

УДК 523.6

О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРОФОННЫХ ЯВЛЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ПРОХОЖДЕНИЕ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

©2024 г. А. Д. Филоненко^{а,*}

^аЛуганский национальный университет им. Владимира ра Даля, Луганск, Россия

*e-mail: uy5lo@mail.ru

Поступила в редакцию 30.02.2024 г.

После переработки 17.03.2024 г.

Принята к публикации 25.03.2024 г.

В работе кратко обсуждаются гипотезы о природе многовекового загадочного явления, одно-значного объяснения которого до настоящего времени нет. Суть его в том, что наблюдатель, обычно находящийся на расстоянии 50–100 км от летящего метеорного тела, иногда слышит звук одновременно с его излучением. Создается впечатление, что звук распространяется со скоростью света. Исторически обстановка сложилась так, что только не более шестидесяти лет назад начались попытки инструментального исследования этого необычного явления. Трудность этих поисков еще связана с тем, что только несколько процентов от общего числа наблюдаемых метеороидов обладают таким свойством. Около сорока лет назад было обнаружено, что метеороиды могут излучать электромагнитные импульсы различной длительности и частотного состава. Однако оказалось, что этот факт не всегда имеет однозначное отношение к электрофонным явлениям. В настоящей работе сделан краткий обзор наиболее содержательных гипотез и экспериментов прошлых лет. Не исключено, что это явление имеет фундаментальный характер и его исследование может внести в науку неизвестные ранее сведения.

Ключевые слова: метеорит, электрофонный, фотоэлектронная эмиссия, электрический заряд, радиоизлучение

DOI: 10.31857/S0320930X24050056, EDN: LTKVAM

ВВЕДЕНИЕ

Термином электрофонный болид называют редко наблюдаемое природное явление — это метеорное тело, полет которого в атмосфере сопровождается звуками, слышимыми одновременно с наблюдением яркого свечения. До настоящего времени нет определенного объяснения тому факту, что звук слышен одновременно с наблюдением свечения болида. Известно, что звук распространяется в воздухе со скоростью около 330 м/с, и, следовательно, чтобы достичь наблюдателя, находящегося от летящего болида на многие десятки километров, требуется не менее нескольких десятков и даже сотен секунд.

Это необыкновенное явление упоминалось в литературе сотни лет назад, и долгое время считалось домыслом наблюдателей. Длительное время полагали, что такие звуки являются воображением наблюдателей, т.е. имеют психологический характер. Эта точка зрения усугублялась тем фактом, что если свидетелями являлась группа очевидцев, то часто звук был слышен только одним или двумя членами группы, которые находились в непосредственной близости один от другого. И только лишь недавно было доказано, что аномальные звуки — реальный факт, основанный на большом числе достоверных наблюдений, а термин “электрофонные болиды” для обозначения этого необычного явления был предложен русским ученым П.Л. Дравертом.

Звуки электрофонных болидов в ряде случаев воспринимаются наблюдателем как имеющие определенное направление, т.е. они приходят с какой-то определенной стороны и наблюдатель, повернувшись в эту сторону, видит летящий болид. Другие же болиды сопровождаются не направленным, а общим шумом местности (деревьев, зданий, земли, небосвода), что, по мнению ряда исследователей, вызвано именно электромагнитными эффектами.

В каталогах по электрофонным болидам описаны случаи, когда между первоначальным звуком и визуальным появлением болида прошли десятки секунд (Гребенников, 1984). С точки зрения современных гипотез об электромагнитной природе электрофонных явлений этого не должно быть, поскольку метеороид еще не начал интенсивное взаимодействие с атмосферой и электромагнитные эффекты слишком слабы.

Случаи наблюдения электрофонных болидов весьма редки. Сейчас считается, что только несколько процентов от всего количества метеороидов являются таковыми. Описано много случаев, связанных с изменением характера звука при полете болидов. Это переход звука, напоминающего свист в начале полета, в шипение и повышение высоты звучания к концу полета. В 1988 г. был опубликован статистический анализ ряда наблюдений в виде еще одного каталога (Бронштэн и др., 1988). Анализ явлений, сопровождающих полет болидов, показывает, что имеется корреляция между звуком и такими явлениями, как вспышки, искрообразование, появление следа и тому подобное. Кроме этого, было отмечено, что звуки болидов могут быть услышаны из радиоприемника, причем, эти “радиозвуки” напоминали свист или помехи типа треска или отдельных щелчков.

Попытки физического обоснования природы электрофонических звуков метеороидов предпринимались многими исследователями, как в теоретических разработках, так и в экспериментальных. Вполне естественно, что факт одновременного звучания и светового излучения болида был использован в большинстве работ как доказательство электромагнитной природы явления. Отсюда и название таких болидов, как электрофонные. Однако ни одна из этих работ не в состоянии была убедительно раскрыть загадку таких метеороидов. Поскольку эта загадка должна быть непосредственно связана с электромагнитным излучением, то первые работы были направлены на обнаружение электрических явлений, сопровождающих пролет болидов через атмосферу Земли.

КРАТКИЙ ОБЗОР ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩЕГО ПОЛЕТ БОЛИДА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Вполне естественно, что прежде всего нужно экспериментально убедиться, что полет болидов действительно сопровождается электромагнитными явлениями. Тот факт, что следы метеоров фактически являются плазменным образованием и в целом (с болидом) нейтральны, не требует особых доказательств. Тем не менее такая система также может излучать. Одно из первых указаний в этом направлении было опубликовано в работах (Калашников, 1949; 1952), где кратко описаны результаты наблюдения магнитных импульсов от метеоров и высказываются общие соображения о происхождении эффекта. Измерения проводились с помощью индукционного магнитометра, который состоял из большой петли диаметром ~200 м, соединенной с чувствительным гальванометром с подвижной катушкой (флюксметр). Прибор указал на наличие магнитного поля, но последующая за этим работа (Hawkins, 1958a) не подтвердила эти результаты. Однако уже через год при более тщательных измерениях были обнаружены специфические пульсации магнитного поля с характерной частотой 1.5 Гц во время максимума метеороидного потока Геминиды.

Известно, что электростатические поля действуют на незаряженные предметы. Это связано с тем, что молекулы вещества поляризуются в электрическом поле, и если его градиент не равен нулю в месте расположения предмета, помещенного в такое поле, то на него будет действовать сила. Например, общеизвестно, что сильные электростатические поля поднимают сухие волосы человека. С учетом этого факта непосредственного воздействия неоднородного электрического поля на предметы в работах (Jenkins и др., 1960; Sommer, Gierke, 1964) приведены сообщения о результатах эксперимента непосредственного действия электрического поля на органы слуха человека на частотах 1, 2, 4 и 8 кГц. Обнаружено, что при напряженности электрического поля более 160 В/м подопытные субъекты ощущали его воздействие.

Однако непосредственных измерений электрического поля, создаваемого метеороидами, еще никто не проводил, поэтому опубликованная позже работа (Иванов, Медведев, 1965) была весьма актуальна. Авторы показали, что

электростатические потенциалы, наводимые крупными метеороидами на характерных высотах, могут составлять сотни вольт на поверхности земли, что, по их мнению, недостаточно для объяснения электрофонического эффекта.

Обсуждая механизм звуков из метеоров, Baringer и Hart (1949) пришли к выводу, что психологические аргументы не убедительны. После обсуждения массы доступных данных, они пришли к выводу, что “звуковое” сопровождение метеора вряд ли можно отбросить как фантазию наблюдателей. Они предположили, что такие звуки переносятся радиоволнами, и рассчитали, что большой болид может легко рассеивать энергию с мощностью в несколько гигаватт. Из такого высокого уровня энергии тепловая компонента была бы слишком слабой, и авторы пришли к выводу, что свет болида может быть модулирован на звуковых частотах. Это привело к серьезным проблемам обнаружения механизма генерации совершенно неизвестные науке, и они отступили от этой идеи.

Однако предложение Baringer и Hart было серьезно воспринято Hawkins (1958b; 1958c), который, ссылаясь на работу Калашникова, выполнил экспериментальной поиск радиоизлучения метеоров на нескольких частотах (475, 218 и 30 МГц, а также на частоте 1 Гц). Он пришел к выводу о том, что метеоры не излучают радиоволны в диапазоне частот от 1 Гц до 500 МГц. Однако, следует заметить, что метеоры, которые наблюдал автор, имели визуальную величину между $+5^m$ и -1^m , т.е. это очень слабые метеоры с массой не выше 0.1 г. Кроме этого, на частоте 30 МГц было обнаружено несколько шумовых импульсов, но точно не установлено, что они вызваны прямым излучением метеора.

Здесь следует упомянуть, что в более поздней работе (Obenberger и др., 2014) сообщается об обнаружении собственного излучения метеоров с низкочастотным радиотелескопом LWA1. При обработке массива данных, полученных за 11000 ч для частот между 25 и 75 МГц, было обнаружено 49 радиоимпульсов длительностью от 1 до 10 с, т.е. потребовалось более 50 лет, чтобы надежно установить факт собственного радиоизлучения метеоров. Этот, впервые проведенный комплекс наблюдений, описанный в вышеупомянутой и в других работах (Obenberger и др., 2016b), авторы считают значительным событием, стимулирующим выяснение природы излучения метеоров. Для объяснения этого наблюдения в работе (Филоненко, 2018) была предложена модель процессов, вызывающих собственное

радиоизлучение метеорных тел на высоких частотах. Для определения некоторых параметров динамики плазменного следа на начальных этапах его расширения применена методика решения автоматической задачи о сильном взрыве (Седов, 1977). Именно эта стадия расширяющейся плазмы, как показывают расчеты, ответственна за собственное некогерентное и поляризованное излучение метеороида в верхних и средних слоях атмосферы. В рамках этой модели получена теоретическая оценка величины спектральной плотности потока радиоэмиссии, совпадающая с экспериментальными значениями (Obenberger и др., 2016a).

