представить, что описанный эффект имеет чисто земное происхождение и прямого отношения к событию 1908 г. не имеет. Однако существуют обстоятельства, не позволяющие однозначно прийти к такому заключению. Дело в том, что уже ранее установлено необычное поведение редкоземельных элементов в районе центра падения Тунгусского метеорита. Так, во-первых, концентрации La и Yb в почвах и растениях существенно повышены [9, 10], во-вторых, максимальные концентрации Yb имеют место в окрестности особой [9] теоретически рассчитанной точки соприкосновения траектории Тунгусского метеорита с поверхностью Земли при условии наклона траектории  $\sim 40^\circ$  [2], и, в-третьих, концентрация редкоземельных элементов в слое торфа, относящемся к 1908 г., увеличена [1]. Хотя все эти обстоятельства имеют косвенный характер, в совокупности с данными о присутствии в некоторых видах космической пыли высоких концентраций редких земель [17] дают основание предполагать космогенную природу названных аномалий [8].

Работа эта, очевидно, должна быть продолжена путем прямого выделения аналитическими методами предполагаемого стимулятора из почв района падения Тунгусского метеорита, отобранных в наиболее перспективных точках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева К. Н., Смирнова А. В., Васильев Н. В. и др. Спектральный анализ торфа из района падения Тунгусского метеорита. — В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 19—24.
2. Анфиногенов Д. Ф. О Тунгусском метеоритном дожде. — В кн.: Успехи метеоритики. Новосибирск, 1966, с. 20—21.

3. **Бережной В. Г., Драпкина Г. И.** Изучение аномального прироста леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Метеоритика. Вып. 24. М., Наука, 1964, с. 162—169.
4. **Васильев Н. В., Батищева А. Г.** О связи ускоренного возобновления леса с траекторией падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 149—160.
5. **Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Некрасов В. И.** Использование многофакторного дисперсионного анализа для оценки факторов, оказавших влияние на изменение хода роста древесной растительности в районе Тунгусского падения.— В кн.: Проблемы Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 134—136.
6. **Емельянов Ю. М., Лукьянов В. Б., Шаповалова Р. Д., Шмырев И. К.** О расположении зоны с увеличенным после 1908 г. приростом старых деревьев в СЗ секторе района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 161—165.
7. **Ерохина А. А.** Таежные гумусированные длительно-сезонномерзлотные почвы тайги Красноярского края (по данным района падения Тунгусского метеорита).— В кн.: Тезисы докладов к конференции почвоведов Сибири и Дальнего Востока. Горно-Алтайск, 1962, с. 70—72.
8. **Журавлев В. К., Демин Д. В.** К вопросу о химическом составе Тунгусского метеорита.— В кн.: Космическое вещество на Земле. Новосибирск, Наука, 1976, с. 99—104.
9. **Журавлев В. К., Демин Д. В., Вронский Б. И.** и др. Результаты шлихового опробования и спектрального анализа почв из района падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 99—111.
10. **Ковалевский А. Ф., Резников Н. 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. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1963, с. 125—133.
11. **Курбатский Н. П.** О лесном пожаре в районе Тунгусского падения.— В кн.: Метеоритика. Вып. 25. М., Наука, 1964, с. 168—172.
12. **Некрасов В. И., Емельянов Ю. М.** Некоторые итоги и задачи изучения роста леса в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Проблема Тунгусского метеорита. Вып. 2. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1967, с. 127—133.
13. **Ракицкий Ю. В., Рудник В. Е.** Первичная биологическая оценка химических соединений в качестве регуляторов роста растений и гербицидов.— В кн.: Методы определения регуляторов роста и гербицидов. М., Наука, 1966, с. 132.
14. **Сапронов Н. Л., Соболенко В. М.** Некоторые черты геологического строения Куликковского палеовулкана нижнетриасового возраста.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 13—19.
15. **Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А.** О поле направленной повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита.— В кн.: Вопросы метеоритики. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1976, с. 39—52.

16. **Фуряев В. В.** Лесные пожары в районе падения Тунгусского метеорита и их влияние на формирование лесов.— В кн.: Проблемы метеоритики. Новосибирск, Наука, 1975, с. 72—87.
17. **Hallgren D. S., Hemenway C. L., Mohnen V. A., Tackett C. D.** Preliminary results from the noctilucent sampling from Kiruna in 1970. «COSPAR. Space Res. XIII. Proc. Open Meet. Working Groups Phys. Sci. 15th Plenary Meet. COSPAR, Madrid, 1972, v. 22. Berlin, 1973, p. 1099—1104.

## МЕТЕОРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ

*О. АЛИМОВ, А. В. БЛОХИН, Г. Г. НОВИКОВ, Т. РАДЖАБОВ,  
Л. Н. РУБЦОВ, С. Ф. ЦЫГАНКОВ*

Одним из наиболее актуальных вопросов физики верхней атмосферы является проблема поддержания остаточной ионизации ночной области  $E$ -ионосферы. В настоящее время считается, что в поддержании ионизации могут играть важную роль рассеянное на геокороне лаймановское излучение, корпускулярные частицы, а также метеорная активность. Все эти источники ионизации достаточно подробно рассмотрены в существующей литературе [2, 3, 5—8]. Наиболее распространенной гипотезой является гипотеза поддержания ночной ионизации за счет метеорной материи. В настоящей статье мы вновь вернемся к этому вопросу.

В ряде работ (например, в [1, 9]) была высказана гипотеза о том, что поток метеорных частиц может быть ответствен непосредственно за создание слоистой структуры в области  $E$ -ионосферы. Представляет интерес анализ данной гипотезы.

Результаты радиолокационных и фотометрических наблюдений метеоров показывают, что как в спорадических, так и в поточных метеорах имеется распределение метеорного вещества по плотностям, иначе говоря, метеорная материя неоднородна по своей структуре. В этом случае становится понятным, что функция ионообразования от таких метеорных частиц должна иметь ряд максимумов (слоистость) в зависимости от высоты. В самом деле, различные по плотности метеорные тела должны давать только для них присущие функции ионообразования. И следовательно, при нахождении интегрального источника от метеорных тел различной плотности, т. е. при сложении отдельных кривых, мы должны получить ряд максимумов.

Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы проверить подобные рассуждения при решении модельной задачи построения интегрального источника ионообразования от метеорных тел различной плотности.

Для простоты будем рассматривать только поточные метеоры, поскольку обобщение на спорадический фон не представляет заметного труда. Итак, чтобы найти интегральный источник заря-

женных частиц от метеорных тел, мы прежде всего должны знать вид источника от единичного метеора. При решении задачи о формировании метеорного следа (метеорной плазмы), как правило, пользуются следующим выражением для источника заряженных частиц:

$$S_e = -\frac{\beta}{m} A_e \frac{dM}{dt}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент ионизации;  $m$  — масса метеорного атома;  $\frac{dM}{dt}$  — расход метеорной массы, который определяется известными уравнениями физической теории метеоров;  $A_e$  — постоянная нормировки, определяемая из условия

$$\int_{V_0} S_e \bar{d}\vec{r} = -\frac{1}{m} \frac{dM}{dt}. \quad (2)$$

Итак, с точки зрения метеорной ионизации во всей атмосфере удобно пользоваться следующим видом источника:

$$S_e = -\frac{\beta}{mV_0} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

(здесь  $V_0$  — объем области атмосферы, где происходит сгорание метеорных тел, т. е. объем метеорной зоны).

Интегральный источник, как легко понять, будет иметь следующий вид:

$$Q = -B_e \frac{\beta N_m}{mV_0} \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} f(M_0) f(\delta) \frac{dM}{dt} dM_0 d\delta, \quad (4)$$

где  $N_m$  — пространственная плотность метеорных частиц в потоке,  $N_m = \Phi_0/V_m$  (здесь  $\Phi_0$  и  $V_m$  — поток и скорость метеорных частиц соответственно);  $f(M_0)$  — функция распределения метеорных тел по начальным массам в интервале масс  $M_1$  и  $M_2$ ;  $f(\delta)$  — функция распределения метеорного вещества по плотностям в интервале плотностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$ .

Остается найти вид постоянной величины  $B_e$ . Интегрируя (4) по всему объему и по времени, получаем

$$N^{\Pi} = \beta B_e N_m \langle N_0^{\Pi} \rangle, \quad (5)$$

$$\langle N_0^{\Pi} \rangle = \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} N_0 f(M_0) f(\delta) dM_0 d\delta, \quad N_0 = \frac{M_0}{m}; \quad N_e^{\Pi} = \langle N_e^0 \rangle N_m V_0 -$$

полное число электронов от потока метеоров;  $\langle N_e^0 \rangle =$   
 $= \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} N_e f(M_0) f(\delta) dM_0 d\delta$ . Таким образом, вместо (4) получаем

$$Q = -\frac{\langle N_e^0 \rangle N_m}{\langle N_0^{\Pi} \rangle m} \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{dM}{dt} f(M_0) f(\delta) dM_0 d\delta. \quad (6)$$

Покажем сейчас, что отношение  $\langle N_e^0 \rangle / \langle N_0^{\text{II}} \rangle$  есть коэффициент ионизации  $\beta$ . Действительно, уравнение непрерывности для электронов в метеорном следе имеет вид

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div } n_e \vec{U}_e = - \frac{\beta}{m} \frac{dM}{dt} \delta(\vec{r}) \quad (7)$$

( $n_e$ ,  $\vec{U}_e$  — концентрация и дрейфовая скорость электронов соответственно;  $\delta(\vec{r})$  — трехмерная дельта-функция Дирака).

При записи уравнения (7) мы пренебрегли членами деионизации, поскольку время формирования метеорного следа намного меньше, чем характерные времена рекомбинации, прилипания.

Переходя в (7) к полному числу электронов  $N_e = \int n_e d\vec{r}$  и интегрируя по времени, получаем

$$N_e = \beta N_0.$$

Следовательно,

$$\langle N_e^0 \rangle = \beta \langle N_0^{\text{II}} \rangle. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), находим интегральную функцию ионообразования от поточных метеоров:

$$Q = - \beta \frac{N_m}{m} \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \left| \frac{dM}{dt} f(M_0) f(\delta) dM_0 d\delta \right|. \quad (9)$$

К выражению (9) мы должны еще присовокупить известные уравнения физической теории метеоров, которые описывают поведение метеорной частицы при пролете ее сквозь атмосферу Земли.

Согласно определению, линейная электронная концентрация, создаваемая метеорным телом, равна:

$$\alpha_e = - \frac{\beta}{mV_m} \frac{dM}{dt}. \quad (10)$$

Тогда вместо (9) получаем

$$Q = - \Phi_0 \int_{M_1}^{M_2} \int_{\delta_1}^{\delta_2} \alpha_e f(M_0) f(\delta) dM_0 d\delta. \quad (11)$$

В работе [4] показано, что в большом диапазоне масс и скоростей линейная электронная концентрация вдоль метеорного следа может быть представлена формулой

$$\alpha_e(h) = CM_0 V_m^{3.5} (\cos Z)^{0.88} (e^x - e^{-x}) (1 - e^{x-2.5})^2 \exp(-3.5ae^x), \quad (12)$$

где высоте  $h$  соответствует

$$x = \frac{h_H - h}{H^* (\cos Z)^{0.1}}, \quad 0 \leq x \leq 2.75 \quad (13)$$

( $H^*$  — высота однородной атмосферы;  $h_H$  — высота появления метеора;  $Z$  — зенитный угол).

Параметры  $C$  и  $a$ , входящие в формулу (12), имеют такие значения:

$$C = \begin{cases} 1,4 \cdot 10^9, & \delta < 4, \\ 0,6 \cdot 10^9, & \delta > 4, \end{cases} \quad (14)$$

$$a = 4,03 (\cos Z)^{\gamma-1} V_m^{-2,15} M_0^{-0,05} Q^{-0,1}, \quad (15)$$

где  $\gamma = 0,4 + 0,037 \ln(M_0 Q^2) + 0,112 \ln V_m$ ;  $Q = \frac{\delta}{3,5}$ .

Для нахождения высоты появления метеора используется формула из работы К. В. Костылева [4]:

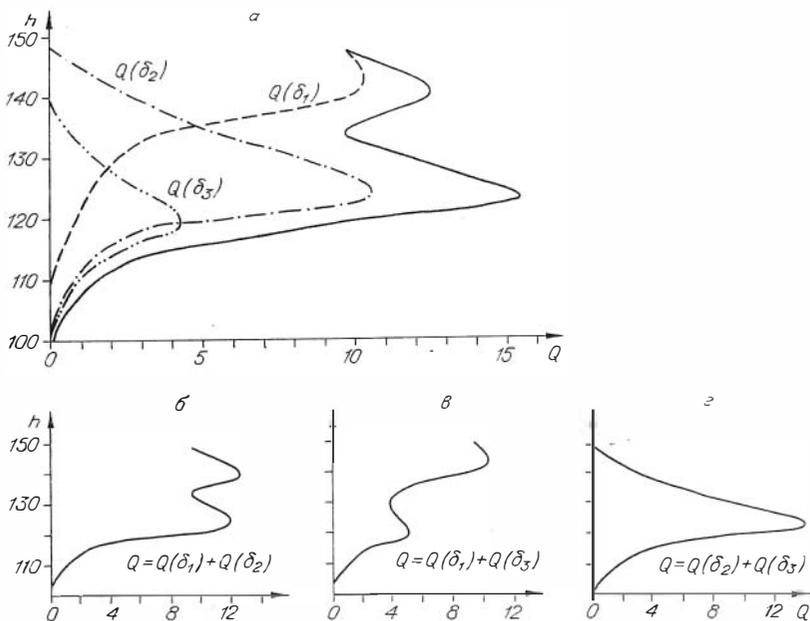
$$h_H = h_{\max} + 1,7 H^* (\cos Z)^{0,1}, \quad (16)$$

где  $h_{\max}$  — высота, соответствующая давлению

$$P_{\max} = 4,67 \cdot 10^4 V_m^{-2,17} M_0^{0,28} Q^{0,56} (\cos Z)^\gamma. \quad (17)$$

Если  $h_H > 150$  км, то принимается  $h_H = 150$  км.

Задача решалась на ЭВМ М-220. Для простоты считалось, что  $\cos Z = 0,6667$ , а  $V_m = 60$  км/с. Поскольку для поточных метеоров функция  $f(\delta)$  неизвестна, мы рассматривали поток, который состоит из трех сортов метеорных тел. Результаты работы пред-



Ход функции ионообразования в зависимости от высоты для плотностей:  
 $a - \delta_1 = 0,5, \delta_2 = 3,4$  и  $\delta_3 = 7,8$  г/см<sup>3</sup>;  $б - \delta_1 = 0,5$  и  $\delta_2 = 3,4$  г/см<sup>3</sup>;  
 $в - \delta_1 = 0,5$  и  $\delta_3 = 7,8$  г/см<sup>3</sup>;  $г - \delta_2 = 3,4$  и  $\delta_3 = 7,8$  г/см<sup>3</sup>.

ставлены на рисунке, изображающем ход функции понообразования (в произвольных единицах) в зависимости от высоты. В предположении о равном притоке массы от метеоров различных плотностей получаем рисунок *a*. Здесь сплошная линия соответствует интегральному источнику понообразования от всех трех сортов метеорных тел. На остальных рисунках дан вид источника для различных комбинаций плотностей метеорного вещества.

Таким образом, из приведенных расчетов следует, что если в потоке метеорных тел имеется дискретное распределение по плотности, то не исключена возможность появления слоистой структуры области *E*-ионосферы. Заметим, что в случае, если функция распределения метеорных тел по плотностям непрерывна (что, по-видимому, близко к реальности), то слоистой структуры быть не может.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бибарсов Р. Ш., Чеботарев Р. П. Некоторые характеристики метеорных тел и их ионизационных следов.— *Астроном. вестн.*, 1976, вып. 10, № 3, с. 144—150.
2. Гершман Б. Н., Игнатъев Ю. А., Каменецкая Г. Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя *E* на различных широтах. — В кн.: *Результаты исследований по международным геофизическим проектам*. М., Наука, 1976.
3. Коломнец А. Р. Некоторые вопросы метеорной ионизации ионосферы.— В кн.: *Геофизика и астрономия*. Киев, Наукова думка, 1975, с. 234—240.
4. Костылев К. В. *Астрономические основы метеорной радиосвязи*. Казань, 1970.
5. Чавдаров С. С., Часовитин Ю. К., Чернышева С. П., Шефтель В. М. Среднеширотный спорадический слой *E*-ионосферы.— В кн.: *Результаты исследований по международным геофизическим проектам*. М., Наука, 1975.
6. Часовитин Ю. К., Нестеров В. П. Динамические процессы и формирование ночной области *E*-ионосферы.— В кн.: *Труды ИЭМ. Вып. 3 (55)*. М., Гидрометеоздат, 1975, с. 144.
7. Шушкова В. Б. О возможных формах слоев *E* метеорного происхождения. *Физика верхней атмосферы*.— В кн.: *Труды ИЭМ. Вып. 5 (62)*. М., Гидрометеоздат, 1976, с. 121—129.
8. Lebedinets V. N., Monochina A. V., Shuchkova V. B. Interaction of the lower thermosphere with solid component of the interplanetary medium.— *Planet. and Space Sci.*, 1973, v. 21, N 8, p. 1317—1332.
9. Wright I. V. Sporadic E as an indicator of wind structure in the Lower ionosphere and the influx of meteors.— *J. Geophys. Res.*, 1967, v. 72, N 19, p. 4821—4829.

### О СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРАХ МЕТЕОРНОГО ПОТОКА

ЛЕОНИД 1966—1968 гг.

#### ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 17 м

Г. В. АНДРЕЕВ, Р. Г. ЛАЗАРЕВ, Л. Н. РУБЦОВ, Г. О. РЯБОВА

При обработке результатов наблюдений метеорного потока Леонид возникает ряд трудностей, связанных с большой скоростью частиц потока. Во-первых, при вычислении минимально регистрируемых масс большое значение имеет выбор той или иной модели

начального радиуса  $r_0$ , диффузии  $D_a$  и коэффициента ионизации  $\beta$ . Если при исследовании таких метеорных потоков, как Геминиды ( $V = 36$  км/с) и Квадрантиды ( $V = 41$  км/с), различные модели  $r_0$ ,  $D_a$  и  $\beta$  дают примерно одинаковые результаты, то для высокоскоростного потока Леонид ( $V = 72$  км/с) расхождения очень существенны. С другой стороны, существует несколько физических теорий метеоров, которые также дают значительные расхождения при описании процессов испарения и ионизации тела в зависимости от высоты, плотности и скорости. И, в-третьих, в теории падающего потока [1] ряд параметров для метеоров с большими скоростями имеют вид, отличный от параметров для метеоров со средними скоростями.

В связи с этим при расчете плотности падающего потока нами выбраны следующие две наиболее обоснованные, по нашему мнению, модели метеорных явлений. Первая из них дана в работе К. В. Костылева [3]:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= 0,024V \exp\left(\frac{h-95}{6,23}\right) \\ D_a &= 5 \exp\left(\frac{h-92}{6,23}\right) \\ \beta &= 1,26 \cdot 10^{-7} (V-6,4)^{3,5} \\ p_m &= 4,67 \cdot 10^4 V^{-2,15} \left[ m_0 \left( \frac{\delta}{3,4} \right)^2 \right]^{0,28} (\cos \chi)^\gamma \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где последнее аппроксимационное выражение описывает испарение (обозначения общеприняты). Другая модель предложена В. С. Тохтасевым [6]:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= 1,55 \left( \frac{V}{40} \right)^{0,6} \frac{\rho_0}{\rho} \\ D_a &= 14,9 \exp [0,1786(h-95)] \\ \beta &= 8,4 \cdot 10^{-7} (V-8,8)^{3,5} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

а модель испарения дана им там же.

На основании этих моделей нами была определена чувствительность РЛС Ионосферной лаборатории АН Таджикской ССР (1964—1969 гг.) в отношении метеоров потока Леонид.

Станция имеет следующие основные параметры. Мощность передатчика в импульсе  $P = 30$  кВт, частота посылок импульсов  $\tau_n = 0,02$  с, длительность импульсов  $\tau_n = 100$  мкс, рабочая длина волны, на которой наблюдается максимум численности метеоров,  $\lambda = 17$  м, коэффициент усиления ромбической антенной системы по отношению к изотропному излучателю с учетом реальных свойств Земли  $G_1 = G_2 = 62$ , максимум излучения направлен на запад под углом  $\delta \simeq 23^\circ$  к горизонту, ширина диаграммы направленности в вертикальной плоскости  $18^\circ$ , а горизонтальной —  $20^\circ$ . Расчетная чувствительность приемника на уровне шума  $U \simeq 2,55 \cdot 10^{-6}$  В, измеренная  $U = 2,5 \div 2,7 \cdot 10^{-6}$  В. Значение минимально регистрируемой линейной электронной плотности следа без учета  $r_0$ ,  $D_a$  и оперативности равно  $\alpha_0 \simeq 2,3 \cdot 10^9$  эл/см.

Определение чувствительности РЛС в отношении метеоров потока Леонид производилось теоретически путем построения кривых чувствительности [1]

$$m_{\min} = m_0 \cdot \exp\left(\frac{2\pi \cdot r_0}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{\varphi_{\text{ос}}},$$

$$m_0 = \frac{\mu \cdot H}{0,62 \cdot \beta \cdot \cos \gamma} \alpha_0,$$

$$\varphi_{\text{ос}} = \frac{\tau}{\tau_{\Phi} + \tau_{\Pi}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_{\Phi} + \tau_{\Pi}}{\tau}\right) \right],$$

$$\tau = \frac{\lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot D_a}, \quad \tau_{\Phi} = \frac{1}{V} \sqrt{\frac{d \cdot \lambda}{2}},$$

и испарения [3,6]. Их пересечение дает значения минимально регистрируемой массы  $m_{\min}$ , линейной электронной плотности следа  $\alpha_{\min}$  и характеристической высоты  $h_0$ .

Оказалось, что по модели В. С. Тохтасьева (2) независимо от плотности частиц потока (благодаря высокой чувствительности РЛС)  $h_0 \simeq 101$  км,  $m_{\min} \simeq 1,6 \cdot 10^{-4}$  г,  $\alpha_{\min} \simeq 2,1 \cdot 10^{12}$  эл/см, а по модели К. В. Костылева (1)  $h_0^1 \simeq 102$  км,  $m_{\min}^1 \simeq 6,3 \cdot 10^{-5}$  г,  $\alpha_{\min}^1 \simeq 2,2 \cdot 10^{11}$  эл/см для плотности  $\delta = 3,4$  г/см<sup>3</sup>.

Детальные наблюдения потока Леонид на указанной аппаратуре проводились 12—20 ноября 1966 г., 14—20 ноября 1967 г. и 17—18 ноября 1968 г. Для выделения фона использовались наблюдения до указанных периодов и после. Результаты распределения численности метеоров приведены на рис. 1 для 17—18 ноября 1966—1968 гг. Анализ распределения численностей показывает, что уверенно поток выделяется только 15—19 ноября. Основные особенности потока с учетом распределения по длительностям эхо заключаются в том, что в 1966 и 1968 гг. Земля прошла через сгущения потока, богатые крупными частицами, а в 1967 г. — богатые мелкими. Это же подтверждает и поведение параметра  $s$  распределения метеоров по массам (рис. 2), определенное нами по распределению эхо средних длительностей.

Определение плотности падающего потока  $Q(m_{\min})$  по наблюдаемой численности  $N_{\Pi}$  потоковых метеоров производилось по формулам, полученным в ряде работ [1, 2, 7, 8]:

$$N_{\Pi} = Q(m_{\min}) \cdot H \cdot h_0 \cdot \left(\frac{\cos \chi}{\cos \delta_m}\right)^{s-1} \cdot \sin^{-2} \chi \cdot$$

$$\cdot \left\{ J \cdot V^{s-1}(\omega) \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{f^{k_1}(\chi, \theta)}{\cos^2 \theta} d\theta + J_n \cdot \xi_c^{k_2 \cdot \nu - s + 1} V_n^{s-1}(\omega) \cdot \right.$$

$$\cdot \left[ \int_{-\pi/2}^{\theta_1} \frac{f^{k_2}(\chi, \theta)}{\cos^2 \theta} d\theta + \int_{\theta_2}^{\pi/2} \frac{f^{k_2}(\chi, \theta)}{\cos^2 \theta} d\theta \right] \quad (3)$$

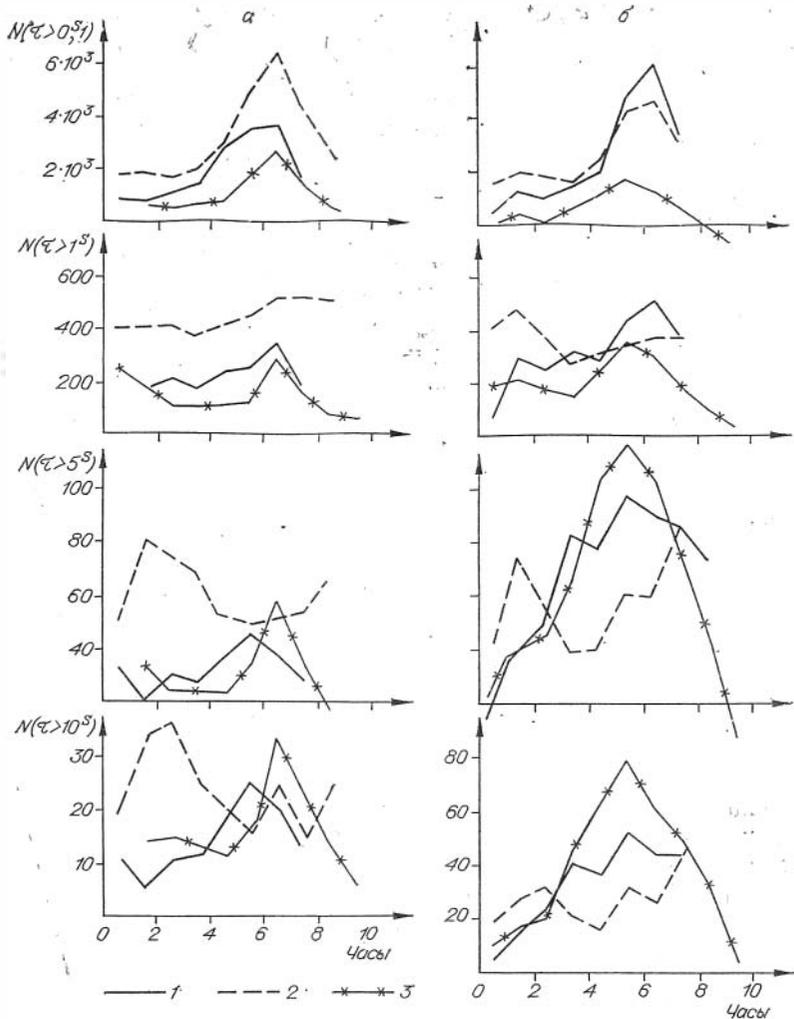


Рис. 1. Изменение численности радиоэхо 17 (а) и 18 (б) ноября 1966—1968 гг. с длительностями  $\tau \geq 0,1^s; 1^s; 5^s$  и  $10^s$ .  
Здесь и на рис. 2—5: 1 — 1966 г.; 2 — 1967 г.; 3 — 1968 г.

(здесь  $\chi$  — зенитное расстояние радианта;  $\delta_m$  — значение  $\chi$ , соответствующее максимуму чувствительности антенны ( $\sim 26^\circ$ );  $\Theta$  — угол в плоскости эхо;  $J, J_n$  — средние толщины ионизированных метеорных слоев соответственно для недоуплотненных и переуплотненных следов;  $V(\omega)$  — множитель, учитывающий селективность радиолокационной станции в зависимости от скорости и изменения  $\chi$ ;  $f(\chi, \Theta)$  — функция, учитывающая направленные свойства антенной системы;  $\xi_c$  — относительная переходная электронная

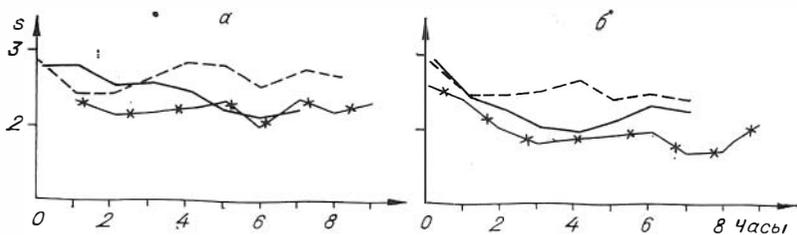


Рис. 2. Изменение параметра  $s$  распределения метеоров по массам 17 (а) и 18 (б) ноября 1966—1968 гг.

плотность для направления  $\chi = \delta_m$ ,  $\Theta = 0$ ; определение  $\xi_c = \alpha_c / \alpha_{\min}$ , где  $\alpha_c = 6,0 \cdot 10^{11} \left[ \exp \left( \frac{2\pi \cdot r_0}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{\varphi_{oc}} \right]^{4/3}$ , производилось теоретически путем нахождения пересечения кривой  $\alpha_c$  и кривой ионизации, откуда, по моделям В. С. Тохтасьева,  $\xi_c = 10,0$ , а К. В. Костылева — 14,8).

При выделении потоковых метеоров  $N_{\Pi}$  из общего числа зарегистрированных  $N_{\Pi+\Phi}$  возникли трудности, связанные с тем, что при наблюдении на  $\lambda = 17$  м существуют значительные вариации численности спорадических метеоров. Обычный способ выделения потока по спорадическому фону в какую-либо дату до или после его прохождения искажает  $N_{\Pi}$  так, что в некоторых случаях  $N_{\Pi} < 0$ . Следовательно, нужно использовать некоторое среднее значение численности спорадических метеоров. С учетом машинной обработки метеорных потоков нами был применен метод флуктуаций, позволяющий выделять из переменной величины  $N_{\Pi+\Phi}$  приблизительно постоянную часть  $N_{\Phi}$ , и тогда  $N_{\Pi} = N_{\Pi+\Phi} - N_{\Phi}$ .

Метод флуктуаций заключается в следующем. Рассматриваются два момента  $t - \Delta t$  и  $t$  и определяется, какое количество метеоров должно быть в момент  $t - \Delta t$  при условии, что в момент  $t$  оно не превышает  $x$ . Причем за промежуток  $\Delta t$  возможны два несовместимых события. Количество метеоров может измениться только за счет: а) пролета спорадических метеоров и б) вторжения в атмосферу метеоров потока и спорадического фона. Можно показать, что в этом случае вероятность  $\psi(x, t)$  зафиксировать к моменту  $t$  число метеоров, не большее  $x$ , определяется соотношением

$$\psi(x, t) = \psi(x - \eta \cdot \Delta t, t - \Delta t) \cdot (1 - \lambda \cdot \Delta t) + \lambda \cdot \Delta t \cdot \int_0^{\infty} \psi(x - \eta \cdot \Delta t - \xi, t - \Delta t) \cdot \chi(\xi) \cdot d\xi,$$

где  $\eta$  — наблюдаемое количество спорадических метеоров в единицу времени;  $\eta$  — вероятность встретить поток в единицу времени;  $\xi$  — количество метеоров в потоке;  $\chi(\xi)$  — нормированная функция распределения  $\xi$ . Переходя к начальным моментам  $\mu_n(t)$  дифферен-

циальной функции распределения  $f(x, t) = \psi'_x(x, t)$ , получим уравнение флуктуаций числа наблюдаемых метеоров в виде

$$\frac{d\mu_n(t)}{dt} - \eta \cdot n \cdot \mu_{n-1} - \lambda \cdot \sum_{k=1}^n c_n^k \cdot \bar{\xi}^k \cdot \mu_{n-k}(t) = 0, \quad (4)$$

где  $C_n^k$  — биномиальные коэффициенты, а  $\bar{\xi}^k$  — среднее значение  $k$ -й степени числа метеоров в потоках. На основе (4) можно записать следующие выражения для начальных моментов первых трех порядков:

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= a \cdot \bar{c} - b \\ \mu_2 &= \mu_1^2 + a \bar{c}^2 \\ \mu_3 &= 3 \cdot \mu_1 \cdot \mu_2 - 2 \cdot \mu_1^3 + a \cdot \bar{c}^3 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $a = \lambda \cdot t$  — математическое ожидание числа потоков за время  $t$ ;  $c = \bar{\xi}$  — среднее число метеоров в потоке;  $b = \eta \cdot t$  — математическое ожидание числа спорадических метеоров;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  и  $\mu_3$  — средние значения соответственно 1-, 2- и 3-й степеней числа наблюдаемых метеоров.