Поскольку прохождение метеором верхних слоев атмосферы сопровождается образованием сильно ионизированного следа, состоящего из электронов, ионов и частиц метеорного вещества, Докучаев в своей работе (1960), учитывая известный из электростатики эффект, который состоит в том, что всякий проводник, помещенный во внешнее электрическое поле, поляризуется и искажает топологию этого поля таким образом, что вблизи заостренных концов проводящего тела возникает усиленное неоднородное электрическое поле, приходит к выводу, что след метеороида усиливает слабое поле окружающей среды вблизи его конца и начала. Это усиление настолько велико, считает автор, что возникает электрический пробой и образование одной из форм газового разряда, который и может быть причиной помех радиоприему на длинных волнах. При этом в разряде значительно возрастает электрический ток вдоль следа, достигая величины 30 А.

Не менее удивительная идея была предложена в работе (Невский, 1978), в которой было высказано предположение о возможности появления мощных электрических пробоев (молний) между метеороидом и землей с соответствующими последствиями. Основа идеи автора состоит из двух принципиальных положений: первое – возможность электризации метеороида при движении его в атмосфере с большими скоростями, и второе – придуманное им явление, заключающееся в том, что потенциал наэлектризованного метеороида относительно земли из-за наличия вокруг него плазмы может возрасти на много порядков, что и приводит к пробоем между ним и поверхностью Земли. Если первое положение не вызывает сомнений, то второе не укладывается в рамки общей физики.

Работа (Невский, 1978) вызвала ответную реакцию (Ol'khovarov, 1997; 1998), в которой

также были допущены неточности. Это послужило поводом для ответной реакции (Райзер, 2003) в которой критически проанализированы аргументы и выводы двух участников дискуссии. Показано, что ошибочны как вывод Невского (1978) об огромных разностях потенциалов метеороид—Земля, так и мнение (O'khovator, 1997; 1998) об их крайне малых значениях. Дана реалистичная оценка заряда метеороида и его потенциала относительно Земли (Райзер, 2003).

Идея о главенствующей роли электрических эффектов, сопровождающих падение крупных метеоритов, привела исследователей к возможности объяснения последствий падения Тунгусского метеорита в 1908 г. Например, в работе (Соляник, 1980) основным моментом в происходящих процессах является высокая скорость движения метеорных тел в высоких слоях атмосферы, существенно больше чем 5 км/с. Этого достаточно, чтобы преодолеть потенциальный барьер и вызвать ударами налетающих на тело молекул воздуха выбивание внешних электронов с его поверхности, что ведет к его положительному зарядению. Когда тело настолько сближается с земной поверхностью, что напряженность индуцированного здесь поля начинает достигать пробойного значения, вся электрическая энергия в системе голова—хвост переключается на разряд с земной поверхностью. Лавинный разряд в центре катастрофы, длившийся 1–2 с, порождает цилиндрические волны, которые и вызвали радиальный вывал леса на большом пространстве.

Действительно, заряд, оцененный автором в 120 Кл и сосредоточенный в теле диаметром порядка 20 м, обладает энергией $\sim 10^{17}$ Дж и, по расчетам Соляника, это могло бы объяснить главные эффекты, вызванные падением Тунгусского метеорита. Однако его исходная гипотеза о зарядении тела метеорита бомбардировкой молекулами воздуха при скорости 5 км/с, как минимум, вызывает сомнения. Кинетическая энергия молекул воздуха при такой скорости составляет ~ 4 эВ. Работа выхода у железа ~ 4.8 эВ. Более того, вследствие сверхзвукового движения образуется ударная волна и, как следствие, в непосредственной близости к поверхности метеорита образуется зона повышенной концентрации воздуха и плазмы с очень малым свободным пробегом. Но, самое главное, автор не учел тот факт, что при достижении заряда 120 Кл для выхода иона на расстояние, например, 1 мм от поверхности метеорита нужна энергия $\sim 10^9$ эВ. Учет этого обстоятельства

значительно уменьшает рассчитанную величину заряда и, соответственно, существенно скажется на выводах автора.

В 1993 г. известный исследователь метеорных явлений Кеау опубликовал работу (Keau, 1993), в которой кратко рассмотрены достижения исследователей к этому времени и критически рассмотрена его собственная гипотеза (Keau, 1980a) о механизме электромагнитного излучения при турбулентном движении сильно ионизированной плазмы в следе болида. В его работе рассматриваются болиды со звездной величиной не менее -12^m . При соответствующей массе порядка 50–100 кг мощность потерь энергии превышает десятки гигаватт. Его светоотдача, зависящая от скорости и состава, составляет несколько процентов. Ионизация того же порядка, а остаточная энергия выделяется в основном в виде тепла. Чрезвычайно высокая плотность энергии, заключенная в плазменном шлейфе, при сильной турбулентности может быть причиной возбуждения всевозможных колебательных мод, в том числе и на частоте звукового диапазона (излучение ELF и VLF — низкие и очень низкие частоты). Но это только гипотеза, считает автор, и проблема состоит в том, чтобы обнаружить реальный механизм генерации радиоизлучения. Одна возможность оказалась связанной с возбуждением магнитогиродинамической волны в плазменном следе болида. Делая оценки проводимости плазмы, он находит, что для типичных плотности и длины следа, число Лундквиста, определяющее возможность существования магнитогиродинамических альвеновских волн, слишком мало. Взаимодействие геомагнитного поля с плазмой для болида со звездной величиной -16^m дает излучаемую мощность не более 100 Вт.

Более перспективная гипотеза, как считает Кеау (1980b), связана с явлением турбулентности плазмы в следе болида, которая способствует, согласно гипотезе, взаимному наложению силовых линий геомагнитного поля и его резкому усилению. Вскоре после публикации описанного выше механизма излучения, эта гипотеза была более детально разработана Бронштэном (1983; 1981), который показал, что типичный электрофонический болид со звездной величиной -13^m может генерировать более мегаватта радиоизлучения в области ELF-/VLF-спектра. В заключение Бронштэн выражает надежду, что эти гипотезы в дальнейшем подтвердятся или могут быть даже усовершенствованы более детальными расчетами.

Для развития и понимания природы радиоизлучения метеорных потоков и проверки различных предлагаемых гипотез, в работе (Guha и др., 2012) представлены результаты исследования временного и спектрального характера электромагнитных VLF-волн, во время метеорного потока Леониды 18.11. 2009 г. Экспериментальная установка состояла из антенны в виде квадратной рамки со стороной 1 м, установленной на крыше физического отделения Университета Трипуры (шт. на востоке Индии). Напряжение, индуцируемое в антенне, подавалось на предусилитель и затем проходило через низкочастотный фильтр с полосой пропускания 30 кГц на верхней границе среза, и на более низких частотах среза около 25 кГц и 3 кГц и ниже. Часы компьютера синхронизировались с помощью GPS-приемника.

Анализ временных данных и динамической спектрограммы выявил отчетливые электромагнитные импульсы в диапазоне частот от нескольких Гц до 2 кГц в течение пиковой активности ливня. Установлено, что спектральный характер этих импульсов полностью отличается от спектральных характеристик грозových разрядов. Найдено, что в период пиковой активности количество метеоров по данным для низкочастотных (ELF) наблюдений составляет около 11000 метеоров в час, что примерно в 137 раз больше, чем зарегистрированная во всем мире частота видимых явлений. Результаты этих наблюдений авторы (Guha и др., 2012) обсуждают с точки зрения возможности осаждения частиц метеорной пыли и их взаимодействия с ионосферной плазмой, приводящего к излучению электромагнитных волн при прохождении метеоров через атмосферу Земли.

Интересное наблюдение описано в работе (Verveer и др., 2000), выполненной исследователями из CSIRO Australia (Государственное объединение научных и прикладных исследований) с помощью сети камер, следящих за потоками метеоров. Сеть на равнине Налларбор состоит из трех камер, покрывающих все небо. Они открыты всю ночь, и на них отображаются все объекты, пролетающие над равниной. 27 января в 14:50 UT российский спутник связи Молния 1-67 вошел в атмосферу над Западной Австралией. Большой оранжевый огненный шар пересек побережье южной Австралии и был замечен при движении в северо-западном направлении. Наблюдатель из Уиндема слышал электрофонические звуки. Приблизительно в это же время геофон в Перте (столица шт. Западная Австралия)

зафиксировал звуки взрыва. Сейсмометры также зафиксировали импульсы, но один из них не сработал, и это означало, пишут авторы, что событие было магнитным. Магнитные показания были проверены с четырех других станций в Австралии (Лирмонт, Таунсвилл, Канберра и Хобарт). Все показали отчетливый магнитный импульс в момент входа спутника в атмосферу. Индукция поля составила приблизительно 40 нТл.

Известно, что плотность высокотемпературной плазмы в хвосте болида в непосредственной близости от него имеет высокую концентрацию (см., например, Бронштэн, 1981; Астапович, 1958). Этот факт был использован в теоретической работе (Бронштэн, 1983), в которой сделана попытка обосновать гипотезу, основанную на скручивании силовых линий геомагнитного поля вследствие турбулентного движения в ионном следе. Автор нашел, что на высоте $R = 50$ км болид массой 2 кг вызывает усиление напряженности магнитного поля Земли более, чем в 2000 раз. При этом мощность радиоизлучения при распаде поля составляет около $P = 2.5$ МВт.