Метод флуктуаций был опробован нами на нескольких метеорных потоках. Анализ показал, что более корректным выделение потоковых и фоновых метеоров будет в том случае, если по численностям  $N_{\pi+\phi}$  на какой-то час наблюдений за разные сутки формально отмечать число выбросов  $a$ . Тогда для определения  $N_{\phi} = b$  и  $N_{\pi} = a \cdot \bar{c} = N_{\pi+\phi} - N_{\phi}$  достаточно двух первых уравнений системы (5). Ясно, что этот метод есть математическая форма практического способа выделения потоковых метеоров по среднесуточной кривой численности.

Используя  $N_{\pi}$ , полученные методом флуктуаций, мы рассчитали плотность падающего потока  $Q(m)$  по формуле (3) для  $m \geq m_{\min}$  и  $m \geq 10^{-3}$  г с учетом моделей (1) и (2). На рис. 3 приведены изменения  $Q(m_{\min})$  (модель В. С. Тохтасьева) на 15—19 ноября 1966—1968 гг. с 3 до 6 часов декретного душанбинского времени.

Видно, что плотность падающего потока в 1966 г. была выше, чем в 1967 г., а в 1967 г. — выше, чем в 1968 г. Если учесть,

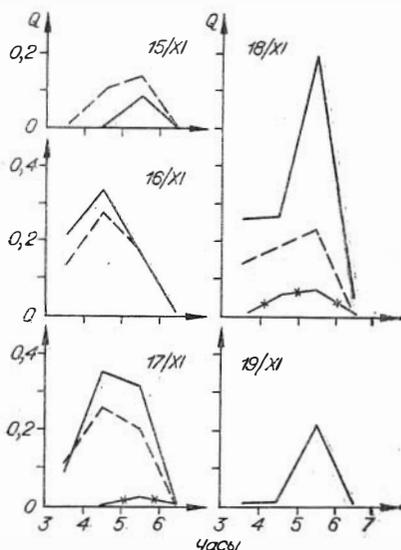


Рис. 3. Изменение плотности падающего потока Леонид 1966—1968 гг. для  $m \geq 1,4 \cdot 10^{-3}$  г в зависимости от декретного времени.

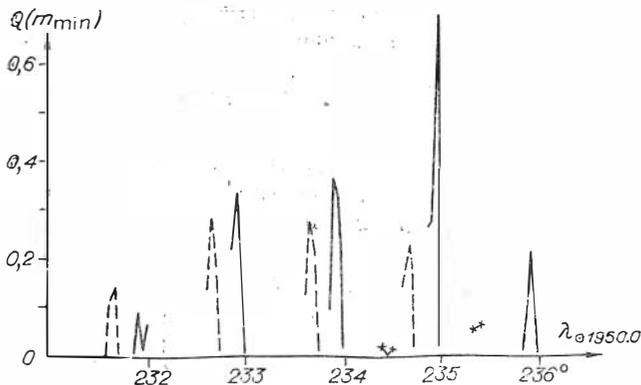


Рис. 4. Изменение плотности падающего потока Леонид 1966—1968 гг. для  $m \geq 1,4 \cdot 10^{-4}$  г в зависимости от долготы Солнца  $\lambda_{\odot}$  1950,0.

что пик 33-летней активности потока Леонид приходится на 1965 г., то убывание плотности падающего потока от 1966 к 1968 г. естественно. Максимальное значение  $Q(m \geq 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ г}) = 0,7$  частиц  $\times$   $\text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  приходится на 18 ноября 1966 г. с 5<sup>h</sup> до 6<sup>h</sup>, а в 1967 г. —  $Q(m_{\min}) = 0,28$  частиц  $\cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  — на 16 ноября с 4<sup>h</sup> до 5<sup>h</sup> и примерно таким же было 17 (0,27 частиц  $\cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) и 18 (0,23 частиц  $\cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) ноября. Таким образом, в 1966 г. Земля прошла через плотную часть потока. Следует отметить, что плотность потока 20 ноября 1966 и 1967 гг. была пренебрежимо малой.

Расчет  $Q(m_{\min}^1)$  по модели К. В. Костылева дает такой же ход плотности потока во времени со значениями  $Q$ , меньшими на 10 ÷ ÷ 27% в часы максимума.

На рис. 4 приведен график  $Q(m_{\min})$  в зависимости от долготы Солнца  $\lambda_{\odot}$ , приведенной к эпохе 1950, 0, а на рис. 5 —  $Q(m \geq 10^{-3} \text{ г})$ . Их сравнение показывает неоднородную структуру потока Леонид. В частности, максимум плотности падающего потока 1966 г. объясняется наличием значительного числа крупных частиц. А в 1967 г. чередовались «пачки» различной плотности. Заметим в связи с этим, что выявление детальной структуры потока Леонид делением наблюдений на промежутки, кратные часу, является грубым.

Отметим также, что вид графиков на рис. 3 показывает, что нами не полностью учтена селективность РЛС за счет направленных свойств диаграммы направленности. Поэтому все дальнейшие сведения приводим только для часов суток, для которых поток определен уверенно (4<sup>h</sup> — 6<sup>h</sup>).

Кроме плотности падающего потока метеорных тел, представляют интерес такие структурные характеристики потока, как пространственная плотность частиц  $D$ , плотность метеорного вещества  $\rho$ , а также число частиц, которые Земля встречает в единицу времени  $n$ , и приток метеорного вещества на Землю  $\Delta M$ . Поскольку

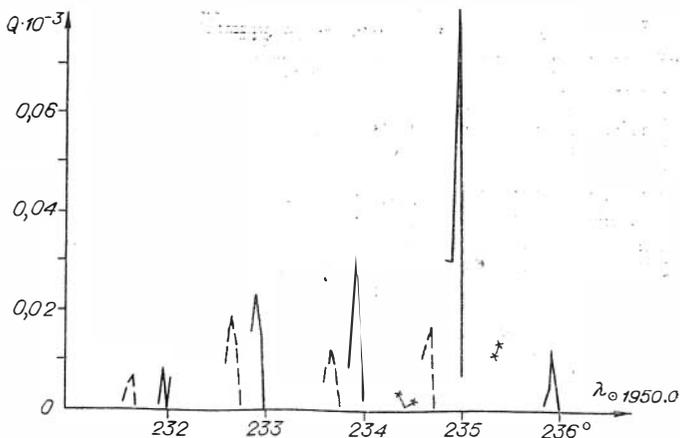


Рис. 5. Изменение плотности падающего потока Леонид 1966—1968 гг. для  $m \geq 10^{-3}$  г в зависимости от  $\lambda_{\odot}$  1950,0.

эти характеристики искажаются притяжением и движением Земли, то их исправленные значения за притяжение будем отмечать индексом  $g$  (геоцентрическая система координат), а освобожденные от движения Земли — индексом  $h$  (гелиоцентрическая система координат).

В таблице для  $m \geq 10^{-3}$  г приведены значения  $Q_g$ ,  $Q_h$  (частиц  $\times \times \text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ ),  $D_g = D_h$  (частиц  $\cdot \text{км}^{-3}$ ),  $\rho_g = \rho_h$  ( $\text{г} \cdot \text{км}^{-3}$ ), число частиц  $n$ , которые Земля встречает за 1 ч, приток метеорного вещества на всю Землю  $\Delta M$  ( $\text{кг} \cdot \text{ч}^{-1}$ ) и приток за сутки  $M$  ( $\text{кг} \cdot \text{сут}^{-1}$ ). Как видно, пространственная плотность частиц в максимуме потока (5<sup>h</sup> 18/XI 1966 г.) составляет  $D(10^{-3}) = 3,1 \cdot 10^{-7}$  частиц  $\cdot \text{км}^{-3}$ , а плотность вещества  $\rho(10^{-3}) = 2,1 \cdot 10^{-9}$  г  $\cdot \text{км}^{-3}$ , что значительно выше, чем по данным Б. Ю. Левина [4], полученным визуально [ $D(10^{-3}) \simeq 10^{-9}$  частиц  $\cdot \text{км}^{-3}$ ]. Приток метеорного вещества на Землю меняется от 4,2 кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$  15 ноября до 0,6 кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$  20 ноября, достигая в максимуме 1966 г.  $\Delta M = 73,8$  кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$ . Приток для  $m \geq 1,6 \cdot 10^{-4}$  г 15/XI 1966 г. составляет 17,8 кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$ , а в максимуме плотности потока 18/XI 1966 г. равен 101 кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$  и 20/XI 1966 — 2,2 кг  $\cdot \text{ч}^{-1}$ . Суммарная масса привнесенного метеоритного вещества на Землю с 15 по 20 ноября 1966 г. составляет  $\sim 2,6$  т для  $m \geq 10^{-3}$  г и около 10,7 т для  $m \geq 1,6 \cdot 10^{-4}$  г, а в 1967 г. с 15 по 18 ноября соответственно 0,5 и 1,3 т. В 1968 г. приток за 17 ноября был меньше в 2,2 раза, чем в 1967 г., и в 10 раз меньше по сравнению с 1966 г., а 18 ноября 1968 г. преобладающими были частицы крупного размера ( $s < 2$ ), так что приток был сравним с притоком 18 ноября 1966 г.

Плотность падающего потока Леонид 17/XI 1965 г. по радионаблюдениям была определена в Казани [5]. Поскольку значение

Значения структурных параметров потока Леонид

| Параметры метеороидных потоков | 1966 г.              |                      |                      |                     |                      |                      |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                                | 15/II                | 16/II                | 17/II                | 18/II               | 19/II                | 20/II                |
| $Q$                            | $8,1 \cdot 10^{-3}$  | $2,4 \cdot 10^{-2}$  | $3,1 \cdot 10^{-2}$  | $8,2 \cdot 10^{-2}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$  | $1,9 \cdot 10^{-3}$  |
| $Q_g$                          | $7,7 \cdot 10^{-3}$  | $2,3 \cdot 10^{-2}$  | $2,9 \cdot 10^{-2}$  | $7,8 \cdot 10^{-2}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$  | $1,8 \cdot 10^{-3}$  |
| $Q_h$                          | $4,5 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-2}$  | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $4,5 \cdot 10^{-2}$ | $7,4 \cdot 10^{-3}$  | $1,0 \cdot 10^{-3}$  |
| $D_g$                          | $3,0 \cdot 10^{-8}$  | $9,0 \cdot 10^{-8}$  | $1,1 \cdot 10^{-7}$  | $3,1 \cdot 10^{-7}$ | $5,1 \cdot 10^{-8}$  | $7,1 \cdot 10^{-9}$  |
| $\rho_g$                       | $1,2 \cdot 10^{-10}$ | $2,9 \cdot 10^{-10}$ | $4,3 \cdot 10^{-10}$ | $2,1 \cdot 10^{-9}$ | $1,5 \cdot 10^{-10}$ | $1,7 \cdot 10^{-11}$ |
| $n$                            | $1,1 \cdot 10^6$     | $3,2 \cdot 10^6$     | $4,1 \cdot 10^6$     | $1,1 \cdot 10^7$    | $1,8 \cdot 10^6$     | $2,5 \cdot 10^5$     |
| $\Delta M$                     | 4,2                  | 10,2                 | 16,0                 | 73,8                | 5,2                  | 0,6                  |
| $M$                            | 101                  | 244                  | 384                  | 1772                | 124                  | 14                   |

$m_{\min}$  в работе не указано, то, воспользовавшись отношением минимально регистрируемой электронной концентрации потока Леонид к аналогичной величине потока со скоростью  $V = 40$  км/с, равной, по данным этой работы, 3,5, получим по модели испарения В. С. Тохтасьева  $m_{\min} = 2,3 \cdot 10^{-4}$  г. Перевычисленное значение максимальной плотности падающего потока  $Q(2,3 \cdot 10^{-4}) = 0,60$  частиц  $\cdot$  км $^{-2} \cdot$  ч $^{-1}$  для  $m \geq 1,6 \cdot 10^{-4}$  г равно  $Q = 0,70$  частиц  $\cdot$  км $^{-2} \cdot$  ч $^{-1}$  ( $S = 1,4$ ), что совпадает с нашим результатом для 18/XI 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белькович О. И. Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань, 1971. 100 с.
2. Белькович О. И., Тохтасьев В. С., Сулейманов Н. И. Некоторые структурные особенности метеорных потоков Геминид и Квадрантид.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, Дониш, 1975, с. 93—99.
3. Костылев К. В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань, 1970. 142 с.
4. Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М., Изд-во АН СССР, 1956. 293 с.
5. Пупышев Ю. А., Тохтасьев В. С. Радиолокационные наблюдения потока Леонид в 1965 г.— В кн.: Метеорное распространение радиоволн. Казань, 1969.
6. Тохтасьев В. С. Абляция метеорных тел в атмосфере Земли.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, Дониш, 1975, с. 10—20.
7. Bel'kovich O. I., Tokhtas'ev V. S. Determination of the Quadrantid incident flux density. Part 1.— Bul. of the Astronom. Institute of Czechoslovakia, 1974, v. 25, N 2, p. 112—115.
8. Bel'kovich O. I., Tokhtas'ev V. S. Determination of the Quadrantid incident flux density.— Part II.— Bul. of the Astronom. Institute of Czechoslovakia, 1974, v. 25, N 6, p. 370—374.

| 1967 г.              |                      |                      |                      | 1968 г.              |                     |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 15/II                | 16/II                | 17/II                | 18/II                | 17/II                | 18/II               |
| $6,8 \cdot 10^{-2}$  | $1,8 \cdot 10^{-2}$  | $1,1 \cdot 10^{-2}$  | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $2,3 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-2}$ |
| $6,4 \cdot 10^{-3}$  | $1,7 \cdot 10^{-2}$  | $1,1 \cdot 10^{-2}$  | $1,6 \cdot 10^{-2}$  | $2,2 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-2}$ |
| $3,8 \cdot 10^{-3}$  | $1,0 \cdot 10^{-2}$  | $6,3 \cdot 10^{-3}$  | $9,2 \cdot 10^{-3}$  | $1,3 \cdot 10^{-3}$  | $7,3 \cdot 10^{-3}$ |
| $2,5 \cdot 10^{-8}$  | $6,7 \cdot 10^{-8}$  | $4,3 \cdot 10^{-8}$  | $6,3 \cdot 10^{-8}$  | $8,6 \cdot 10^{-9}$  | $5,1 \cdot 10^{-8}$ |
| $6,2 \cdot 10^{-11}$ | $2,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,0 \cdot 10^{-10}$ | $4,5 \cdot 10^{-11}$ | $2,1 \cdot 10^{-9}$ |
| $8,9 \cdot 10^6$     | $2,4 \cdot 10^6$     | $1,5 \cdot 10^6$     | $2,2 \cdot 10^6$     | $3,0 \cdot 10^5$     | $1,7 \cdot 10^6$    |
| 2,2                  | 7,3                  | 3,6                  | 7,1                  | 1,6                  | 70                  |
| 53                   | 175                  | 85                   | 170                  | 38                   | 1680                |

**О МАЛОМ МЕТЕОРНОМ ПОТОКЕ,  
НАБЛЮДАВШЕМСЯ 17—20 НОЯБРЯ 1967 г.  
НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 17 м**

*Г. В. АНДРЕЕВ, Р. Г. ЛАЗАРЕВ, Л. Н. РУБЦОВ*

При оценке притока метеорного вещества на Землю необходимо знать массу, приносимую спорадическими метеорами, к которым относятся и малые метеорные потоки. В то же время приток от малых метеорных потоков трудно определим, поскольку при визуальных наблюдениях они слабо проявляются, а при радионаблюдениях их сложно выделить из фона. При радиолокации метеоров на длине волны 17 м, кроме основных метеорных потоков, фиксируется значительное количество малых потоков. Их выделено около пятидесяти в течение года [6]. В данной работе выделяется еще один малый поток, уверенно наблюдавшийся 17—20 ноября 1967 г., и делается попытка определить плотность падающего потока и притока метеорного вещества от него на Землю.