Однако здесь следует заметить, что, несмотря на такие оптимистичные результаты, напряженность электромагнитного поля вблизи Земли ($R \sim 50$ км) составляет всего лишь 0.05 В/м. Действительно, если пренебречь возможной некоторой направленностью излучения, то напряженность поля, связанная с мощностью излучения (что следует из определения вектора Пойнтинга), равна $E = \frac{1}{R} \sqrt{30P} = 0.17$ В/м, что приблизительно на три порядка меньше, чем в опытах по непосредственному воздействию поля на органы слуха (Sommer, Gierke, 1964). Разумеется, этот факт вызывает сомнения в возможности наблюдения прямого электрофонического эффекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ НЕКОТОРЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ

Группа исследователей (Veitch и др., 1995) провела 80-часовой одновременный просмотр изображений и видео VLF-излучения и получила записи, сделанные во время потоков Лириды, Персеиды, Ориониды, Леониды и Геминиды. Метеоры величиной от -11^m до $+4^m$ были хотя бы один раз обнаружены за время этих наблюдений. Это исследование было вызвано публикацией (Drobosck, 1992), в которой было заявлено, что "обычные" метеоры могут производить VLF-излучение. Ранние исследования

с использованием простых транзисторных схем, заявляют авторы (Veesch и др., 1995) не выявили каких-либо очевидных корреляций между появлением “типичных” метеоров и генерацией отчетливого VLF-сигнала. Более совершенная аппаратура также показала их отсутствие, и авторы (Veesch и др., 1995) считают, что (Drobnock, 1992) ошибочно принял естественный ради фон за VLF-импульсы из метеоров. Распределение звездных величин ($M^m < 0$) метеоров, наблюдавшихся за последние три года, приведено авторами в таблице.

Таблица. Распределение количества метеоров по звездным величинам

Звездные величины, M^m	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-10	-11	-12
Число метеоров, N	28	24	9	12	10	9	3	2	3	1	1	0

За все время наблюдений был зарегистрирован единственный VLF-сигнал от метеора, графическое изображение которого показан на рис. 1.

Анализ показал, что импульс имеет широкополосную составляющую от 1 до 10 кГц, с двумя большими пиками около 1.5 и 2.5 кГц. Точки В и Е указывают начало и конец сигнала. В точке G активировалась автоматическая регулировка усиления видеокамеры. Интервал времени от В до Е составляет около 1/3 с.

Из известных характеристик системы и нескольких упрощающих предположений авторы оценили локальную напряженность

электрического поля E_0 , создаваемого прохождением метеороида, а также индукцию магнитного поля на антенне B_0 . Расчет показал, что B_0 должна быть порядка 8×10^{-6} Тл. Антенна имела площадь 1 м^2 и содержала 360 витков провода. Электрическое поле вблизи антенны будет $E_0 = cB_0$, где c – скорость света. Авторы нашли, что $E_0 > 2 \times 10^3 \text{ В/м}$. На этом основании Veesch и др. (1995) считают, что система обнаружения имеет достаточную чувствительность к утверждению (используя приведенную выше таблицу в качестве ориентира), что большинство метеороидов не производят VLF-излучение. В заключение они заявляют, что нет абсолютно никаких доказательств в поддержку заявления (Drobnock, 1992) о том, что такие слабые метеоры, как $M^{-m} = +1$, могут производить VLF-радиоизлучение.

Здесь уместно сделать следующее замечание. В работе (Veesch и др., 1995) по неясной причине игнорировали такие понятия, как рамочная антенна, ближнее поле (кулоновское поле) и дальнее поле (электромагнитная волна) и что связь $E_0 = cB_0$ справедлива только для электромагнитной волны в дальней зоне, а это зависит от того, как далеко от источника, L , находится наблюдатель, и от длины волны λ . Только для $L \gg \lambda$ справедливо равенство $E_0 = cB_0$. Учет этого мог бы существенно повлиять на оценку полей.

Для описания электромагнитных и электрофонических явлений, сопровождающих полет метеороида в атмосфере Земли, необходимо, чтобы физическая модель генерации низкочастотного излучения могла воспроизвести спектр импульса, его характер и спектральную интенсивность. С этой целью Veesch и Foschini (1999) привлекают для своей гипотезы ударную волну, возникающую перед телом, движущимся в атмосфере с гиперзвуковой скоростью. Наличие большого градиента давления, температуры и других параметров в ударной волне

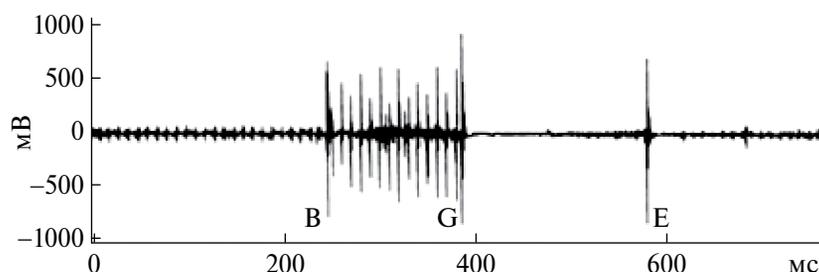


Рис. 1. Графическое изображение VLF-сигнала метеора.

способствует сильной диффузии электронов по отношению к ионам и возникновению объемных зарядов. Чтобы оценить порядок величины электрического поля, генерируемого ударной волной, Beech и Foschini (1999) ссылаются на работу (Зельдович, Райзер, 1996), однако не учитывают тот факт, что высокая напряженность электрического поля существует только в области двойного электрического слоя с толщиной порядка величины дебаевского радиуса. Поэтому в точке нахождения наблюдателя это поле будет чрезвычайно мало.

В последующей за этим работе (Beech, Foschini, 2001) эти же авторы исследовали условия, при которых метеороиды потока Леониды могут генерировать кратковременные электрофонические звуки. Теоретически была оценена электронная плотность в столбе абляции метеороида как функция времени. Используя пороговые условия, обсуждавшиеся ранее (Beech, Foschini, 1999), они пришли к выводу, что метеороиды потока Леониды более массивные, чем ~ 0.1 кг и могут потенциально генерировать кратковременные электрофонические взрывы. В работе (Beech, Foschini, 2001) авторы предположили, что феномен взрыва может быть объяснен с точки зрения распространения ударной волны в плазменном столбе метеора. В рамках этой модели утверждается, согласно (Зельдович, Райзер 1996), что быстрое движение электронов по отношению к гораздо более массивным и медленным ионам создает значительный пространственный заряд. Электрический импульс генерируется в ответ на развитие объемного заряда, и при условии, что результирующие изменения напряженности электрического поля достаточно велики, авторы, принимая гипотезу (Keay, 1980b), предположили, что он может вызывать генерацию слышимых звуков у наблюдателя в процессе трансдукции (преобразование электромагнитной волны в звуковую). Возникающая ударная волна рождается во время катастрофического распада родительского метеороида. При наличии или отсутствии материала, необходимого для трансдукции, этот факт может объяснить, почему электрофонические звуки часто кажутся сильно локализованными. Эксперименты, проведенные Keay и Ostwald (1991), предполагают, что требуется электрическая напряженность поля не менее 160 В/м для создания электрофонических звуков, и что такое пороговое электрическое поле может генерироваться при условии, что плотность электронов

в пределах плазмы превышает $n_e \approx 4 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Делая выводы, Beech и Foschini (2001) замечают, что полученная ими оценка минимальной массы метеороида для генерации электрофонических звуков в потоке Леониды намного меньше, чем полученная для длительных электрофонических звуков (порядка 100 г). По мнению этих авторов, этот результат хорошо согласуется с наблюдениями, поскольку они достаточно хорошо уверены в том, что в потоке Леониды действительно существуют метеороиды массой порядка ста граммов и больше (см., например, Spurny, 2000).

В этой работе (Beech, Foschini, 2001) не утверждается, что каждый метеороид потока Леониды со звездной величиной -7^m (и ярче) обязательно воспроизводит электрофонический взрыв. Ключевым моментом является то, что метеороид должен одновременно создать ударную волну, и что плотность электронов в плазменном столбе должна превышать 10^{19} м^{-3} . Кроме того, для получения измеримого сигнала в VLF-диапазоне метеор должен располагаться на расстоянии более 75 км от наблюдателя. Для многих метеороидов потока Леониды, записанных в 1998 г., было обнаружено, что на высотах, превышающих 120 км, начинается быстрая абляция, и замечено, что средняя высота активного пути метеороидов Леониды оказалась около 85 км (Spurny и др., 2000). Эти результаты, утверждается в (Beech, Foschini, 2001), безусловно, указывают на то, что метеороиды Леонид состоят из очень рыхлого и легко разрушаемого материала.

Изложенная выше модель предполагает (Beech, Foschini, 2001), что метеороид должен проникнуть на высоту 80–90 км, прежде чем он подвергнется катастрофическому разрушению. На этом основании в работе (Beech, Foschini, 2001) не найдено существенных причин, по которым некоторые метеороиды потока Леониды могут не производить электрофонические звуки. Один из ключевых аспектов устойчивого электрофонического эффекта является разработанная модель (Бронштэн, 1983), которая объясняет производство очень низкочастотного (VLF) излучения. Это излучение генерируется за счет взаимодействия высокоионизированного и турбулентного потока метеорной плазмы с магнитным полем Земли. Трансдукция VLF-излучения объектов, близких к наблюдателю, приводит к образованию слышимых звуков. Наоборот, модель электрофонического взрыва, описанная в (Beech,

Foschini, 1999), не предсказывает конкретно появление любого VLF-сигнала. Скорее, она предсказывает появление кратковременных импульсов в электрическом поле высокой напряженности. В этой работе (Beech, Foschini, 2001) отмечается недостаток в экспериментальных исследованиях, проведенных на сегодняшний день, так как они в основном сосредоточены на обнаружении VLF-излучения путем мониторинга вариаций магнитного поля, и утверждают, что электрофонические звуки более вероятны вследствие генерации переходных процессов в электрическом поле.