При наблюдении метеорного потока Леонид в 1966—1968 гг. было замечено существование радианта, предшествующего началу проявления потока Леонид на 2—3 часа. Причем этот радиант выделялся уверенно только в 1967 г. и был кратковременным с 1 до 2 часов декретного душанбинского времени. В 1966 и 1968 гг. в этот период наблюдался обычный ход суточной кривой численности. На рис. 1 показано изменение численности радиоэхо 14—20 ноября 1967 г., а также максимальный и минимальный уровни численности в 1966 и 1968 гг. (пунктир) на указанные даты для длительностей эхо  $\tau \geq 1^s, 5^s, 10^s$ . Если в 1967 г. при  $\tau \geq 0^s, 1$  с  $1^h$  до  $2^h$  ход суточной кривой лишь слегка превышает уровень 1966 и 1968 гг., достигая в максимуме 18/XI 1967 г.  $N = 2083$  эхо против  $N = 1368$  — 18/XI 1966 г., то при  $\tau \geq 1^s$  это выделение уже четкое. Так, число эхо 18/XI 1967 г.  $N(18)$  в 1,4 раза больше минимального значения 16/XI 1967 г.  $N(16)$  и в 1,5 раза превышает максимум 1966 г. Подобное превышение наблюдается уверенно

17, 18 и 20 числа. К сожалению, отсутствуют наблюдения 19/XI 1967 г. Явное превышение фона 17, 18 и 20 ноября заметно и при длительностях  $\tau \geq 5$  с, причем минимум также приходится на 16/XI 1967 г. Так, в 1967 г.  $N(17)/N(16) \approx 2,0$  и в 1,5 раза выше максимума 1966 г. Заметим, что при этих длительностях в день максимума поток проявляется и в  $2^h-3^h$ . При длительностях  $\tau \geq 10^s$  поток действует в течение 2 часов также и 18 числа с максимумом 17 ноября и минимумом 16 ноября. При этом  $N(17)/N(16) \approx 2,2$  и в 1,8 раза больше максимального уровня 1966 г.

Таким образом, можно сделать вывод, что данный малый поток сравнительно богат крупными частицами (наблюдалось 2 метеора 18/XI 1967 г. с длительностью  $\tau \geq 60^s$ ). Об этом говорит и поведение параметра  $s$  распределения масс. На рис. 2 приведен график  $s_{п+ф}$ , характеризующий распределение масс потока и фона с  $1^h$  до  $2^h$  на соответствующие даты 1966 и 1967 гг., а также значение  $s_{п}$  для потока. За спорадический фон принята средняя численность 1966, 1968 гг. и 16/XI 1967 г. Заметно уменьшение  $s_{п+ф}$  и  $s_{п}$  в момент активности потока, т. е. относительное увеличение доли крупных частиц в потоке по сравнению с фоном.

Для отождествления этого малого метеорного потока с известными были рассмотрены все метеорные потоки [7], благоприятно проходящие диаграмму направленности нашей антенны. Момент пересечения радиантом плоскости эхо соответствующей чувствительности определялся из соотношения

$$t = 180^\circ + \arccos \{ \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} [\arcsin(\sin h \cdot \sin \varphi)] \} + \arccos \{ \operatorname{ctg} \varphi \cdot \operatorname{tg} [\arcsin(\sin h \cdot \sin \varphi)] \}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — склонение радианта;  $\varphi$  — широта места наблюдения;  $h$  — вертикальный угол диаграммы направленности, соответст-

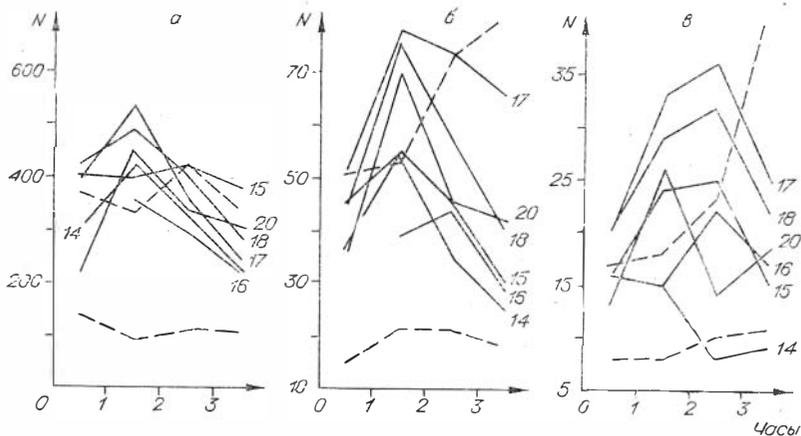
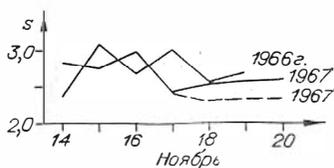


Рис. 1. Изменение численности радиоэхо 14—20 ноября для длительностей  $\tau \geq 1^s$  (а),  $\tau \geq 5^s$  (б) и  $\tau \geq 10^s$  (в).

Рис. 2. Поведение параметра  $s$  распределения масс для потока плюс фона (сплошная линия) и потока (штриховая) 14—20 ноября 1967 г.



вующий определенной чувствительности. Затем осуществлялся переход к декретному времени. Единственным потоком, удовлетворительно совпадающим по времени с описанным выше, является поток Aurds ( $\alpha_{1950,0} = 99^\circ$ ,  $\delta_{1950,0} = 41^\circ$ ), который был активен 17<sup>а</sup>, 874 1965 г. по визуальным наблюдениям И. С. Астаповича и А. К. Терентьевой [1] ( $\alpha_{1950,0} = 86^\circ$ ,  $\delta_{1950,0} = 37^\circ$ ). Согласно (1), этот поток теоретически может находиться в поле зрения антенны по уровням половинной мощности излучения с  $\sim 0^h 30^m$  до  $\sim 2^h 40^m$ , проходя плоскость эхо с максимальной чувствительностью  $\sim 1^h 40^m$  декретного времени.

При определении плотности падающего потока пользовались методом построения контуров равной чувствительности [3]. Для этого была детально просчитана диаграмма направленности с шагом в  $2^\circ$ . Определение эффективной площади  $S_{эф}(A, z, V)$  проводилось с учетом того, что средняя длина следа метеора равна [4]

$$\bar{l} = \frac{2,75H^*}{\cos z},$$

а плотность падающего потока метеорных тел с массами  $m_0$  и больше [3]

$$Q(m_0) = \frac{N}{S_{эф}(A, z, V) \cos z}, \quad (2)$$

где  $H^*$  — высота однородной атмосферы;  $A, z$  — горизонтальные координаты радианта;  $V$  — внеатмосферная скорость. В предположении потока Aurds [1,7] нами была вычислена эффективная собирающая площадь, среднее значение которой с  $1^h$  до  $2^h$  составило  $S_{эф} \cdot \cos z \simeq 5000 \pm 1600 \text{ км}^2$ . Ошибка обусловлена в основном произволом координат радианта и скорости. Минимально регистрируемая масса  $m_0$  определялась путем нахождения пересечения кривой чувствительности (т. е. зависимости  $m_0$  от параметров РЛС, высоты следа, учета эффектов начального радиуса, диффузии и оперативности) и кривой испарения [4,8]. Оказалось, что  $m_0 \simeq (3,4 \pm 1,9) \cdot 10^{-5} \text{ г}$ , причем ошибка в большей степени объясняется различием моделей начального радиуса, диффузии, ионизации и испарения, нежели неопределенностью координат радианта и скорости потока (50—60 км/с).

Плотность падающего потока, вычисленная для масс  $m_0$  и выше по численностям эхо, освобожденным от спорадического фона, составила  $Q(17) = 0,07 \pm 0,02$ ,  $Q(18) = 0,125 \pm 0,04$ ,  $Q(20) = 0,05 \pm 0,02$  частиц  $\cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$  соответственно 17, 18 и 20 ноября 1967 г. или для долгот Солнца, приведенных к эпохе 1950,0:  $233^\circ,76$ ;  $234^\circ,77$  и  $236^\circ,79$ .

Приток метеорного вещества на Землю, вносимый этим малым потоком, определялся по методике [5]; он равен  $1040 \pm 650$  17 ноября,  $2390 \pm 870$  18 ноября,  $910 \pm 650$  г/ч 20 ноября для масс  $m_0$  и более.

Ширина потока, вычисленная по уровню половинной максимальной плотности, составляет  $4^\circ$ , т. е. он более «размазан» по сравнению с потоком Геминиды [2]. И за это время Земля «вычерпывает» из малого потока 100—200 кг метеорного вещества.

Заметим, что  $S_{\text{эф}}(A, z, \nu)$  определялась только для зеркальных следов. Однако при наблюдениях на длине волны 17 м значительное количество составляют следы, которые, будучи вначале своего существования незеркальными для данной диаграммы направленности, в дальнейшем под действием турбулентной диффузии и ветров становятся благоприятными для наблюдения. Так, в эпоху активности исследуемого малого потока число незеркальных следов составляло  $\sim 20\%$  от общего числа радиоэхо. Нами была вычислена  $S_{\text{эф}}$  при условии, что незеркальность может доходить до  $\pm 2^\circ, 5$ . В этом случае площадка примерно удваивается, а плотность падающего потока и приток становятся меньше соответственно в 2 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Астапович И. С., Терентьева А. К. Метеорный поток Леонид.— Кометы и метеоры, Душанбе, 1966, № 14, с. 24—37.
2. Белькович О. И., Тохтасев В. С., Сулейманов Н. И. Некоторые структурные особенности метеорных потоков Геминид и Квадрантид.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, Дониш, 1975, с. 93—99.
3. Кацеев Б. Л., Лебединец В. Н., Лагутин М. Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., Наука, 1967. 260 с.
4. Костылев К. В. Астрономические основы метеорной радиосвязи. Казань, 1970. 142 с.
5. Левин Б. Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. М., Изд-во АН СССР, 1956. 293 с.
6. Рубцов Л. Н., Соловей Б. Г. Наблюдение слабых метеоров.— Бюл. Ин-та астрофизики АН ТаджССР. Душанбе, 1974, № 63, с. 33—38.
7. Терентьева А. К. Малые метеорные рои.— В кн.: Исследование метеоров. М., 1966, с. 62—132.
8. Тохтасев В. С. Абляция метеорных тел в атмосфере Земли.— В кн.: Материалы Всесоюзного симпозиума «Взаимодействие метеорного вещества с Землей и оценка притока метеорного вещества на Землю и Луну». Душанбе, Дониш, 1975, с. 10—20.

### ЗЕЛЕНАЯ ЛИНИЯ КИСЛОРОДА В СПЕКТРАХ МЕТЕОРОВ И ГОЛОВНЫЕ ЭХО

В. А. БРОШТЭН

Свечение запрещенной зеленой линии кислорода в спектрах метеоров и явление так называемого головного эхо — два, казалось бы, совершенно разных явления, тем не менее обнаруживают

тесную взаимосвязь, которая еще не получила удовлетворительного теоретического объяснения.

Явление головного эхо было открыто почти на десятилетие раньше, чем зеленая линия, независимо двумя группами исследователей: Дж. Хеем, С. Парсонсом и Дж. Стюартом в 1946 г. [16] и П. Миллманом и Д. Мак-Кинли в 1949 г. [22]. В отличие от основного эхо, возникающего в результате отражения радиоволн ионным следом метеора, головное эхо, как показывает его изображение на экране локатора (рис. 1), образуется источником, движущимся вместе с метеором. Д. Мак-Кинли и П. Миллман тогда же выдвинули гипотезу о том, что этим источником является «сгусток ионизации», образующийся впереди тела под действием сильного ультрафиолетового излучения ударной волны. Эта гипотеза была проверена количественно в 1960 г. А. Куком и К. Хоукинсом [8] и в 1962 г. Б. Мак-Интошем [20], получившими необходимое значение коэффициента рекомбинации для области, создающей явление головного эхо,  $10^{-5}$  см<sup>3</sup>/с. По мнению А. Кука и К. Хоукинса, перед метеорным телом действительно образуется «ореол» ионов и электронов, имеющий форму эллипсоида. Тогда же, в 1962 г., при анализе радарных наблюдений, сделанных при входе в атмосферу космического аппарата «Меркурий», С. Лин [18] обнаружил «ореол фотоионизации» впереди корпуса аппарата.

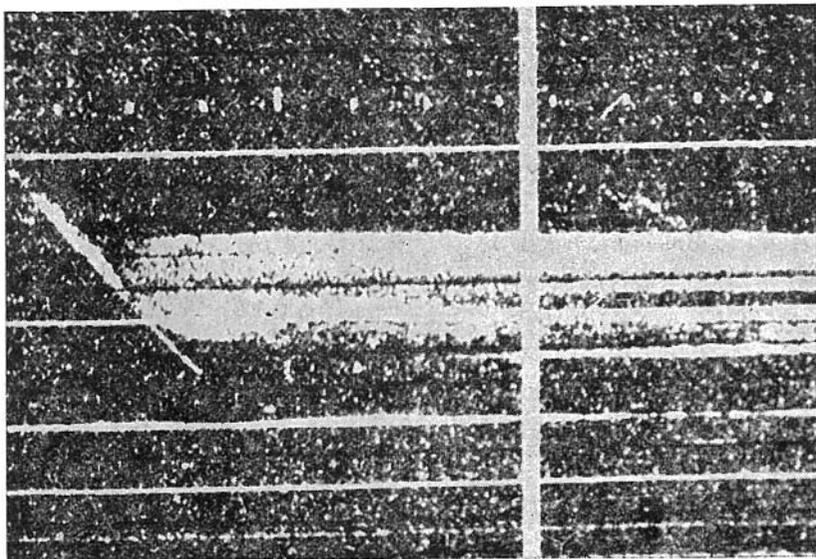


Рис. 1. Изображения на экране радиолокатора головного эхо (линия, идущая наискосок слева) и основного эхо от следа (полоса, идущая горизонтально). Метеор принадлежит потоку Персеид. По горизонтали — ось времени, по вертикали — ось расстояний.

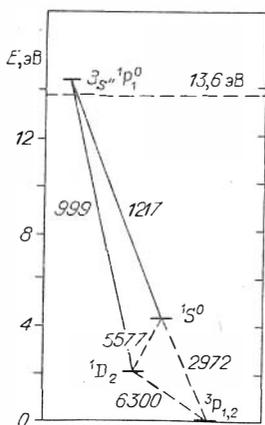


Рис. 2. Схема уровней атома кислорода (показана лишь часть уровней). Числа у прямых — длины волн в ангстремах, соответствующие данному переходу.