Для успешного решения проблемы с электрофоническими явлениями нужна постановка экспериментов для определения количественных оценок напряженности электромагнитного поля, его корреляции с акустическим полем, диапазона частот излучения и пр. С этой целью группа исследователей (Garaj и др., 1999) провела первое инструментальное обнаружение электрофонических звуков, полученных при наблюдении за метеорным потоком Леониды в 1998 г.

Участникам экспедиции удалось обнаружить ELF-/VLF-излучение от метеоров и впервые записать электрофонные звуки. Для того чтобы быть уверенным, что реальные сигналы детектируются, для визуальной записи метеоров авторы использовали ПЗС-камеры высокой чувствительности в профессиональном видеомонофоне. С помощью этой установки можно записать четыре аудиоканала одновременно с видеоканалами, что позволяло идеально синхронизировать время. Идеальная синхронизация времени очень важна. Электромагнитные помехи могут быть сведены к минимуму соответствующим выбором местоположения наблюдателя. Наблюдения проводились в ненаселенной области примерно в 20 км к юго-востоку от Улан-Батора (Монголия). В экспериментальной установке были использованы два отдельных и локально заземленных VLF-приемника со штыревыми антеннами. Для того чтобы избежать локальных помех, антенны были хорошо отделены друг от друга и от визуальных наблюдателей. Частотная чувствительность приемника (с порогом $< 10^{-3}$ В/м) имеет максимум на частоте 1 кГц. Другая часть экспериментальной установки была использована для мониторинга звука окружающей среды. В дополнение к ELF-/VLF-сигналам от метеоров, известным ранее, были получены несколько новых записей, впервые с не

вызывающей сомнения временной корреляцией между видео- и ELF-/VLF-радиосигналами. Однако электрофонные звуки не были обнаружены в этих событиях. Запись наиболее интересного сигнала от метеора с визуальной величиной -8^m показана на рис. 2.

В выводах работы (Garaj и др., 1999) показано, что электрофонные звуки не были записаны во время любого из VLF-событий. Это можно объяснить, по их мнению, недостаточной интенсивностью сигналов или отсутствием надлежащих объектов для электрофонного преобразования (трансдукции).

Здесь следует заметить, что любая гипотеза о природе электрофонических явлений всегда связана с вопросом о наличии и происхождении электромагнитного поля. Причем важны такие данные, как длительность импульса, его спектр, напряженность поля в зоне наблюдения, что практически однозначно связано с интенсивностью излучения. Если речь идет об очень низких частотах (менее килогерца), то длина волны в этом случае больше 300 км и наблюдатель практически всегда расположен в ближней зоне (кулоновская зона), и в этом случае более уместно рассматривать поле как изменяющееся со временем электростатическое поле.

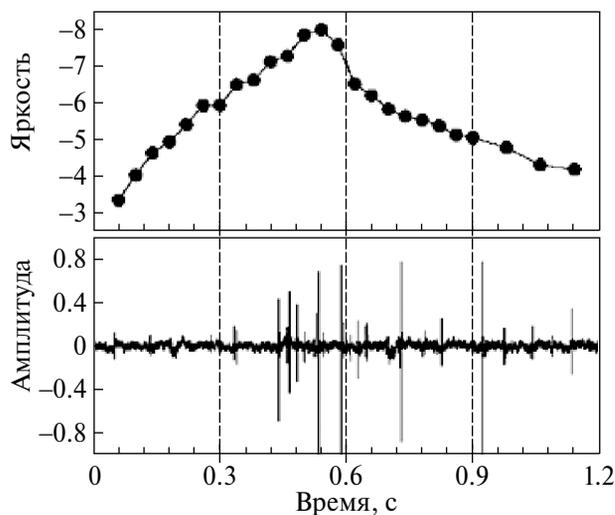


Рис. 2. Записанное ELF-/VLF-излучение от метеора с визуальной величиной $-8^m \pm 0.5^m$. Верхний рисунок — это записанное видео показывает яркость метеора, а нижний это — запись сигнала в ELF-/VLF-канале во время этого события (амплитуда дается в условных единицах). Точность синхронизации между видео- и ELF-/VLF-каналами ± 0.02 с.

Такой эксперимент был поставлен группой исследователей из Тель-Авивского университета (Price, Blum, 2000) во время метеорного потока Леониды 18 ноября 1999 г. Пункт для наблюдения ELF-/VLF-сигналов был расположен в Исследовательском институте университета Бен-Гуриона. Приемная антенна, предназначенная для получения очень слабых сигналов на чрезвычайно низкой частоте ($100 \text{ Гц} < f < 3000 \text{ Гц}$) и более высокой частоте ($3 \text{ кГц} < f < 50 \text{ кГц}$), обычно использовалась при исследованиях молнии. Она была установлена на высоте 10 м, с двумя ортогональными треугольными петлями, каждая с базовым уровнем 18 м и высотой 9 м, охватывая площадь около 81 м^2 для каждой петли. Одна петля установлена в магнитном направлении север–юг, а другая восток–запад. Чувствительность системы в широкополосном диапазоне (0.1–50 кГц) составляет 6 мкВ/м. Динамический диапазон антенна/предусилитель составлял приблизительно 100 дБ, что позволяет обнаруживать молниевые разряды с больших расстояний. Поскольку антенна чувствительна как к разрядам молнии, так и к возможным метеорным импульсам, необходимо было различать сигналы молнии и метеора.

На рис. 3 показаны характерные радиоимпульсы и спектры от метеороида и от молнии.

Между молнией и метеорным сигналом существуют два важных отличия, замечают Price и Blum (2000). Во-первых, импульс молнии длится не более 1 мс, метеорный импульс продолжается до 10 мс. Хотя это длиннее, чем импульс молнии, но это намного короче, чем длительность оптического метеорного следа, который может длиться в течение нескольких секунд. Во-вторых, амплитуда импульса молнии намного больше, чем метеорный импульс.

В отличие от спектров молнии, метеорные спектры имеют минимум около 5 кГц, с большим максимумом в диапазоне ELF (0.3–1.5 кГц) и дополнительным более слабым максимумом около 2 кГц. На рис. 3г показан типичный спектр от метеороида. В диапазоне VLF появляется более слабый, более широкий максимум между 6–5 кГц. Сигнал не наблюдался выше 20 кГц. Характерные различия между спектрами молний и метеоров позволяют автоматически определять, вызван ли электромагнитный сигнал молнией или метеорами. Это позволило авторам отличать метеорные импульсы и, подсчитать количество метеоритных ELF-/VLF-сигналов,

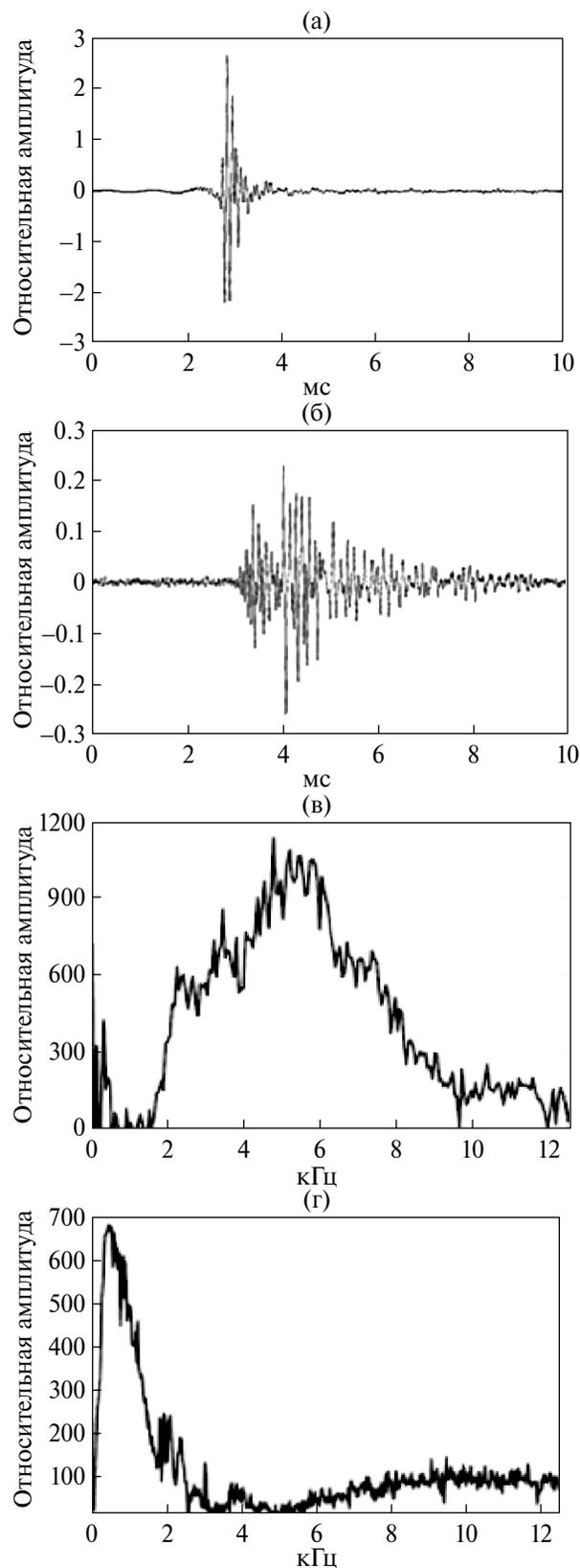


Рис. 3. Радиоимпульсы и спектры от метеороида и от молнии: (а) – разряд молнии; (б) – импульс от метеора; (в) – спектр от молнии; (г) – спектр от метеора.

наблюдавшихся в ночь с 17 на 18 ноября 1999 г. Пример спектра на пике метеорного потока показан на рис. 3г.