Одним из первых обратил внимание на наличие предшествующих ударной волне электронов Р. Холлвер [17], проводивший эксперименты в ударных трубах. В то время пытались объяснить этот эффект фотоэлектронной эмиссией стенок космического корабля под действием излучения горячего газа в ударной волне, а также диффузией электронов через фронт волны. Но уже в 1959 г. Л. М. Биберман и Б. А. Векленко [1] дали первую теоретическую разработку вопроса, доказав, что электроны перед фронтом образуются за счет ионизации УФ-излучением ударной волны. К тому же результату позднее привели Р. Хаммерлинг [15], К. Феррари и Дж. Кларк [10].

Вообще проблеме ионизации опережающим излучением ударной волны посвящены десятки работ — как теоретических, так и экспериментальных. Хороший обзор зарубежных исследований проблемы имеется в работе А. Пирри и Дж. Кларка [26], советские исследования отражены в обзоре Л. М. Бибермана и др. [2].

Запрещенная зеленая линия кислорода на 5577 Å была обнаружена в спектрах метеоров Я. Халлидем в 1958 г. [12]. Начавшись на высотах 115—120 км, она высвечивала и в перерывах, создаваемых обтюратором, с продолжительностью свечения ~1 с. Это означало, что свечение происходит в ионном следе метеора. Удалось заметить искривление этой линии в результате действия ветров, придававших ей змеевидную форму. В 1960 г. Я. Халлидей [13] заметил, что в годы максимума солнечной активности зеленая линия наблюдается чаще и заканчивается ниже, чем обычно (на высоте ~75 км).

Напомним, что зеленая линия кислорода впервые наблюдалась в спектрах полярных сияний еще в 60-е годы XIX в., почти за 100 лет до ее обнаружения в спектрах метеоров. Позже излучение этой линии было найдено в спектрах сумеречного и ночного неба [6].

Линия [OI] 5577 Å соответствует (рис. 2) переходу  $1S^0 \rightarrow 1D_2$ , причем времена жизни этих состояний равны 0,75 и 110 с соответственно. Переход  $1D_2 \rightarrow 3P_{1,2}$  дает красный дублет 6300—6364 Å, также хорошо наблюдаемый в спектрах полярных сияний, сумеречного и ночного неба, но никогда не наблюдавшийся в спектрах метеоров.

Вопрос о процессе возбуждения метастабильного уровня  $1S^0$  атома [OI] в случае как полярных сияний, так и метеоров далеко

не прост. Для возбуждения этого уровня из основного состояния необходима энергия 4,15 эВ. Такую энергию имеют кванты излучения с длиной волны 2972 Å. Однако прямые переходы с основного уровня на метастабильный запрещены правилами отбора, а единственный разрешенный переход на уровень  ${}^1S^0$  возможен только с синглетного состояния  $3s, {}^1P_1^0$  возбужденной конфигурации  $2p^3({}^2P^0)$ , расположенного на 14,37 эВ над основным уровнем и на 0,76 эВ над порогом ионизации [7]. Для возбуждения состояния  ${}^1P_1^0$  требуется уже УФ-излучение с длиной волны 863 Å, доля которого в солнечном излучении крайне мала. Это обстоятельство, наряду с фактами присутствия запрещенных линий [OI] в излучении ночного неба, заставило теоретиков отклонить механизм фотовозбуждения метастабильных уровней [OI] в полярных сияниях и рассматривать только ударные механизмы.

Что касается метеоров, то решительным возражением против механизма фотовозбуждения является тот факт, что зеленая линия наблюдается и у относительно слабых метеоров, до  $+2^m$ , на высотах от 110—120 км [5], где ударная волна еще не образуется, а значит, не может быть опережающего излучения.

Прежде чем рассматривать те или иные механизмы возбуждения свечения зеленой линии и образования головного эхо, отметим ряд моментов, относящихся к этим явлениям. На тесную связь между ними указал в 1965 г. Я. Райхль [27].

1. Головные эхо наблюдаются не только у ярких метеоров, но и у сравнительно слабых — до  $+2^m$  [27] (как и зеленая линия). Высота образования головных эхо понижается от 120 км у метеоров —  $5^m$  до 105 км у метеоров  $+2^m$ , высота исчезновения повышается от  $\sim 85$  до 95—100 км соответственно. По сравнению с основным эхо (отражением от ионного следа метеора) головное эхо начинается выше (основное эхо имеет максимум на  $H = 95$  км). Интервалы высот для головного эхо и зеленой линии почти одинаковы.

2. Головные эхо чаще встречаются у быстрых метеоров (Персеиды), у них же чаще наблюдается зеленая линия. Исключение в отношении головного эхо составляет медленный поток  $\gamma$ -Дракониды, у которых они тоже наблюдаются.

3. Отмечается относительное постоянство интенсивности обоих явлений вдоль пути метеора.

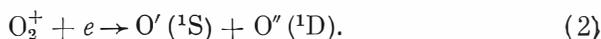
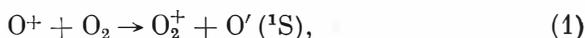
4. Поведение обоих явлений зависит от атмосферных условий, что было установлено Я. Халлидеем [12] в отношении зеленой линии и Б. Мак-Интошем [21] в отношении головного эхо.

5. Излучение в зеленой линии достигает максимума через  $\sim 0,4$  с после прохождения метеора [14].

6. Наблюдается зависимость частоты появления и высот свечения зеленой линии от солнечной активности [13, 19]. Для головных эхо связь менее выражена, и вопрос не может считаться выясненным [25].

Обратимся теперь к механизму возбуждения свечения зеленой линии в метеорных следах. Поскольку диапазон высот ее наблюдения соответствует наибольшей концентрации атомарного кислорода в атмосфере Земли (максимум на  $H = 105$  км) [4], можно считать, что именно атмосферный атомарный кислород ответствен за формирование этой линии, а пролет метеора лишь возбуждает свечение. Максимальная концентрация  $[O]$  в атмосфере Земли на высоте 105 км составляет, по различным оценкам (или в разное время), от  $5 \cdot 10^{11}$  до  $2 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ , на высоте 90 км она на порядок меньше [4, 7].

Реальный механизм возбуждения метастабильного уровня  $^1S_0$  в метеорных следах был предложен в 1960 г. Я. Халлидеем [13]. Это — диссоциативная рекомбинация кислорода:



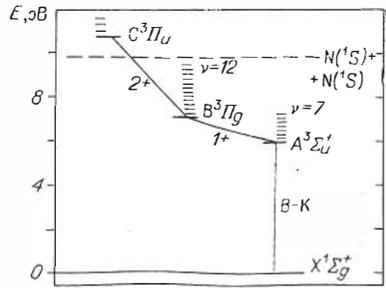
Коэффициенты скоростей этих реакций равны соответственно  $2,5 \cdot 10^{-11}$  и  $3 \cdot 10^{-7}$  см $^3$ /с [7]. Начальный приток ионов  $O^+$  обусловлен метеорной ионизацией. Как полагает Я. Райхль [27], отраженные метеорным телом атмосферные молекулы ионизируют налетающие (в том числе атомы кислорода), после чего происходят реакции (1) и (2). Скорость реакции (2) зависит от электронной концентрации в метеорном следе. Если она равна или превышает  $10^9$  см $^{-3}$  в первые 0,25 с после пролета метеора, то реакция (2) протекает быстро сравнительно с (1), и тогда именно реакция (1) контролирует скорость образования  $O(^1S)$  [11].

Вероятность образования иона  $O^+$  из метеорного атома кислорода была оценена У. Баггалеем [7] в предположении, что ионизация происходит в ходе термализующих столкновений с атмосферными молекулами. При скорости метеора  $V = 60$  км/с (вспомним, что зеленая линия наблюдается в основном у быстрых метеоров) эта вероятность выражается, согласно Э. Эпику [24], числом  $\beta = 0,3$ . Полагая содержание кислорода в метеорном теле 50%, линейную плотность метеорных атомов в следе  $3 \cdot 10^{16}$  см $^{-1}$  (для метеора —  $2^m, 5$ ), У. Баггалеи получил начальную линейную плотность ионов  $O^+$   $4 \cdot 10^{15}$  см $^{-1}$ . Поскольку лишь один из 12 ионов  $O^+$  образует атом  $O(^1S)$ , линейная плотность последних получится  $3,3 \times 10^{14}$  см $^{-1}$ . Эта величина близка к требуемой (для обнаружения фотографическим способом излучения в зеленой линии) линейной плотности  $5 \cdot 10^{14}$  см $^{-1}$ . Примерно такая же величина получается, если рассматривать ионизацию атмосферных атомов кислорода отлетающими молекулами в соответствии с механизмом Я. Райхля [27].

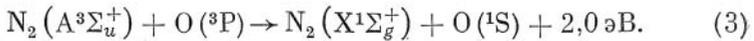
Кроме реакций (1) и (2), различными авторами было предложено еще до десятка реакций, теоретически приводящих к возбуждению уровня  $^1S$ . Среди них: прямое ударное возбуждение, каскад-

Рис. 3. Схемá уровней молекулы азота.

1+, 2+ — первая и вторая положительные системы полос; В—К — система Вегарда — Каплана.



ные переходы с верхних уровней, электронный удар (прямое и диссоциативное возбуждение), передача энергии от возбужденных молекул азота и кислорода, тройные столкновения атомов [OI] ( $^3P$ ) (процесс Чепмена), атомный обмен с участием окиси азота, реакции нейтрализации. Большинство этих механизмов были признаны нереальными еще в ранних работах Я. Халлидея [13] и Я. Райхля [27]. Наибольший полный количественный анализ всех возможных реакций был выполнен недавно У. Баггалеем [7], который показал, что кроме реакций (1), (2) ощутимый вклад в образование атомов [OI] ( $^1S^0$ ) может дать передача энергии от возбужденных молекул азота:



Верхнее (метастабильное) триплетное состояние молекулы азота  $A^3\Sigma_u^+$  — нижний уровень первой положительной системы полос азота, верхним уровнем которой является  $B^3\Pi_g$ , в свою очередь питаемый с уровня  $C^3\Pi_u$  с излучением второй положительной системы азота (рис. 3). Обе системы наблюдаются в метеорных спектрах. Состояние  $A^3\Sigma_u^+$  — верхнее для системы полос Вегарда — Каплана, которая, напротив, в спектрах метеоров никогда не наблюдается. Ее отсутствие в этих спектрах указывает на сильное затухание, причем ниже 90 км тушащими частицами служат молекулы  $O_2$ , а выше — атомы  $O$  с образованием  $O(^1S)$ . Это совместимо с высотным распределением эмиссии 5577 Å. Расчеты У. Баггалея [7] показывают, что необходимая для производства требуемого числа атомов  $O(^1S)$  линейная плотность молекул  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  должна быть  $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-1}$ , что при начальном радиусе ионного следа в 1 м приводит к объемной концентрации  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Это значит, что на высоте 100 км от 0,15 до 0,3% молекул  $N_2$  должно быть в первом триплетном состоянии. Однако необходимых данных о константах прямого ударного возбуждения верхних уровней метастабильного триплетного состояния  $N_2$  в настоящее время не имеется. Поэтому окончательного вывода о роли азотно-кислородного механизма в возбуждении состояния  $O(^1S)$  сделать пока нельзя. Вклад других механизмов, рассмотренных У. Баггалеем [7], признан им несущественным ввиду медленного течения реакций либо вследствие малых концентраций нужных компонент. К аналогичным выводам в отношении части этих реакций пришел ранее У. Голт [11].

Однако в работе У. Баггалея не рассматривалось затухание. Между тем дезактивация возбужденных уровней ударами молекул кислорода может иметь место на более низких высотах (ниже 90 км), а атомами кислорода — выше этого уровня, тушение же ударами электронов может быть эффективным в случае очень ярких метеоров.

Роль этих агентов в дезактивации уровня  $O(^1S)$  была проанализирована У. Голтом [11]. В метеорных следах затухание состояния  $O(^1S)$  происходит быстрее, чем в полярных сияниях, где на высоте 85 км скорость его равна примерно  $0,7 \text{ с}^{-1}$ . Такая же скорость в метеорных следах имеет место на высоте 106 км, где молекулы  $O_2$  и  $N_2$  не могут играть роли дезактиваторов. Атомы кислорода  $O(^3P)$  могли бы обеспечить наблюдаемую скорость затухания, если их концентрация составляла бы  $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , что почти вдвое превышает максимально допустимое значение. Коэффициент затухания  $O(^1S)$  атомами азота (образующимися при диссоциации молекул  $N_2$  в метеорном коме) неизвестен, и их роль пока не может быть оценена.

Что касается электронов, то для электронных температур 1000—2000 К коэффициент затухания  $O(^1S)$  составит  $(2 \div 3) \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$ , и для обеспечения наблюдаемой скорости затухания линии 5577 Å этим механизмом на высоте 105 км нужно допустить электронную плотность в следе  $n_e = 3 \cdot 10 \text{ см}^{-3}$ , что вполне реально для ярких метеоров, как будет показано ниже.

Таким образом, теория свечения зеленой линии в спектрах метеоров разработана на вполне удовлетворительном уровне, хотя некоторые детали возбуждения и дезактивации уровня  $O(^1S)$  требуют уточнения. Гораздо хуже обстоит дело с головными эхо.

Как показали еще в 1960 г. А. Кук и Дж. Хоукис [8], а в 1962 г. Б. Мак-Интош [20], головное эхо является практически мгновенным отражением радиоволн от объекта, движущегося вместе с метеором. Иначе говоря, его длительность меньше постоянной времени радара, которая для канадской установки (Я. Халлидея) равна  $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  [12], а для чехословацкой (на которой с 1959 г. под руководством М. Шимека ведутся систематические наблюдения головных эхо) —  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  [30]. Чтобы длительность головного эхо была меньше этих значений, скорость рекомбинации в метеорном следе должна быть  $10^{-5} \text{ см}^3/\text{с}$  [8, 20], тогда как реакция (2) имеет скорость в 30 раз меньшею.

Чтобы устранить это расхождение, Я. Райхль [27] в 1965 г. сделал предположение, что в неравновесных условиях константа скорости реакции (2) может на 1—2 порядка превышать свое равновесное значение, приведенное выше. Действительно, эксперименты Г. Эберта и др. [9] показали, что в начале процесса рекомбинации типа (2) константа скорости реакции в 10 раз превосходит свое равновесное значение. Я. Райхль [28, 29] привел ряд дополнительных доводов в пользу сделанного им предположения. В частности, из теории начальной стадии неравновесной диссоциативной рекомбинации, разработанной Г. Вильгельмом [31], следует, что на этой

стадии константа скорости реакции (2) может превышать равновесное значение на 2 порядка.

В работах [28, 29] 1968—1969 гг. Я. Райхль развил представление о так называемом слое взаимодействия перед метеорным телом, в котором происходит взаимодействие отраженных и набегающих молекул, развиваются такие процессы, как возбуждение, ионизация и диффузия. Условием существования слоя взаимодействия является выполнение неравенства

$$10^{-1} \leq B \leq 10, \quad B = \frac{v}{v_T} \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $B$  — обратное число Кнудсена;  $v$ ,  $v_T$  — скорости набегающих и отраженных частиц;  $d$  — диаметр тела;  $\lambda$  — длина свободного пробега. Это условие реализуется в режиме, близком к свободно-молекулярному, выполняется в переходном режиме и заканчивается в режиме течения со скольжением [3]. С наступлением режима непрерывного обтекания слой взаимодействия разрушается, уступая место ударно-сжатому слою.

В рамках концепции слоя взаимодействия Я. Райхлю удалось сравнить эффективность процессов возбуждения, ионизации и диффузии, выявить наличие «подслоев», соответствующих этим процессам, и получить соотношение между их размерами для различных скоростей метеоров.