В работе (Price, Blum, 2000) отмечается также тот факт, что в месте расположения пункта наблюдения в радиусе 2000 км грозы отсутствовали. На основании этих данных авторы приходят к выводу, что характерные различия между спектрами молний и метеоров позволяют автоматически определять, вызван ли электромагнитный сигнал молнией или метеором. Кроме этого, было найдено, что с использованием такого метода подсчета потока метеоров был обнаружен пиковый поток 15000 событий в час по сравнению с оценкой 350 в час, которая получена при использовании оптических методов, т.е. этот метод регистрировал почти в 50 раз больше метеоров, чем оптический метод. Кроме этого, найдено, что такой метод показал дополнительную интересную особенность, не замеченную в оптических наблюдениях. Вторичный пик потока был обнаружен за полтора часа до оптического пика. Возможно, что видимые метеоры представляют собой лишь небольшое подмножество всех метеоров.

В итогах работы (Price, Blum, 2000) отмечено, что слабые метеоры можно обнаружить электромагнитным методом и его можно использовать в дневное время и в любых погодных условиях. Но, самое главное, авторы уверены в том, что результаты эксперимента бросают вызов существующим теориям изучения радиоволн болида-ми (Keay, 1993; 1995).

Очень яркие болиды ($\sim 13^m$), по мнению некоторых исследователей (Spalding, 2017), могут непосредственно воздействовать световым потоком, вызывая их тепловое расширение с последующей генерацией акустической волны. Это так называемая фотоакустическая гипотеза, авторы которой воспользовались известными данными о метеорите EN091214 со звездной величиной -15^m (Spurny, 2000), что соответствует плотности потока на поверхности Земли $W = 23$ мДж/(м²с) и без детальных расчетов пришли к выводу о том, что уровень громкости должен составлять 27дБ на частоте 1 кГц, что соответствует интенсивности акустической волны 10^{-9} Дж/(м²с) (шепот на расстоянии 1 м).

Здесь необходимо сделать замечание. Механизм генерации акустических волн в этом случае заключается в следующем. Болид излучает поток света, промодулированный колебаниями яркости ($\sim 30\%$, как считают авторы).

Падая на поверхность какого-либо материала вблизи наблюдателя, световой поток нагревает эту поверхность и, расширяясь в течение полупериода, она генерирует звуковой импульс. В последующие полупериоды все повторяется. Однако простые оценки показывают, что авторы на несколько порядков завысили результат. Это следует из элементарных оценок. Пусть вся энергия $Q = WT$, излученная за один полупериод $T = 0.5 \times 10^{-3}$ с и поглощенная на глубину L , пошла на нагревание какого-либо материала с площадью $S = 1$ м². Усредненное удлинение этого материала ΔL , вызванное повышением температуры на Δt , равно $\Delta L = \alpha L \Delta t$, где $\alpha \sim 10^{-4}$ К⁻¹ – характерная величина коэффициента линейного расширения для многих материалов (Григорьев, Мейлихов, 1991). Количество тепла, полученное материалом, можно выразить также известной формулой $Q = cm \Delta t$, где $m = LS\rho$ – масса прогретой области, $\rho \sim 3 \times 10^3$ кг/м³ – характерная плотность твердых тел и $c \sim 2 \times 10^3$ Дж/(кг·К) – характерная теплоемкость. Подставляя, получим выражение для ΔL :

$$\Delta L = \frac{WT\alpha}{cS\rho} \approx 3.5 \times 10^{-16} \text{ м.}$$

Фактически, это амплитуда акустической волны, которая соответствует давлению в волне $\Delta p = \frac{\nabla L \cdot \gamma \cdot \pi \cdot \omega}{v} \approx 10^{-9}$ Па. Здесь $\gamma = 1.4$ – показатель адиабаты, $\omega = 2\pi \times 10^3$ с⁻¹ – циклическая частота, $p = 10^5$ Па – атмосферное давление, $v = 330$ м/с – скорость звука. Или соответствует интенсивности

$$I = \frac{(\Delta p)^2}{2\rho_a v} \approx 1.2 \times 10^{-21} \text{ Дж/(м}^2 \times \text{с)},$$

где $\rho_a = 1.3$ кг/м³ – плотность атмосферы на поверхности Земли. Очевидно, что такой слабый уровень громкости лежит далеко за пределами возможности человека ощутить звук, например, минимально ощутимое давление составляет $\sim 10^{-3}$ Па (Сапожников, 1989).

Электрофонические метеоритные звуки, слышимые одновременно с появлением метеора, являются давней проблемой из-за их чувственного восприятия. Предыдущие исследования были неполными из-за отсутствия инструментальных записей звука. Группа исследователей (Zgrablic и др., 2002) провела инструментальное обнаружение электрофонических звуков при наблюдении за метеорным потоком Леониды в 1998 г. в Монголии.

Наблюдательный пункт экспедиции был размещен в необитаемом районе Центральной Монголии, лишенном людей или животных

с ночной активностью, линий электропередач и электрооборудований переменного тока любого рода. Экспериментальная установка состояла из видеокамеры с широким полем зрения, двух низкочастотных приемников, двух микрофонов, один из которых был в специальном звуконепроницаемом экране, и оборудованного поста визуального наблюдения. Два локально заземленных VLF-приемника со штыревыми антеннами были размещены на расстоянии 50 м друг от друга и в 30 м от места наблюдения. Акустически изолированный электрентный микрофон (“электрофонический микрофон”) помещался в коробку, акустически изолированную от окружающей среды со специальной установкой, и был удален на расстоянии 20 м от места наблюдений. Другой электрентный микрофон без каких-либо специальных экранов был помещен рядом с наблюдательным пунктом для записи комментариев наблюдателей и контроля звуков в окружающей среде.

За время наблюдения были обнаружены два отчетливых электрофонических сигнала. В первом случае метеорный огненный шар появился на восточной части неба с абсолютной звездной величиной $-6.5^m \pm 0.5^m$. Полная траектория была записана на видео. Два визуальных наблюдателя увидели метеорит и независимо сообщили о короткой продолжительности звука типа “хлопок”. На открытых и изолированном каналах, регистрировался звуковой сигнал с практически одинаковой продолжительностью и спектральным распределением. Интересно отметить, что ELF-/VLF-радиосигнал не был обнаружен в процессе этого события.

Еще одно, более убедительное электрофоническое событие было обнаружено через 20 ч. В северной части неба появился очень яркий огненный шар в потоке Леониды. Шесть человек сообщили, что слышали громкий электрофонный звук, который был похож на хлопок. “Огненный шар” был замечен непосредственно тремя наблюдателями, и визуальная яркость составляла $-12^m \pm 1^m$. Другие свидетели, контролируя другие части неба, слышали только звук, когда вспышка огненного шара осветила их. Электрофонический сигнал регистрировался на электрофонических открытых каналах одновременно. Звуковой сигнал длился 0.074 ± 0004 с и имел значительный спектральный вес на очень низких частотах и был очень похож на предыдущие сигналы. Максимальная интенсивность лежала в диапазоне частот от 37 Гц до 44 Гц, как на электрофонических, так и на открытых

каналах. Отношение сигнал/шум на электрофоническом канале составляет 14 дБ. На открытом канале шум был выше, но сигнал все еще был очень четким. Уровень звукового давления на открытом канале был 85 и 70 дБ. Опять же, никакой совпадающий ELF-/VLF-радиосигнал не был обнаружен. Однако ELF-/VLF-сигналы были обнаружены для двух других метеоров (опубликованные в другой статье (Garaj и др., 1999)). Последовательность коротких VLF-импульсов появилась одновременно с максимумом света метеора, и вероятность того, что это был некоррелированный атмосферный шум приблизительно 1% или меньше. Согласно (Keay, Ostwald, 1991), сигналы были слишком слабые, чтобы создать электрофонический звук.

В заключение работы (Zgrablic и др., 2002) сделан вывод, что обнаруженные электрофонические звуки связаны с метеорами. Кроме того, что они удовлетворяют априорным критериям нескольких других факторов, подтверждающих их метеорное происхождение. Во-первых, экспериментальная установка была разработана так, чтобы устранить любой случайный экологический звук. Во-вторых, наблюдательный пункт был размещен в необитаемом районе. В течение 10 дней наблюдения никакого экологического звука такой величины и, особенно, такого вида, не были услышаны или инструментально записаны. Поэтому запись некоррелированного экологического звука, совпадающего с появлением метеора, крайне маловероятна. Авторы замечают также, что они не обнаружили низкочастотное электромагнитное излучение, вероятно, потому, что приемники были полностью нечувствительны к частотам ниже 500 Гц. Если сравнить интенсивности звука в электрофоническом ящике с интенсивностью на открытом микрофоне с учетом коэффициента звукопоглощения коробки, то приходим к выводу, что звуки, дошедшие до микрофона, были произведены внутри самой электрофонической коробки, а не пришли извне. В конце статьи авторы приводят теоретические оценки и получают связь между массой метеорита, высотой и числом Рейнольдса (см. рис. 4).

Согласно выполненным расчетам, для получения электрофонического эффекта в рамках теории (Keay, 1980b; Бронштэн, 1983), первоначальный размер метеороида Леонид, заключают авторы, должен быть более 200 см (масса ~3000 кг). Недавние исследования показывают, что Леониды больше похожи на “пылевые

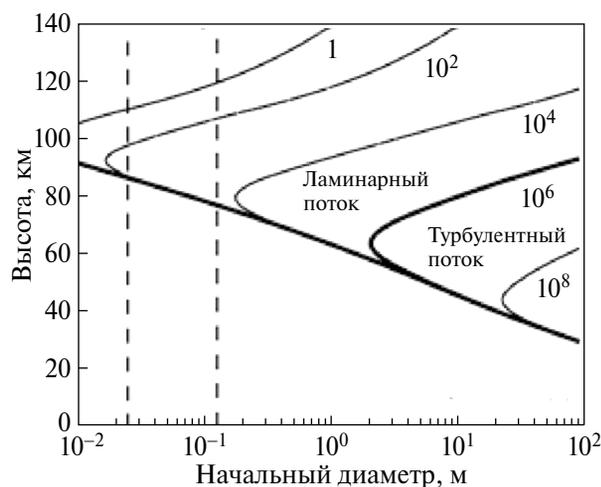


Рис. 4. Рассчитанные числа Рейнольдса как функция начального диаметра метеора и высоты. Сплошные линии соответствуют постоянным числам Рейнольдса, значения которых нанесены на график. Жирная линия отделяет область ламинарного течения ($Re < 106$) от области турбулентного течения ($Re > 106$). Пунктирные вертикальные линии соответствуют электрофоническим метеорам, зарегистрированным в данной экспедиции. Расчеты были выполнены для зенитного угла $z_r = 0^\circ$.