Интервал высот 118—87 км, характерный, по П. Миллману [23], для головных эхо, соответствует условию (4) для тел размерами от 1 до 10 см. По подсчетам Я. Райхля [29] с учетом загораживания отраженными и испарившимися молекулами (повышающего плотность частиц в слое), условие  $n_l \geq 10^7 \text{ см}^{-3}$ , необходимое для обнаружения радаром, осуществляется для тел с  $d = 1 \text{ см}$  в интервале высот 80—115 км, а для тел с  $d = 10 \text{ см}$  — в интервале 87—118 км. Таким образом, интервал высот, приведенный П. Миллманом, как раз и соответствует выполнению условия  $n_l \geq 10^7 \text{ см}^{-3}$  для тел приведенных размеров. У меньших тел слой взаимодействия не образуется, у больших режим непрерывного обтекания наступает на больших высотах, и формирование ударной волны прерывает действие механизма Я. Райхля: ионизацию набегающих атомов кислорода отраженными и испарившимися молекулами.

Таким образом, Я. Райхлю удалось в общих чертах объяснить с единой точки зрения оба явления: головное эхо и свечение зеленой линии кислорода в метеорных спектрах. Однако пока еще никем не проводились параллельные спектральные и радиолокационные наблюдения ярких метеоров для непосредственного подтверждения связи этих явлений путем сравнения их развития у одних и тех же метеоров.

За последнее время в Ашхабаде под руководством Х. Д. Гульмедова проведены успешные опыты получения спектров слабых метеоров с телевизионной оптикой. Получены спектры метеоров до  $+5^m$ , у некоторых из них хорошо заметна зеленая линия кисло-

рода. Применение этого метода может дать новые интересные результаты в отношении этой эмиссии благодаря существенно большему количеству спектров, доступных для исследования. На фоне этого достижения тем более досадно, что в СССР вообще не проводится регистрация головных эхо метеоров, а отдельные имеющиеся наблюдения (например, в Казани) не снабжены регистрацией высот и угла места, т. е. не позволяют изучать распределение головных эхо по высоте и их развитие вдоль пути метеора.

Автор надеется, что публикация настоящей статьи привлечет внимание советских исследователей метеоров к данной проблеме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Блберман Л. М., Вееленко Б. А. О радиационных процессах перед фронтом ударной волны. — ЖЭТФ, 1959, № 37, с. 164—169.
2. Блберман Л. М., Мнацакян А. Х., Якубов П. Т. Ионизационная релаксация за сильными ударными волнами в газах. — Успехи физ. наук, 1970, т. 102, вып. 3, с. 431—462.
3. Бронштэн В. А. Проблемы движения в атмосфере крупных метеоритных тел. М., Изд-во АН СССР, 1963. 124 с.
4. Данилов А. Д. Химия поносферы. Л., Гидрометеонздат, 1967. 295 с.
5. Райхль Я. К проблематике изучения спектров метеоров. — Бюл. ВАГО, 1964, № 35, с. 3—7.
6. Чемберлин Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы. М., ИЛ, 1963. 777 с.
7. Baggaley W. J. The excitation of the oxygen metastable OI(S) state in meteors. — Bul. Astr. Inst. Czech., 1976, v. 27, N 3, p. 173—181.
8. Cook A. F., Hawkins C. S. The meteoric head echo. — Smith. Contr. to Astrophys., 1960, v. 5, p. 1—7.
9. Ebert H. G., Booz J., Koepf R. Messungen zur bevorzugten Recombinationen von Ionen in Gasen Flüssigkeiten. — Z. Phys. Chem., 1964, Bd 43, N 5—6, S. 304—310.
10. Ferrari C., Clarke J. H. On photoionisation ahead of a strong shock wave. — In: Supersonic Flow, Chemical Processes and Radiative Transfer. N. Y., Pergamon Press, 1964, p. 375—398.
11. Gault W. A. Decay of the OI  $\lambda$  5577 line in meteor wakes. — Canad. J. Phys., 1970, v. 48, N 9, p. 1017—1025.
12. Halliday I. Forbidden line of OI observed in meteor spectra. — Astrophys. J., 1953, v. 128, p. 441—443.
13. Halliday I. Auroral green line in meteor wakes. — Astrophys. J., 1960, v. 131, N 1, p. 25—33.
14. Halliday I. The influence of exposure, duration and trail orientation on photographic meteor spectra. — In: Physics and Dynamics of Meteors, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht-Holland, 1968, p. 91—104.
15. Hammerling R. Ionisation effects of precursor radiation from chock in air. Avco — Everett Res. Lab. RR-98, June, 1960.
16. Hey J. S., Parsons S. J., Stewart G. S. Radar observations of the Giacobinid meteor shower, 1946. MN of the RAS, 1946, v. 107, p. 176—183.
17. Hollyer R. N. Jr. Preliminary studies in the APL high temperature shock tube. John Hopkins Univ., Applied Phys. Lab. CM-903, May, 1957.
18. Lin S. C. Radio echoes from a manned satellite during re-entry. — J. Geophys. Res., 1962, v. 67, N 10, p. 3851—3780.
19. Lindblad B. A. Long-term variations in meteor radar rates, meteor heights radar echo amplitudes. — In: Physics and Dynamics of Meteors. D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht-Holland, 1968, p. 50—62.

20. **McIntosh B. A.** The meteoric head echo.— J. Atmosph. a. Terr. Phys., 1962, v. 24, p. 311—315.
21. **McIntosh B. A.** Experimental study of the amplitude of radar meteor head echoes.— Canad. J. Phys., 1963, v. 41, N 2, p. 355—371.
22. **McKinley D. W., Millman P. M.** A phenomenological theory of radar echoes from meteors.— Proc. Inst. Radio Eng., 1949, v. 37, p. 364—375.
23. **Millman P. M.** Note on some observational characteristics of meteor radio echoes.— J. Geophys. Res., 1959, v. 64, N 12, p. 2192—2194.
24. **Öpik E. J.** Meteor radiation, ionization and atomic luminous efficiency.— Proc. Roy. Soc., ser. A, 1955, v. 230, p. 463—501.
25. **Pecina P.** Head echoes and solar activity in the Geminid period.— Bul. Astr. Inst. Czech., 1975, v. 26, N 5, p. 288—293.
26. **Pirri A. N., Clarke J. H.** Radiative ionisation patterns in cold precursor of axisymmetric detached shock.— AIAA Journal, 1970, N 9, p. 1574—1581.
27. **Rajchl J.** On the possible connection between the auroral green line in meteor spectra and the head-echo phenomenon.— Bul. Astr. Inst. Czech., 1965, v. 16, N 5, p. 282—284.
28. **Rajchl J.** A note on the head-echo problem.— In: Phys. a. Dynam. of Meteors. D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht-Holland, 1968, p. 187—189.
29. **Rajchl J.** On the interaction layer in front of a meteor body.— Bul. Astr. Inst. Czech., 1969, v. 20, N 6, p. 363—372.
30. **Rajchl J.** A note on the recombination in the interaction layer.— Bul. Astr. Inst. Czech., 1970, v. 21, N 4, p. 262—264.
31. **Wilhelm H. E.** Reactive equilibrium of magnetoactive plasma.— Z. Phys., 1968, v. 211, N 4, p. 380—390.

## МЕТЕОРИТЫ В БАССЕЙМЕ р. ЕНИСЕЙ

*Е. И. ВЛАДИМИРОВ*

### МЕТЕОРИТЫ НАЙДЕННЫЕ

Палласово Железо [5, 6] (см. рисунок). Найден случайно в 1749 г. казаком Яковом Медведевым на склоне горы Имир («Железная») в междуречье Сисима и Убея на границе Новоселовского и Балахтинского районов Красноярского края. Медведев увез необычную находку в свое с. Медведево за пять верст от места находки. Она пролежала во дворе казака двадцать два года.

В ноябре 1771 г. по Енисею путешествовал академик Паллас. По прибытии в Красноярск он узнал от сопровождавшего его солдата Якуба, что у Медведева находится глыба железа весом 42 пуда, которой поклонялись туземные племена ястынцев и кашинцев как упавшей с неба. Паллас немедленно послал Якуба за этой глыбой. Якуб доставил ее в Красноярск, откуда ее, как диковинку, отправили в Петербург и выставили для показа публике в Кунсткамере [29].

В 1794 г. в Риге была опубликована работа физика Хладного «О происхождении найденной Палласом железной массы и о других подобных массах», где впервые обосновывалась мысль о том, что камни могут падать с неба. Первый метеорит мира получил назва-

ние Палласово Железо. Однако космическое его происхождение еще долго подвергалось сомнению. В 70-х годах XIX века еще появлялись статьи, в которых Палласово Железо называли железной рудой.

Чтобы рассеять сомнения, Петербургская Академия наук поручила красноярскому горному инженеру И. А. Лопатину предпринять поездку на гору Имир и сделать геологическое и топографическое описание местности находки метеорита. И. А. Лопатин слыл образцом метеорита с рудой, вскрытой шурфами 1749—1752 гг., и доложил Академии наук, что вещество метеорита Палласово Железо не имеет ничего общего с железной рудой [21].

Не исключено, что на месте падения Палласова Железа сохранились части метеорита, до сих пор не разысканные.

На месте находки Палласова Железа будет установлен памятный знак [7, 20].



**Сыромотово** [4, 8]. Найден крестьянином Феоктистом Рукосуевым весной 1873 г. в двух километрах от левого берега р. Ангары в сосновом лесу против о. Чельбихина близ дер. Сыромотово и вывезен купцом Шарыповым в дер. Мотыгино.

В 1873 г. И. А. Лопатин, обследовавший место находки Палласова Железа, направился на прииски Южной тайги через дер. Мотыгино, где ему и показали железную глыбу весом в 14 пудов. Лопатин заподозрил в ней метеорит, отрубил пробу и послал в Академию наук. Анализы подтвердили космическое происхождение железа, Лопатину было поручено съездить в Сыромотово, осмотреть место находки метеорита и нанести его на карту [21]. Метеорит весом 217,085 кг с караваном золота направили в Академию наук. Сейчас он находится в Москве, в коллекции

Схема падений и находок метеоритов в бассейне р. Енисей.

а — метеориты найденные: 1 — Палласово Железо (нах. 1749 г.), — Сыромотово (нах. 1873 г.), 3 — Тубил (нах. 1890 г.), 4 — Чинге (нах. 1912 г.); б — метеориты ненайденные: 5 — Усть-Енисейский Гольчихинский каменный дождь (пад. 1840 г.), 6 — Костромина Займка (пад. 17/VI 1908 г.), 7 — Бай-Таг (пад. 5/V 1914 г.), 8 — Зогино (пад. летом 1922 г.), 9 — Тасеево (пад. 26/III 1936 г.), 10 — Полкач (пад. 14/VIII 1936 г.), 11 — Усть-Порт (пад. 11/XII 1955 г.).

Комитета по метеоритам, в Каталоге метеоритов СССР числится под № 38 [24].

На месте падения в 1977 г. установлен памятный знак.

**Тубил** [9]. Найден летом 1890 г. на Софийско-Петропавловском прииске в русле рч. Тубил (Восточные Саяны) [31] и передан через арендатора прииска Корнакова и губернского механика Е. Н. Александрова основателю Минусинского музея Н. М. Мартьянову и управителю Абаканского железодельного завода инженеру-технологу Д. И. Степанову.

Н. М. Мартьянов установил, что находка имеет космическое происхождение, и выставил свой образец в музее как метеорит. Д. И. Степанов отправил свой образец в Академию наук. Там его включили в метеоритную коллекцию под названием Абакан как якобы найденный вблизи Абаканского завода.

Е. Н. Александров продал основную массу метеорита в музей Горного института. Там метеорит записали под именем Тубил без всякой связи с образцом Д. И. Степанова.

Таким образом, до 1969 г. в коллекции метеоритов СССР числится два разных метеорита: Абакан и Тубил.

В 1967 г. в Государственном архиве Красноярского края мною была обнаружена «Переписка Томского Горного Управления с Енисейским губернатором по поводу находки инженера Александрова метеорного железа». О находке этих материалов я сообщил в Комитет по метеоритам АН СССР. Их запросили из Красноярска в Москву. Рассмотрение привело к заключению, что небольшой кусочек метеорита Абакан отпилен от метеорита Тубил. Структурное и химическое исследование подтвердило их тождество [32]. В результате метеорит Абакан исключен из Каталога метеоритов СССР, а Тубил оставлен под своим № 55 [24].

Сейчас основная масса метеорита Тубил — 13,185 кг — находится в музее Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, 190 г — в коллекции Комитета по метеоритам АН СССР и 31 г — в Минусинском музее им. Н. М. Мартьянова. Остальная часть — 8,594 кг — в Парижском и Чикагском музеях естественной истории.

**Чинге** [2, 10]. В Каталоге метеоритов СССР под № 77 значится метеорит Чинге [24], найденный в 1912 г. на рч. Уйгарлык-Чинге системы Элегеста (хр. Танну-Ола Тувинской АССР). В Комитете по метеоритам АН СССР хранится несколько десятков его осколков общим весом около 80 кг.

Кроме того, в Минусинском музее им. Н. М. Мартьянова хранятся еще два осколка весом 4,150 и 0,940 кг.

В газете «Красноярский рабочий» за 15 августа 1930 г. появилось сообщение Вольфанга еще об одном образце метеорита: «... в кабинет геологии Иркутского госуниверситета сотрудник «Союззолота» П. Г. Тихонов доставил метеорит, найденный им в Тувинской республике на берегу реки Чинге, вес 2 783 грамма...». Судьба этого образца неизвестна.

В 1963 г. Комитет по метеоритам АН СССР предпринял дополнительные поиски осколков метеорита Чинге. Они оказались неудачными [19]. В 1978 г. второй экспедиции КМЕТа АН СССР удалось собрать более двух десятков новых экземпляров метеорита Чинге.

### МЕТЕОРИТЫ НЕНАЙДЕННЫЕ

**Усть-Енисейский Гольчихинский каменный дождь** [11, 17]. По преданию оленеводов, рыбаков и охотников из племени маду, кочевавших в долине р. Пуры — левого притока Пясины, летом 1840 г. на водоразделе речек Гольчихи и Моховой выпал каменный дождь. Упавшие камни шаманы использовали для камлания и хранили их вместе с другими шаманскими предметами — онгонами в «Шайтан-Санках». Одну «Шайтан-Санку» мне удалось получить 12 декабря 1937 г. на избирательном участке Агапа в Усть-Енисейском районе. Председатель Кочевого Совета, ненец Яр Костя познакомил меня с пожилым оленеводом — маду Егором Турдагиным и сказал, что у него хранится последняя на Таймыре «Шайтан-Санка». Мне удалось уговорить Егора передать ее в музей. Среди этнографических предметов культа оказался завернутый в замшу небольшой кусочек темно-серого камня. Переводчик Гавриил Турдагин, пояснявший значение каждого предмета на четырех языках: русском, маду, ненецком и долганском, сказал, что этот камень упал с неба, поэтому шаманы и хранили его в «Шайтан-Санках». Он упал вместе с каменным дождем, на него шаманы камлали летом — во время затяжных дождей, сильных бурь, мешавших рыбачить, зимой — во время пурги, чтобы небеса послали тихую погоду. Много камней, упавших с неба, рыбаки привязали к сетям и неводам, чтобы лучше ловилась рыба. Камень этот нашли в 1840 г. в тундре между озерами в истоках речек Гольчихи, текущей в Енисей, и Моховой, которая течет в Пуру. Переводчик добавил, что среди стариков была «говорка» такая, что во время каменного дождя поранило много оленей.

Этот каменный метеорит вместе со всей «Шайтан-Санкой» был доставлен мною во второй половине декабря 1937 г. в Дудинку и помещен в Таймырский окружной архив. В начале 1938 г. все 73 предмета «Шайтан-Санки», включая и метеорит, были зарисованы в натуральную величину на нескольких листах ватмана, а листы сфотографированы. В начале 1939 г. окружной архив сгорел, и предметы «Шайтан-Санки» погибли. Сохранились лишь фотографии с рисунков этих предметов, и среди них — метеорита. Не исключено, что возможны находки осколков этого каменного метеоритного дождя.