шары” (Spurny и др., 2000). А абляция одного тела представляет собой только первый порядок приближения. Более точный расчет числа Рейнольдса, вероятно, даст еще более высокое значение требуемой массы. Хотя теория (Keay, 1980b; Бронштэн, 1983) очень успешна в объяснении низкочастотного электромагнитного излучения от медленных болидов, однако оказывается, что она не может быть применена к метеорам потока Леониды в целом и поэтому требуются некоторые уточнения теории, заключают Zgrablic и др. (2002).

Проблема установления факта электромагнитного излучения метеора в диапазоне VLF сильно осложняется импульсными помехами различного происхождения. Например, согласно экспериментальным данным на Земле каждую секунду происходит более сотни грозных разрядов. Поскольку в волноводе Земля–ионосфера очень хорошо распространяются электромагнитные волны VLF, то VLF-сигналы в эфире очень многочисленны. Молния излучает очень мощные VLF-сигналы, распространяющиеся на очень большие расстояния. Время движение болида в атмосфере составляет более нескольких

секунд, и если нет детальной информации о грозном импульсе, то нельзя с уверенностью утверждать, что радиоимпульс, записанный одновременно с фотокамерой, имеет метеорное происхождение. Учитывая эти факты, было предпринято двухлетнее непрерывное исследование возможных VLF-сигналов, связанных с метеорами ярче -5^m (Sung, Brown, 2020). Аппаратура позволяла откалибровать временные и пространственные корреляции между VLF-сигналами и кривыми блеска болида. Были использованы также непрерывные наблюдения с помощью систем (AWESOME), развернутых в обсерваториях Элгинфилд (недалеко от Лондона) и Онтарио (Канада) для мониторинга VLF-радиосигналов и установления корреляции с видеозаписями болидов всего неба. AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling and Education) по своей сути представляет радиоприемное устройство, способное измерять естественные и техногенные сигналы в интервале частот от 500 Гц и до 47 кГц, обнаруживать активность Солнца и других астрономических объектов. Такие наблюдения проводились над болидами, обнаруживаемыми Метеорной сетью Южного Онтарио. Система AWESOME имеет две ортогональные VLF-антенны с площадью 17.6 м^2 , что позволяет рассчитывать направление входящих VLF-сигналов, которые сравнивались с видимыми оптическими измерениями местоположений одновременно обнаруженных метеоров. Чтобы сопоставить VLF-сигналы с метеорами, была использована база данных о событиях с болидами. Эта сеть состоит из более чем 20 видеокамер всего неба в регионе Южного Онтарио для наблюдения за метеорной активностью. Она чувствительна к метеорам видимой величины -2^m и ярче, что примерно соответствует предельным массам порядка десятков граммов при низких скоростях (20 км/с) и до 0.1 г при 60 км/с. Радиоимпульсы VLF, потенциально связанные с болидами, проверялись по базе данных Национальной сети обнаружения молний (NLDN) для исключения ложных сигналов. В течение двухлетнего интервала исследований было обнаружено более 80 ярких метеоров (видимая звездная величина ярче -5^m , а самое яркое зарегистрированное событие -7.8^m) и сопоставлены с сигналами VLF, обнаруженными системой AWESOME.

Продолжительность типичной кривой блеска метеора, обнаруженного системой

наблюдений, колеблется от 0.2 с до 1 с, а исключительно длинные — до 3.6 с. Из наблюдаемых данных следует, что при исследованиях случайных временных окон было найдено, что, как правило, AWESOME обнаруживает 4.5 импульсов в секунду. Фактическая скорость обнаружения хотя бы одного сигнала молнии во временном окне кривой блеска метеора составляет приблизительно 87.5%. На рис. 5 показана совокупность импульсов от одного события 23.08.2017 г., для которого была корреляция со временем и с направлением на метеор. Все остальные пики аналогичной или большей величины в пределах продолжительности кривой блеска не соответствуют направлению на метеор.

Для всех метеорных событий, которые совпадают как по времени, так и по направлению, всегда есть больше пиков в одном и том же временном интервале, направление на которые не соответствует направлению на метеор. Ни один из пиков, совпадающих как по времени, так и по направлению, не доминирует в спектре; они всегда являются одним из многих неразличимых сигналов в течение блеска метеора. Более того, они не показывают существенного спектрального отличия от молнии. Ни один из записанных сигналов не отличается большой продолжительностью, сильными спектральными пиками и поведением от одного VLF-сигнала метеора, описанного в (Veesh и др., 1995). Самое простое объяснение этого состоит в том (заключают авторы), что это просто радиоимпульсы молний, которые совпали

по времени падения метеора и пришли с того же направления. Они не являются VLF-излучением метеоров, и фактически (заявляют авторы), нет в их двухлетнем обзоре каких-либо заслуживающих доверия VLF-излучений от каких-либо ярких метеоров. Однако, отмечают авторы, очень ярких метеоров в их обзоре очень мало; например, ни один из них не был сравним с энергией метеора в (Veesh и др., 1995). Таким образом, не было найдено четких доказательств VLF-излучения метеоров с предельной звездной величиной -7.8^m .

НЕКОТОРЫЕ ГИПОТЕЗЫ ОТНОСИТЕЛЬНО МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯЖЕНИЯ БОЛИДОВ

Предыдущий обзор показал, что единая точка зрения у исследователей на происхождение электрофонических явлений отсутствует, а те гипотезы, которые претендуют на единственность, обычно усложнены многочисленными и неочевидными предположениями. В таких гипотезах, как правило, отсутствуют четкие и физически обоснованные процессы или их математические модели. Очевидно, причиной этому является относительная редкость таких явлений и сложности, связанные с их экспериментальным исследованием.

Сделаем некоторые оценки интенсивности электромагнитного излучения, вызванного различными процессами, сопровождающими полет болида. Прежде всего, напомним, что

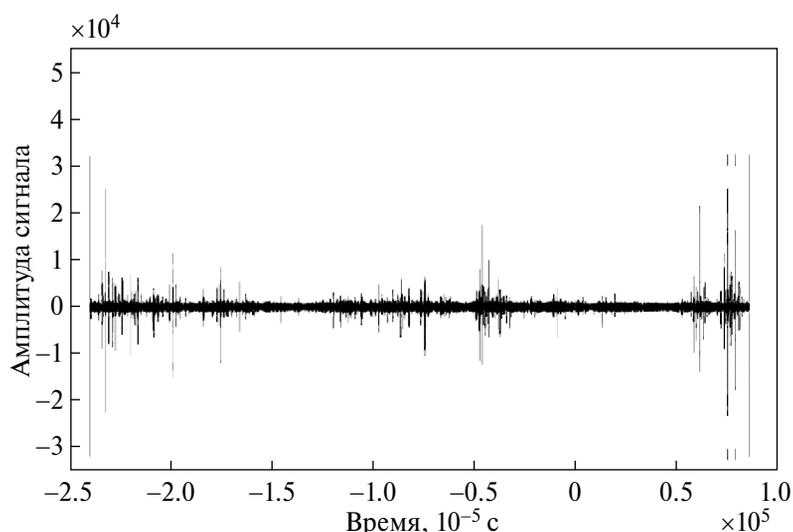


Рис. 5. Расположение пиков импульсов, соответствующих направлению на метеор для события 23.08.2017 г.

зарегистрированные спектры излучения показывают (см. рис. 4), что спектральный максимум лежит в области ~ 1 кГц. Это соответствует длине волны $\lambda = 300$ км. Наблюдения ведутся на расстоянии, существенно меньшем (~ 50 – 100 км), чем длина волны, и в этой связи можно сделать вывод, что вклад кулоновского поля в зарегистрированный спектр очень велик. Кроме этого, возникает естественный вопрос о том, какие процессы вызывают электромагнитное излучение.

Тот факт, что болид во время полета загорается, следует из наблюдений очевидцев. Например, характерная ситуация имела место с Чулымским метеоритом в 1984 г. (Анфиногенов, Фаст, 1985). Масса метеорита составляла 100–1000 т. Полет сопровождался очень необычными звуковыми эффектами. По мере движения были 2–3 особенно яркие вспышки, и на высоте 10–12 км тело начало интенсивно разрушаться. Многие наблюдатели одновременно с яркими оптическими эффектами слышали звуки, характерные для электрических разрядов. Вероятно, это были электрофонные звуки, которые вызваны нераспространением механических колебаний воздуха, а связаны, по мнению некоторых исследователей, с электромагнитными волнами низкой частоты, излучаемыми болидом. Обычный звук на несколько минут запаздывал бы от видимых вспышек, как, например, гром от молнии. Кроме этого, во многих населенных пунктах очевидцы говорили о телепомехах. В поселке Минаевка, близ которого произошла финальная вспышка, вышли из строя фотоэлементы люминесцентных ламп.