**Костромина Заимка** [15]. История этого метеорита началась недалеко от Канска, у железнодорожного разъезда Филимоново. Пассажир из Томска, ехавший в поезде, в 7 часов утра 17 июня (ст. стиля) 1908 г. оказался свидетелем полета метеорита. По

прибытии в Томск он рассказал об этом журналисту Александру Адрианову, который сделал сообщение в газете «Сибирская жизнь» за 29 июня 1908 г. под заглавием «Пришелец из небесного пространства» [1].

22 сентября 1908 г. Академия наук направила в Красноярск Енисейскому губернатору телеграмму о принятии мер по охране метеорита, упавшего близ разъезда Филимоново. При проверке оказалось, что метеорит упал в другом месте, но где — неизвестно.

Несмотря на это, петербургский издатель отрывных календарей Кирхнер на оборотной стороне листка 2 июля 1910 г. напечатал извлечение из сенсации Адрианова о падении метеорита под Канском. Л. А. Кулик в журнале «Мироведение» (№ 1 за 1921 г.) на основании календарного листка напечатал статью «Затерянный Филимоновский метеорит» [25].

В том же 1921 г. Л. А. Кулик прибыл в Канск во главе Метеоритной экспедиции Российской Академии наук и осмотрел окрестности разъезда Филимоново. Опросы очевидцев падения метеорита 17 июня 1908 г. фиксировались в виде анкет.

Приводим анкету № 25 от 4 октября 1921 г., заполненную начальником полустанка Филимоново И. И. Ильинским: «На полустанке Филимоново служил с 1910 г., а до этого на разъезде Лялька в 14 верстах восточнее станции Канск. Описанное событие было на разъезде Лялька. Я был дежурным и находился на платформе, ожидая подходящего от Канска товарного поезда № 92. Вдруг я почувствовал как бы сильное сотрясение воздуха и услышал гул. Я сильно растерялся, думая, что это землетрясение или другое природное явление.

Поезд № 92 был в это время верстах в полутора от Ляльки. Машинист Грязнов был так напуган гулом и сотрясением воздуха, что остановил поезд, предполагая сход с рельсов, и по прибытии на разъезд и нам предлагал также осмотреть поезд, не произошло ли в нем где-нибудь взрыва каких-либо веществ.

Световых явлений я не заметил и не помню, чтобы кто-либо из нас говорил в то время о них. Это явление многих интересовало. Предполагали падение вблизи разъезда камня, а потому многие искали его. Из железнодорожных служащих — технолог Фин, старший осмотрщик вагонов Черницкий и другие. У меня есть даже фотография людей, принимавших участие в поисках.

Приезжали разные лица из Томска из Технологического института, из Красноярска и Иркутска, но камня не нашли, а те камни, которые предполагали упавшими, оказались местной породой».

Вскоре о затерянном метеорите Филимоново забыли, а с 1927 г. начали поиски места падения Тунгусского метеорита, упавшего в тот же день, в пределах Эвенкии.

После появления моих заметок в газетах о поисках Тасеевского и Тунгусского метеоритов житель пос. Солянка Рыбинского района Красноярского края П. В. Гаврилюк в июле 1975 г. сообщил мне,

что его 86-летняя мать Прасковья Андреевна, урожденная Корчак, родившаяся в 1889 г. на Костроминой Займке, часто вспоминает о летнем падении метеорита в 1908 г. Она со своими братьями 17 июня рано утром пришла на покос. Вдруг при ясном небе и тихой погоде раздался оглушительный гром, сверкнул огонь, поднялась пыль, затряслась земля. Делянка льна увяла, как бы опаленная или подмороженная. Рядом появились свежие ямы с кусками камней. Возле лиственницы лежало разбитое орлиное гнездо, орлята валялись на земле...

Костромина Займка находится в 15 км от Солянки и в 25 км от Филимоново. Прасковья Андреевна указала место, где произошел случай 17 июня 1908 г. Сейчас там заросли кустарника, рядом большой Максимов пруд. Лиственница в 1940 г. спилена на дрова. Место это находится в 4 км южнее 188-го км Московского тракта, оно легкодоступно. Необходима постановка работ по поискам метеорита.

**Бай-Таг** [12]. В 1968 г. в поисках материалов к истории Шушенского мне пришлось просматривать в фондах Минусинского музея коллекцию стеклянных негативов. Один из них оказался с надписью «После падения метеорита Бай-Таг» в окрестности деревни Бай-Таг Краснотуранского района.

В октябре 1921 г. Минусинский музей посетил Л. А. Кулик. Ему сообщили о падении метеорита Бай-Таг, но снимка в музее тогда еще не было, он поступил в 1929 г. В своем отчете о поездке в Сибирь Л. А. Кулик писал, что ему сказали «... о небольшом метеорите, упавшем в 60 верстах к северо-востоку от Минусинска и погрузившемся в болото. Причем отверстие на месте падения было отмечено населением вехой, немедленная постановка работ по извлечению его не удалась по техническим причинам» [26].

По рассказам очевидцев метеорит упал в 1910 г. накануне пасхи (в тот год она приходилась на 25 апреля ст. стиля).

В 1922—1927 гг. по поручению Л. А. Кулика красноярский геолог А. Н. Соболев делал попытки отыскать метеорит Бай-Таг, но безуспешно. 9 февраля 1925 г. на заседании Коллегии Музея Приенисейского края А. Н. Соболев «... кратко сообщил о поездке в дер. Меттихово, где точно определить место падения метеорита не удалось. Очевидцы падения отсутствуют, и только приблизительно выяснена площадь возможного падения в 2000 кв. метров» (Государственный архив Красноярского края, ф. 595, оп. 1, д. 28, л. 17).

Сама дер. Меттихово, основанная в 1775 г. обер-штейгером Иоганном Каспаром Меттихом, через 200 лет, в 1976 г. прекратила свое существование, жители переселились в ближайшие благоустроенные селения Краснотуранского района.

**Зотино.** В Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР имеются сведения о том, что в 16 км южнее с. Ворогово на левом берегу Енисея на границе Туруханского и Енисейского районов летом 1922 г. возле избы рыбака Васильева упал ме-

теорит. Это случилось ночью. В ближайшей избе вылетели стекла, и развалилась русская печь. Утром жители обнаружили в огороде выступавший из земли большой камень [28].

С течением времени камень закрылся наносами. Уже в 40-х годах его нельзя было увидеть, а в конце 60-х годов непосредственный очевидец его падения Платон Ксенофонович Опарин не смог точно восстановить место падения.

Место бывшей усадьбы Васильева было хорошо известно, но ни тщательный осмотр его, ни магнитометрическая съемка на территории этой усадьбы с шагом через метр не обнаружили никаких следов метеорита.

В 1978 г. последние жители дер. Зотино разъехались. В настоящее время в Зотино открывается леспромхоз, летом в окрестности работают студенческие отряды по заготовке сена. Создается благоприятная возможность для возобновления поисков метеорита.

**Тасеево** [3, 18, 23]. В вечернем небе 26 марта 1936 г. жители городов Боготола, Ачинска, Красноярска, Канска, Енисейска и районов Уярского, Рыбинского, Ирбейского, Манского, Дзержинского, Сухобузимского, Емельяновского и других наблюдали яркий свет, слышали сильный шум, гул, трехкратные взрывы, сопровождавшие полет крупного болида. Первым из наблюдателей сообщил об этом необычном событии в Общество изучения Красноярского края краевед, плановик из с. Большая Мурта В. К. Добрынин. Публикации газет, письма очевидцев в Государственном архиве Красноярского края составили дело № 83 «О полете и падении метеорита на территории Красноярского края».

Падение Тасеевского метеорита сопровождалось гулом, связанным с электромагнитными явлениями, поэтому он отнесен к числу электрофонных. Сведения о нем помещены в списке электрофонных болидов под № 22 [27].

Поиски места падения метеорита в Тасеевской тайге в апреле 1936 г. велись А. А. Лупиняком, И. А. Першиным и мною. Внезапная распутица помешала довести дело до конца. В 1973—1978 гг. поиски вели экспедиции Московского отделения ВАГО при АН СССР и Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР.

**Полкан** [13]. 14 августа 1936 г. над Енисейском и соседними селами со стороны левобережья Енисея под углом в 30° к горизонту пролетел яркий шарообразный болид. Было 10 часов вечера, и след космического пришельца хорошо видели в селениях соседних районов: Пировского, Казачинского, Южно-Енисейского, на Советском руднике. Наблюдавший полет метеорита корреспондент газеты «Красноярский рабочий» Попов [30] писал: «Неожиданно на небе появилась ослепительного света полоса величиной с обыкновенную звезду. Затем она увеличилась до размеров Луны. Метеорит двигался с нарастающей быстротой с запада на северо-восток, оставляя за собой желтовато-красный свет. Метеорит... распался на несколько частей, упал, очевидно, на территории Северо-Енисейского района...».

Житель пос. Усть-Пит Е. Кольчугин видел яркое освещение местности, слышал канонаду при падении метеорита в тайге. Дрожала земля, дребезжали стекла в окнах. Другие наблюдатели из Усть-Пита подтвердили, что летевший метеорит походил на «огненную полосу раскаленного железа, когда его вынимают из горна...». За полосой был виден огненный дымящийся хвост. Н. Ф. Шаробоев в тот момент оказался на одном из зимовий бывшей Рязановской дороги и видел, как метеорит падал в тайге у истоков р. Теи, у самой высокой горы тех мест — Полкан.

В 1968 г. в районе падения метеорита работала рекогносцировочная группа Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР [28].

**Усть-Порт.** 11 декабря 1955 г. в 17 часов 10 минут жители пос. Усть-Порт и других селений Таймыра были свидетелями полета крупного метеорита, упавшего в одно из прибрежных озер устья р. Малой Хеты. Падение наблюдали многие полярники. Начальник гидрометеостанции Усть-Порт В. И. Барсуков измерил пробойну во льду Продолговатого озера, сделанную метеоритом. При толщине льда в 80 см она имела длину 217 см и ширину 1,5 м [14, 16].

О падении метеорита старший инженер отдела полярных станций «Главсевморпути» Б. Книжников напечатал заметку в газете «Водный транспорт» [22], но до сих пор этот метеорит продолжает оставаться на четырехметровой глубине Продолговатого озера неподалеку от левого берега Енисея.

Таким образом, на территории Красноярского края имеется ряд мест, перспективных в отношении поисков метеоритов. Учитывая большую территорию Красноярского края, представляется очевидным, что следы многих падений последних десятилетий пока не нашли своего отражения в научной печати. Развитие широких контактов с общественностью края, без сомнения, окажет помощь в развертывании этих исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адрианов. Пришелец из небесного пространства. — Сиб. жизнь, 1908, 29 июня.
2. Баклунд О. О., Хлопин В. Г. Новая находка самородного никелистого железа. — Изв. Академии наук, 1915, № 9, с. 891.
3. Владимиров Е. И. По следам Тасеевского метеорита. — Заря Коммунизма, 1964, 22 марта.
4. Владимиров Е. И. Где упал метеорит Сыромолотово? — Ангарская правда, 1975, 4 ноября.
5. Владимиров Е. И. Метеориты в бассейне Енисея. Палласово Железо. — Сов. Хакасия, 1976, 25 авг.
6. Владимиров Е. И. Палласово Железо. — Краснояр. рабочий, 1976, 4 сент.
7. Владимиров Е. И. В память о метеорите. — Краснояр. рабочий, 1976, 14 ноября.
8. Владимиров Е. И. Находка Феоктиста Рукусуева. — Краснояр. рабочий, 1976, 8 дек.
9. Владимиров Е. И. Метеорит Тубич. — Краснояр. рабочий, 1976, 11 апр.

10. **Владимиров Е. И.** Космические пришельцы в бассейне Енисея. Метеорит Чинге.— На ленинском пути, 1976, 31 янв.
11. **Владимиров Е. И.** Каменный дождь в устье Енисея.— Сов. Таймыр, 1976, 8 янв.
12. **Владимиров Е. И.** Вестники дальних миров. Метеорит Бай-Таг.— Искра Ильяча, 1976, 15 июня.
13. **Владимиров Е. И.** Метеорит Полкан.— Знамя Октября, 1976, 11 окт.
14. **Владимиров Е. И.** В каком озере метеорит? — Коммунист Заполярья, 1976, 5 авг.
15. **Владимиров Е. И.** Поиски Тунгусского метеорита. Случай на Костромской Запмке.— Знамя Октября, 1976, 29 апр.
17. **Владимиров Е. И.** Вестник дальних миров.— Заполярная правда, 1977, 1 янв.
18. **Владимиров Е. И.** Поиски продолжаются.— Краснояр. рабочий, 1977, 18 сент.
19. **Вронский Б. И., Зоткин П. Т.** Итоги работ экспедиции 1963 г. по изучению места находки метеорита Чинге.— В кн.: Метеоритика. Вып. 28. М., Наука, 1968, с. 125—130.
20. **Еремеева А. И.** По следам Палласова Железа.— Земля и Вселенная, 1977, № 3, с. 81—83.
21. **Клеопов И. Л., Лопатин И. А.** Очерк жизни и научной деятельности — неопубликованные дневники и письма. Иркутск, 1964, 199 с.
22. **Книжников Б.** Падение метеорита.— Водный транспорт, 1956, № 29.
23. **Коваль В. И.** Тасеевский метеорит.— Земля и Вселенная, 1977, № 3, с. 61—64.
24. **Кринов Е. Л.** Краткий каталог метеоритов СССР на 1 января 1976 г.— В кн.: Метеоритика. Вып. 35. М., Наука, 1976, с. 115—135.
25. **Кулик Л. А.** Затерянный Филлимоновский метеорит.— Мирозведение, 1924, № 1, с. 74.
26. **Кулик Л. А.** Первая метеоритная экспедиция в России и очередные задачи метеоритики.— Мирозведение, 1923, № 1, с. 6.
27. **Любарский К. А.** Статистическое изучение болидов.— В кн.: Метеоритика. Вып. 11. М., Наука, 1954, с. 153—164.
28. **Метеориты Сибири.** Новосибирск, 1971. 37 с.
29. **Паллас П. С.** Путешествие по разным провинциям Российского государства. Ч. 3. Спб., 1788, с. 566—569.
30. **Попов.** Полет метеорита.— Краснояр. рабочий, 1936, 17 авг.
31. **Хлаповин А.** Несколько слов о метеорите, найденном около Тубила Енисейской губы.— Зап. Имп. мин. о-ва, 1898, серия 2, ч. 35, с. 233—241.
32. **Явнель А. А.** О метеоритах Тубил и Абакан.— В кн.: Метеоритика. Вып. 29. М., Наука, 1969, с. 155—157.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Долгов Ю. А. К итогам работ Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР . . . . .  | 3   |
| Иванова Г. М., Фаст Н. П. Библиография работ Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР (1960—1978) . . . . .   | 22  |
| Масайтис В. Л. Космические факторы порообразования . . . . .  | 45  |
| Вишневецкий С. А. К вопросу о морфоструктуре сложных кратеров . . . . .   | 54  |
| Маслов М. А., Пономарев Г. Я. Геологическое строение Карского метеоритного кратера на Пай-Хое . . . . .   | 66  |
| Соботович Э. В., Кононенко Л. А. К вопросу об изотопных смещениях в стабильных элементах метеоритов . . . . .   | 69  |
| Соботович Э. В., Ковалюх Н. Н., Васильев Н. В., Садолюк И. В., Петренко Л. В. Оценка степени космогенности силикатной составляющей почв из района падения Тунгусского метеорита по радиоуглеродным данным . . . . . | 80  |
| Колесников Е. М. О некоторых вероятных особенностях химического состава Тунгусского космического тела . . . . .   | 87  |
| Голенецкий С. П., Степанов В. В. К поискам вещества Тунгусского космического тела . . . . .   | 102 |
| Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита . . . . .  | 115 |
| Бояркина А. П., Бронштэн В. А., Станюкович А. К. Нестационарные взаимодействия ударных волн в газодинамических задачах метеоритики . . . . .  | 138 |
| Бронштэн В. А. О методах расчета взрывной и баллистической волн Тунгусского метеорита . . . . .   | 156 |
| Бояркина А. П., Гольдин В. Д., Спдорас С. Д. О территориальной структуре вектора остаточной намагниченности почв в районе падения Тунгусского метеорита . . . . .   | 163 |
| Мартынюк М. М. Роль фазового взрыва космического вещества в процессе разрушения метеоритов . . . . .  | 168 |
| Соляник В. Ф. Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений . . . . .  | 178 |
| Васильев Н. В., Дмитриенко В. К., Федорова О. П. О биологических последствиях Тунгусского взрыва . . . . .  | 188 |
| Васильев Н. В., Кухарская Л. К., Бояркина А. П., Гольдин В. Д., Казакевич Л. Л. О механизме стимуляции роста растений в районе падения Тунгусского метеорита . . . . .  | 195 |
| Алимов О., Блохин А. В., Новиков Г. Г., Раджабов Т., Рубцов Л. Н., Цыганков С. Ф. Метеорная ионизация . . . . .   | 202 |
| Андреев Г. В., Лазарев Р. Г., Рубцов Л. Н., Рябова Г. О. О структурных параметрах метеорного потока Леонид 1966—1968 гг. по наблюдениям на длине волны 17 м . . . . .   | 206 |
| Андреев Г. В., Лазарев Р. Г., Рубцов Л. Н. О малом метеорном потоке, наблюдавшемся 17—20 ноября 1967 г. на длине волны 17 м . . . . .   | 216 |
| Бронштэн В. А. Зеленая линия кислорода в спектрах метеоров и голловны эхо . . . . .   | 219 |
| Владимиров Е. И. Метеориты в бассейне р. Енисей . . . . .   | 228 |

УДК 523

К итогам работ Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР. Долгов Ю. А. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 3—22.