Не менее яркое событие имело место в сентябре 2002 г., когда над территорией Иркутской области наблюдался так называемый Витимский болид массой 160 т (Дмитриев, 2005). Во время его полета в районе поселка Мама очевидцами отмечались необычные звуки (шуршание, жужжание) и нарушение режима электроснабжения. Согласно показаниям свидетелей, лампы накаливания в люстре во время полета болида загорелись вполнакала на несколько секунд, хотя электроснабжение всего поселка в эту ночь отсутствовало. Кроме этого, найдены свидетели, которые заметили появление яркого свечения на вершинах столбиков ограды метеоплощадки местного аэропорта (так называемые огни святого Эльма). Экспедиция, работавшая в предполагаемом районе падения, собрала образцы снега

с микроскопическими (10–100 мкм) частицами в форме черных шариков.

Совершенно другие последствия наблюдались при падении Сихотэ-Алинского метеорита (масса более 100 т). Основное отличие от предыдущих событий состоит в том, что после падения было обнаружено большое количество фрагментов, которые оказались практически чистым железом. В феврале 1947 г. в Приморском крае в Уссурийской тайге в горах Сихотэ-Алинь на Дальнем Востоке упал метеорит, остатки которого (около 10%) смогли достигнуть земной поверхности со скоростью 14–15 км/с (Фесенков, 1951). В книге (Кринов, 1981) описан единственный, но важный факт относительно электрических явлений, связанных с Сихотэ-Алинским метеоритом. По сообщению наблюдателя, монтер, находившийся в момент падения метеорита на телефонном столбе, во время вспышки ощутил резкий электрический толчок от проводов несмотря на то, что линия была выключена. Это также один из фактов, согласно которому можно утверждать, что полет болидов в атмосфере сопровождается его электрическим зарядением. Следует напомнить, что эти явления вызваны метеорными телами массой сотни тонн.

Считается, что наиболее убедительной гипотезой электромагнитного излучения болидов является гипотеза Кэя–Бронштэна (Бронштэн, 1983), основанная на механизме скручивания силовых линий геомагнитного поля. Скручивание возникает в результате турбулентного движения в ионном следе болида и вызывает усиление поля до значений 1000 Э, т.е. чтобы это произошло нужно, чтобы осуществилось приблизительно 2000 наложений силовых линий магнитного поля Земли. Количественные расчеты автора показывают, что только самые яркие болиды превышают порог магнитного числа Рейнольдса для этого усиления. Например, тело массой 2 кг и диаметром 12 см, движущееся со скоростью 30 км/с (яркость -12^m) излучает электромагнитные волны мощностью 2.5 МВт. Это соответствует напряженности электрического поля в электромагнитной волне на поверхности Земли, ~ 0.1 В/м. Этого вполне достаточно для регистрации сигналов на простейшие радиоприемники. Однако эта гипотеза (как и все остальные) не объясняет, каким образом наблюдатель слышит звук одновременно с наблюдением полета болида.

Будем в дальнейшем рассматривать преимущественно железные болиды. Однако

это не является недостатком последующего рассмотрения, так как хорошо известно, что среди падающих метеороидов железные составляют несколько процентов и это согласуется с тем фактом, что электрофонные болиды являются относительно редким явлением. Кроме этого, согласно наблюдениям Астапович (1958) и других наблюдателей будем считать, что в большинстве случаев высота электрофонных болидов составляет $h \sim 40$ км, скорость около $v = 15 \sim 20$ км/с, а звездная величина не менее -13^m , что соответствует массе ~ 100 кг и радиусу болида $R_b = 0.15$ м.

На величину заряда Q любого болида существуют ограничения. Один из возможных механизмов заряжения связан с выбиванием электрона налетающей молекулой кислорода или азота при соударении с поверхностью болида. Потенциал ионизации кислорода и азота более 13 эВ, а потенциал ионизации железа (болид) менее 8 эВ. В результате такого столкновения электрон железа (болид) будет выбит и унесен потоком, а положительный ион болида остается на его поверхности. При скорости болида 40 км/с молекула воздуха будет иметь относительную энергию ~ 250 эВ. Этого вполне достаточно для того, чтобы оторвать электрон из болида. Однако по мере заряжения болида положительным зарядом наступит момент, когда электрон не сможет оторваться от болида. В этом состоянии сила Кулона вблизи поверхности болида равна силе “трения” в атмосфере (Гинзбург, 1967), т.е.

$$\frac{Qe}{4\pi\epsilon_0 R_b^2} = \pi\alpha^2 N m_e v^2,$$

где $a \approx 2 \times 10^{-10}$ м – диаметр молекулы, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ – электрическая постоянная, $R_b \sim 0.15$ м радиус железного болида массой 100 кг, $N = 3.8 \times 10^{23}$ л/м³ – концентрация молекул воздуха на высоте 30 км (Атмосфера, стандартная, ..., 2004), $m_e = 0.9 \times 10^{-30}$ кг – масса электрона, $v \approx 3 \times 10^6$ м/с – скорость электрона в том предельном случае, когда налетающая молекула застряла в болиде и всю энергию передала электрону. При таких данных заряд болида $Q \approx 10^{-6}$ Кл. Разумеется, этот вариант заряжения болида не обеспечит нужного эффекта. Например, на поверхности Земли напряженность поля составит $\sim 10^{-5}$ В/м. Более того, на низких высотах, когда плотность атмосферы достаточна для образования ударной волны, весь набегающий на тело поток обтекает его. Ударная волна отходит от передней части тела,

где свободный пробег молекулы $\lambda \sim 4 \times 10^{-7}$ м, а на поверхности тела образуется пограничный слой, и в такой ситуации молекула воздуха не сможет подойти к поверхности болида и выбить электрон (Райзер, 2011).

Один из возможных вариантов заряжения болида основан на явлении термоэлектронной эмиссии или фотоэлектронной эмиссии. Для обтекающего метеороид потока число Маха намного больше единицы и температура за ударной волной достигает нескольких десятков тысяч градусов, т.е. температура поверхности железного метеорита близка к температуре плавления, и это вполне достаточно для интенсивной термоэмиссии или фотоэмиссии. Поскольку болид вследствие эмиссии электронов заряжается положительно, то наступит момент, когда электрон, не сможет покинуть его поверхность. Однако, вследствие полученной энергии от фотона или при столкновении с атомами, некоторая часть электронов с большей вероятностью будут находиться вблизи поверхности метеороида. Поэтому можно предположить, что обтекающий поток ионизованного газа увлекает за собой капельки расплавленного железа вместе с этими электронами. Ионы, окружающие плазму, могут рекомбинировать с этими каплями, однако избыток отрицательного заряда все равно будет иметь место в плазме и может быть снесен потоком. В этой связи, следует принять во внимание турбулентный характер обтекания поверхности в пограничном слое, и это в первую очередь означает, что вихревые возмущения вблизи поверхности будут увлекать заряженные частички (капельки) жидкого металла и при определенных условиях могут быть снесены набегающим потоком вследствие отрыва пограничного слоя (Райзер, 2011; Ландау, Лифшиц, 1986). Существование этих капелек, уносящих электроны, согласуется с результатами экспедиций (Дмитриев, 2005; Фесенков, 1951), которые обнаружили в снегу огромное число железных шариков микроскопического размера (10–100 мкм).

Наиболее эффективные механизмы эмиссии электронов из железного метеорита при высокой температуре и плотности плазмы это термоэлектронная и фотоэлектронная эмиссии. Анализируя два этих механизма, нужно оценить эффективность, т.е. найти величину заряда, приобретаемого метеороидом за единицу времени. Эта оценка важна для выбора модели электрического заряжения. Известно,

что ток насыщения с единицы поверхности нагретого металла, при температуре T , определяется формулой Ричардсона–Дэшмана (Херинг, Никольс, 1950)

$$I_T = AT^2 e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (1)$$

где $A = 120 \text{ А/}(\text{см}^2 \text{ град}^2)$ – постоянный множитель, k – постоянная Больцмана, а W – работа выхода электрона, характерная для данного металла. Подстановка в выражение (1) величин $W = 4.5 \text{ эВ}$, $T = 1800 \text{ К}$ дает ток с единицы поверхности метеороида, равный 1.5 А/м^2 , если даже не учитывать коэффициент отражения от границы металл-вакуум. Это значит, что каждую секунду заряд метеороида увеличивается на 0.1 Кл (с учетом радиуса болида 0.15 м). Фактически, ток будет существенно меньше, поскольку часть вылетевших электронов могут после ряда столкновений вновь возвратиться в металл под действием электростатических сил.

Эмиссия электронов с поверхности железного метеорита может быть вызвана и ультрафиолетовым излучением плазмы, нагретой до десятков тысяч градусов. При скорости болида 20 км/с число Маха $M \sim 60$, температура за ударной волной близка к 50000 К , газ полностью ионизован и плотность приблизительно в 10 раз выше окружающей атмосферы (Зельдович, Райзер, 1966). Однако не все фотоны из плазмы попадут на поверхность метеорита. Это связано с направлением движения фотонов, прозрачностью плазмы на различных частотах и неравномерностью распределения температуры в слое газа, прилежащем к поверхности метеорита, которая имеет температуру, равную приблизительно температуре точки плавления железа. Этот расчет осложняется еще тем, что в прилежащем слое газа возникнет градиент температуры, который, в свою очередь, будет зависеть от состояния газа, т.е. от степени диссоциации и ионизации. Проблема будет усложняться турбулентным течением и пограничным слоем при очень высоком градиенте температуры. Такая сложная задача не является целью настоящей работы, и для более грубой оценки величины фототока следует сделать разумные допущения, например, использовать выражение для средней величины росселандова пробега, в случае, когда газ полностью ионизован и тормозной механизм поглощения фотонов является преобладающим. В этом случае средний росселандов пробег l_R для концентрации плазмы за ударной волной

на высоте 30 км будет ($N \approx 3 \times 10^{23} \text{ 1/м}^3$; Атмосфера, стандартная, ..., 2004) равен (Зельдович, Райзер, 1996) $\lambda_R = 1.7 \text{ м}$. Весь набегающий на болид поток обтекает его, а ударная волна отходит от передней части тела на расстояние, которое по порядку величины меньше диаметра поперечного сечения в число раз, равное кратности сжатия газа в так называемой “пробке” (Райзер, 2011). В рассматриваемом случае $\rho_1/\rho_0 \approx 10$, т.е. плазма, будучи полностью ионизованной, практически прозрачна для фотонов.