Подводятся итог пятнадцатилетней деятельности Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР (1962—1977). Подробно обсуждаются различные направления, получившие развитие в СО АН СССР: поиски метеоритов на территории Сибири и Дальнего Востока, исследования метеоритных кратеров и астероидов, разработка проблемы Тунгусского метеорита и прикладные направления — оценка притока метеоритного вещества на Землю, регулярные наблюдения серебристых облаков, оценка техногенного загрязнения среды, а также лабораторное изучение различных космических объектов — метеоритов, тектитов, лунного грунта, импактитов. Табл. 1.

УДК 523

Библиография работ Комиссии по метеоритам и космической пыли СО АН СССР (1960—1979). Иванова Г. М., Фаст Н. П. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука 1980. с. 22—45.

Приводится список литературы из 294 наименований, опубликованной Комиссией по метеоритам и космической пыли СО АН СССР с 1960 по 1978 г.

УДК 525.235+523.51+551.3

Космические факторы породообразования. Масайтис В. Л. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 45—54.

Воздействие Космоса на Землю осуществляется путем излучения, воздействия полей, а также за счет притока космического вещества. Излучение и воздействие полей опосредованно влияют на геологические процессы породообразования, в то время как приток космического вещества непосредственно определяет некоторые особенности формирующихся на поверхности горных пород.

Наиболее существенным фактором породообразования является воздействие крупных метеоритов и астероидальных тел, причем оно зависит главным образом от величины энергии соударения с поверхностью планеты. При образовании крупных взрывных кратеров возникают большие массы импактитов и брекчий, объемы которых соизмеримы с объемами ряда земных геологических формаций. Импактиты и брекчи обладают характерными особенностями состава и структуры, позволяющими реконструировать условия их образования в результате высокоскоростного удара, теплового взрыва, дробления, плавления, выброса, перемешивания земных горных пород. Табл. 2, Библ. 26.

УДК 523.681.8

К вопросу о морфоструктуре сложных кратеров. Вишневецкий С. А. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 54—66.

Основными элементами морфоструктуры сложных кратеров, отличающих их от класса простых кратеров, являются центральное поднятие и система внутренних кольцевых валов. Происхождение этих элементов дискуссионно. Сделана попытка рассмотреть механизм образования центрального поднятия и внутренних кольцевых валов. Выделены 2 типа таких элементов в зависимости от способа их образования: 1) сингенетичные, возникшие на стадии ударно-взрывной эскавации кратера, и 2) наложенные, появление которых связано с различными процессами модификации кратера в течение его геологической истории. Затронуты некоторые вопросы структурного анализа ударно-метаморфических комплексов кратеров. Ил. 4. Библ. 23.

УДК 552.122.23 : 553.51.001

Геологическое строение Карского метеоритного кратера на Пай-Хое. Маслов М. А., Пономарев Г. Я. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 66—69.

Приведено зональное строение Карской кольцевой структуры. Выделяется центральное поднятие, кратерная воронка и зона околokrатерного дробления. На основании ряда признаков сделан вывод о метеоритном происхождении структуры. Ил. 1. Библ. 4.

УДК 523.51

К вопросу об изотопных смещениях в стабильных элементах метеоритов. Соботович Э. В., Кононенко Л. А. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 69—80.

Обсуждаются изотопный состав стабильных элементов в метеоритах и возможные причины наблюдаемых изотопных отношений. Ил. 1. Табл. 2. Библ. 44.

УДК 551.46.523.51

Оценка степени космогенности силикатной составляющей почв из района падения Тунгусского метеорита по радиоуглеродным данным. Соболев И. В., Ковалюх Н. Н., Васильев Н. В., Садовьяк И. В., Петренко Л. В. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 80—87.

В работе приведены методики выделения радиоуглерода из силикатной составляющей тунгусских торфов и почв и определения их удельной активности. На основании радиоуглеродных данных вычислена предположительная масса Тунгусского вещества, выпавшего на катастрофной площади. Табл. 4. Библ. 22.

УДК 523.51 : 523.12

О некоторых вероятных особенностях химического состава Тунгусского космического тела. Колесников Е. М. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 87—102.

Составы наиболее вероятных представителей вещества Тунгусского космического тела (ТКТ) — обнаруженной элементной аномалии в торфах и исследованных силикатных микроферулах из торфов по сравнению с метеоритами и в меньшей степени по сравнению с текитами — характеризуются высокой степенью дифференциации элементов. Предполагаемое вещество ТКТ было обогащено многими летучими литофильными и халькофильными элементами — щелочными металлами, Вг, Zn, Pb, а также Hg, Sn и др. и, напротив, обеднено сидерофильными — Fe, Co и особенно Ni, что в рамках современных представлений о конденсации и дифференциации элементов в протопланетном облаке соответствует веществу периферийной части Солнечной системы и свидетельствует в пользу кометной природы ТКТ. Ил. 1. Табл. 1. Библ. 55.

УДК 523.261

К поискам вещества Тунгусского космического тела. Голенецкий С. П., Степанок В. В. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 102—115.

Приведены результаты послыйного элементного анализа моховой залежи сфагнум-фунгум из центральной части района Тунгусского падения 1908 г. Обнаружены пиковые всплески концентраций ряда химических элементов в слоях, включающих прирост 1908 г. Показано, что обнаруженный эффект имеет космическое происхождение и связан, вероятнее всего, с консервацией выпавшего вещества Тунгусского космического тела (ТКТ) в торфе. Определено примерное содержание 20 химических элементов, входивших в его состав. Набор элементов, обнаруживающих указанную аномалию, свидетельствует о необычном химическом составе минеральной части вещества ТКТ по сравнению с известными типами метеоритов и указывает на его кометное происхождение. Ил. 4. Табл. 2. Библ. 16.

УДК 523.51 : 553.6

Моделирование и расчет взрыва Тунгусского метеорита. Коробейников В. П., Чушкин П. И., Шуршалов Л. В. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 115—138.

Исследуется ряд газодинамических эффектов, которые надо учитывать при определении траекторных и энергетических параметров Тунгусского метеорита по известным наземным разрушениям. При расчете распространения ударной волны проводится учет неоднородности атмосферы и силы тяжести с помощью двумерного численного решения, с которым сравниваются приближенные методики. Обсуждается влияние неизоэнтропичности атмосферы и высокотемпературных эффектов реального газа. Приводятся результаты численных расчетов сферического и цилиндрического взрывов с излучением, характеризующие поток лучистой энергии. На основании простых траекторных расчетов оценивается энерговыведение в атмосферу при полете крупного тела. Критически анализируются работы других авторов. Ил. 11. Табл. 2. Библ. 35.

УДК 534.222.2 : 534.24 : 523.51

Нестационарные взаимодействия ударных волн в газодинамических задачах метеоритов. Бояркина А. П., Бронштэн В. А., Станюкович А. К. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 138—156.

Рассматривается процесс отражения от земной поверхности ударных волн, образующихся при падении крупных метеоритных тел. Возникающие при этом разрушения анализируются с точки зрения различных режимов отражения. Подробно рассмотрен наиболее сложный случай — нерегулярное отражение. Дан краткий обзор современных теоретических и экспериментальных данных, характеризующих это явление. Приводятся зависимости, позволяющие рассчитывать разрушающие параметры ударных волн произвольной интенсивности во всем диапазоне возможных углов падения. Приводятся примеры расчета, сопоставленные с экспериментальными данными. Ил. 12. Табл. 1. Библ. 34.

**О методах расчета взрывной и баллистической волн Тунгусского метеорита.** В. А. Бронштейн. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 156—163.

Рассмотрены два различных метода подхода к решению одной и той же задачи и разобраны достоинства и недостатки этих методов. Ил. 2. Библ. 24.

УДК 523.51

**О территориальной структуре вектора остаточной намагниченности почв в районе падения Тунгусского метеорита.** Бояркин А. П., Гольдман В. Д., Сидорас С. Д. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 163—168.

Приводятся результаты исследования поведения направления вектора остаточной намагниченности почв из района падения Тунгусского метеорита. Ил. 3. Табл. 1. Библ. 6.

УДК 523.51 : 541.126 : 532.782

**Роль фазового взрыва космического вещества в процессе разрушения метеоритов.** Мартынюк М. М. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 168—178.

Рассмотрена кинетика перегрева метастабильной жидкости и ее последующий взрывной переход в стабильное двухфазное состояние (фазовый взрыв). По данным опытов электрического взрыва проводников оценены предельные температуры перегрева жидких металлов. Показано, что при скорости нагрева приповерхностного слоя метеорита, превышающей некоторое критическое значение  $\varepsilon^*$ , испарительный механизм разрушения этого слоя сменяется циклическим фазовзрывным механизмом; для железных метеоритов  $\varepsilon^* = 5 \cdot 10^8$  К/с, для каменных с большой вязкостью расплава —  $\varepsilon^* = 10^7$  К/с. Обоснована гипотеза о том, что взрыв Тунгусского метеорита в основном определялся фазовым взрывом стекловидного космического вещества с большой вязкостью расплава; в качестве основного компонента этого вещества принимается окись кремния. По удельному энерговыделению при фазовом взрыве окиси кремния и по энергии взрыва Тунгусского метеорита оценена масса вещества, взорвавшегося на конечном участке траектории его полета; она оказалась равной  $(3-5) \times 10^6$  т. Ил. 1. Табл. 1. Библ. 12.

УДК 523.037

**Тунгусская катастрофа 1908 г. в свете электрической теории метеорных явлений.** Соляник В. Ф. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 178—188.

Рассматриваются явления, не получившие объяснения в рамках физической теории метеоров (возгорание метеоров на высотах  $H \geq 150$  км, дробление в воздухе железо-никелевых тел и др.). Делается вывод об электрической природе этих явлений и приводятся необходимые расчетные формулы. Из анализа специфического ожога леса в зоне Тунгусской катастрофы высказывается мнение, что метеорит был железным, электрически заряженным, интенсивно дробившимся в воздухе.

Вычисляется заряд, радиус тела, масса, высота тела над Землей в момент катастрофы, выделявшаяся при разряде энергия и утверждается, что основная масса метеорита расплылась в нижних слоях стратосферы. Отдельные места из хвостовой части метеорного потока должны были выпасть за сотни километров от места катастрофы. Библ. 17.

УДК 523.51 : 575.24(371.512)

**О биологических последствиях Тунгусского взрыва.** Васильев Н. В., Дмитриенко В. К., Федорова О. П. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 188—195.

На основании исследования морфометрических признаков у муравьев видов *Formica fusca* и *Formica exsecta* показано, что муравьи *Formica fusca*, обитающие в особых точках эпицентральной области Тунгусского взрыва (гора Острая и Чургинский водопад), существенно отличаются от обитающих в других местах. Указывается, что эти же точки дают максимальные значения при оценке мутационного фона у осны. Обсуждается возможная связь этого явления с факторами Тунгусского взрыва. Ил. 2. Табл. 8. Библ. 11.

О механизме стимуляции роста растений в районе падения Тунгусского метеорита. Васильев Н. В., Кухарская Л. К., Бояркина А. Р., Голбдин В. Д., Казакевич Л. Л. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 195—202.

На примере модельного эксперимента делается вывод о связи ускоренного прироста леса после 1908 г. с содержанием в почвах некоторых микроэлементов и, в частности, лантана и иттрия. Ил. 1. Табл. 1. Библ. 17.

УДК 550.388.2

Метеорная ионизация. Алимов О., Блохин А. В., Новиков Г. Г., Раджабов Т., Рубцов Л. Н., Цыганков С. Ф. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980 с. 202—206.

Рассмотрена модельная задача построения интегрального источника ионообразования от метеорных тел. В предположении, что в метеорном потоке имеется дискретное распределение по плотности, показано, что такие потоки могут быть ответственными за слоистую структуру области Е-ионосферы. Ил. 1. Библ. 9.

УДК 523.53

О структурных параметрах метеорного потока Леонид 1966—1968 гг. по наблюдениям на длине волны 17 м. Андреев Г. В., Лазарев Р. Г., Рубцов Л. Н., Рябова Г. О. Взаимодействие метеор. м. о вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 206—215.

Приводится определение плотности падающего потока Леонид по наблюдениям на Ионосферной станции АН Таджикской ССР в 1966—1968 гг. Выделение потоковых метеоров N осуществлялось методом флуктуации, который является математической формой практического способа выявления N по среднесуточной кривой численности. Вычисляется приток метеорного вещества на Землю и такие структурные характеристики потока, как пространственная плотность частиц, пространственная плотность вещества и число частиц, которые Земля встречает в единицу времени. Делается вывод о том, что пространственная плотность частиц в потоках по крайней мере не меньше, чем пространственная плотность спорадических метеоров. Ил. 5. Библ. 8

УДК 523.53

О малом метеорном потоке, наблюдавшемся 17—20 ноября 1967 г. на длине волны 17 м. Андреев Г. В., Лазарев Р. Г., Рубцов Л. Н. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 216—219.

Приводятся результаты радиолокационных наблюдений малого метеорного потока, по времени кульминации совпадающего с Aurδs, оценивается плотность падающего потока и приток метеорного вещества от него на Землю. Ил. 2. Библ. 8.

УДК 523.57 : 523.164.85

Зеленая линия кислорода в спектрах метеоров и головные эхо. Бронштейн В. А. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 219—228.

Рассматриваются данные наблюдений и теоретические объяснения появления в спектрах метеоров запрещенной зеленой линии кислорода [O1]5577 Å и явления головного эхо метеоров, а также связи между обоими явлениями. Возбуждение метастабильного уровня происходит за счет столкновительных процессов, подробно рассматриваемых в статье. Головное эхо метеоров — явление, связанное с быстрой ионизацией атомов воздуха (и метеорного тела) впереди самого тела. Диапазоны высот, на которых наблюдаются оба явления, примерно одинаковы (87—118 км). Ил. 3. Библ. 31.

УДК 523.51

Метеориты в бассейне р. Енисей. Владимиров Е. И. Взаимодействие метеоритного вещества с Землей. Новосибирск, Наука, 1980, с. 228—236.

Приводятся сведения, почерпнутые главным образом из газет, об известных к настоящему времени метеоритах, найденных и не найденных в Красноярском крае. Ил. 1. Библ. 32.