Для массы метеорита 100 кг радиус равен $R_m \approx 0.15 \text{ м}$, толщина d “пробки”, т.е. расстояние между границей ударной волны (УВ) и обтекаемым телом $d = 2R/(\rho_1/\rho_0) = 0.03 \text{ м}$, а ее площадь равна приблизительно $S_c \approx \pi(R_b)^2 \approx 1.5 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ (Райзер, 2011). При температуре за УВ порядка 50000 К воздух полностью ионизован (Райзер, 2011; Капцов, 1947) и лучеиспускательная способность плазмы связана в основном со свободно-свободными переходами. Дифференциальная лучеиспускательная способность для тормозного излучения определяется выражением (Зельдович, Райзер, 1996)

$$J(\nu) = \frac{32\pi}{3} \left(\frac{2\pi}{3kTm} \right)^{0.5} \frac{Z^2 e^6}{mc^3} N_+ N_- e^{-\frac{h\nu}{kT}} \left(\frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \text{ с}} \right), \quad (2)$$

где m – масса электрона, ν – частота, Z – степень ионизации, h – постоянная Планка, e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме, N_{\pm} – концентрация зарядов. Для энергии $h\nu_1 \pm 5 \text{ эВ}$ (работа выхода электрона для железа $\sim 4.5 \text{ эВ}$) количество фотонов N_p , излученных слоем плазмы с полным объемом $V_c \approx \pi(R_m)^2 d = 4.5 \times 10^4 \text{ см}^3$ и падающих на поверхность болида, согласно (2), равно

$$N_p \approx \frac{1}{6} V_c \int_{\nu_1}^{10\nu_1} \frac{J(\nu)}{h\nu} d\nu \approx 10^{31} \text{ с}^{-1}. \quad (3)$$

Согласно феноменологической теории Фаулера (Добрецов, Гомоюнова, 1966; Соболева, Меламид, 1974; Коваль и др., 2009; Фридрихов, Мовнин, 1982) величина фототока насыщения I пропорциональна интенсивности излучения $I \sim YJ/h\nu$, где Y – квантовый выход. Для чистых поверхностей и чистых металлов, у которых работа выхода $4.5\text{--}5 \text{ эВ}$, квантовый выход имеет порядок $10^{-5}\text{--}10^{-4}$. Материал метеорита не является чистым железом, а примеси могут повышать или понижать работу выхода из металла. Если предположить, что в самом неблагоприятном случае квантовый выход окажется порядка

$Y = 10^{-8}$, то даже в этом случае максимальный фототок с поверхности метеорита составит $I \approx 10^4$ А. Другими словами, согласно сделанным допущениям и оценкам (3), за секунду полета метеорит приобрел бы заряд ~ 10000 Кл, если бы скорость заряжения определялась только фотоэлектронной эмиссией. Это на порядки эффективнее, чем термоэлектронная эмиссия.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ЗАРЯДА ЖЕЛЕЗНОГО МЕТЕОРИТА

Очень важным обстоятельством в модели заряжения метеорита является величина предельного механического напряжения материала, ответственная за разрушение метеорита при движении в нижних слоях атмосферы. Если принять, что метеорит имеет сферическую форму радиуса R и заряжен до некоторой величины Q , то две его половинки испытывают взаимное отталкивание с силой $F \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{4R^2}$. Сила, необходимая для того, чтобы разорвать этот железный шар пополам, равна $F = \pi R^2 \sigma$, где $\sigma = 1.3 \times 10^9$ Па – предел прочности железа на разрыв. Откуда получаем предельную величину заряда

$$Q_m = 4\pi R R_b^2 \sqrt{\epsilon_0 \sigma}. \quad (4)$$

Например, для рассматриваемого здесь типичного электрофонического болида с радиусом $R_b = 0.15$ м, получим $Q_m \approx 0.03$ Кл.

В настоящее время доминирующая гипотеза разрушения метеорита связана с возникновением большого градиента давления при движении на участке пути с максимальным ускорением и плотностью атмосферы (Тирский, Ханукаева, 2008; Егорова, Лохин, 2016; Попов, Немчинов, 2005). Ускорение, с которым метеорит движется в атмосфере, определяется силой сопротивления набегающему потоку воздуха и давление соответственно равно

$$p_i = \frac{M \dot{v}}{\pi R_m^2} \approx \gamma \rho_a v^2, \quad (5)$$

где коэффициент $\gamma \approx 0.3$, M – масса болида, ρ_a – плотность воздуха, v – скорость болида (Попов, Немчинов, 2005). Давление в различных слоях (перпендикулярных к ускорению) инерционных сил в этом теле будет наибольшим в области набегающего потока (5) и равно

нулю на его обратной стороне. В результате такого большого градиента давления тело, согласно этой гипотезе, будет разрушаться, начиная со стороны, обращенной к набегающему потоку. Поскольку величина предельного напряжения, вызванная инерционными силами p_i (5) почти на три порядка меньше табличных значений для железа, а с другой стороны, кулоновское давление при определенном заряде может быть больше предельной прочности, то это вызывает сомнения в причине точечного взрывоподобного разрушения железных метеоритов инерционными силами. Вероятнее всего, инерционные силы, максимум которых находится на границе метеорита и набегающего потока, и высокая температура, разрушают метеорит не взрывоподобно, а за некоторое конечное время. Можно предположить, что для железного метеорита такая гипотеза взрывоподобного механизма играет не всегда первостепенную роль и для железных метеоритов следует иметь в виду и другую, связанную с кулоновскими силами. Это не новая точка зрения на процесс разрушения. Похожая гипотеза была высказана и ранее (Соляник, 1980).

Заряд такой величины может оказаться недостаточен для того, чтобы имели место те метеороэлектрические эффекты, которые обсуждались выше. При достижении такого критического заряда, $Q_{cr} = 0.03$ Кл, метеорит начнет разрушаться. Но вероятнее, что это произойдет раньше, так как предельная прочность материала метеорита, возможно, меньше, чем предельная прочность железа.

В плотной атмосфере фрагменты метеорита достаточно быстро вновь получают критический заряд согласно схеме, описанной выше, и тоже, в свою очередь, будут разрушаться. Тот факт, что фрагменты будут заряжаться до критического значения, следует из того, что оставшийся заряд на одной из половинок не удовлетворяет выражению (4). Для этого, предполагая сферическую форму фрагментов, запишем (4) в виде

$$Q_{cr} = 4\pi \left(\frac{3M}{4\pi\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{\epsilon_0 \sigma},$$

где M – масса метеорита. После деления на половинки заряд каждого фрагмента Q_f должен быть, согласно (4),

$$Q_f = Q_{cr} \times \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{2}{3}},$$

т.е. фрагмент до очередного развала должен дополнительно приобрести заряд.

Такое дробление будет продолжаться, пока осколки не достигнут поверхности земли или их скорость не упадет до значений, при которых ударная волна станет намного слабее и температура поверхности метеорита и окружающей его плазмы существенно упадет. Однако, учитывая быстрое заряджение фотоэлектронной эмиссией, суммарный заряд q_s фрагментов станет значительно больше, чем исходный заряд болида $Q_{ст} = 0.03$ Кл перед его разрушением (4). Напряженность электрического поля у поверхности земли при такой величине заряда составит величину

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 h^2} \approx 0.03 \frac{В}{м},$$

где $h = 30$ км – расстояние до болида. Это очень маленькая напряженность электростатического поля для того, чтобы вызвать какие-либо заметные эффекты на поверхности земли. А если учесть, что вблизи положительного заряда болида находится точно такой же по величине, но отрицательный заряд (“хвост” болида), то напряженность будет существенно меньше.

Относительно недавно опубликованы несколько работ, в которых представлена новая гипотеза, связанная с плазменно-пылевыми процессами. Пылевой плазмой называют частично или полностью ионизованный газ, содержащий пылевые частицы, геометрические размеры которых порядка микрона (см., например, Цытович, 1997; Исимору, 1981). В частности, такие частицы присутствуют в хвосте метеороида при его движении в атмосфере Земли. В работах (Морозова, Попель, 2020; 2021; 2023) показано, что в результате зарядки пылевых частиц метеорного вещества создаются условия для возникновения пылевых звуковых волн. Пылевые звуковые возмущения возбуждаются в результате развития модуляционной неустойчивости электромагнитных волн от метеорного следа и имеют частоты, характерные для пылевых звуковых волн (0.003–60 Гц). При этом предполагается, что звук доходит до поверхности Земли в результате передачи колебаний пылевых частиц нейтральным молекулам, и что концентрация пылевых частиц велика даже на поверхности Земли. Однако этим механизмом трудно объяснить регистрацию звука микрофоном, который был полностью звукоизолирован от внешней среды в экспедиции группы исследователей в Монголии (Zgrabić и др., 2002). Возможно, существуют какие-то неизвестные детали механизма, ответственного за электрофонные явления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенного выше следует, что электрические процессы действительно характерны для метеорных тел, однако совершенно ясно, что они не являются главной причиной передачи звука со скоростью света. В любых приведенных выше моделях электромагнитного излучения болидов с яркостью приблизительно -12^m и более напряженность поля на уровне земли слишком мала, чтобы осуществились какие-либо известные преобразования электромагнитного поля в звук. Более того, нам хорошо известно, что, находясь вблизи источников электромагнитного поля с высокой напряженностью (десятки В/м и более), мы никаких звуковых эффектов не ощущаем. Например, промышленные высоковольтные линии с линейным напряжением сотни тысяч вольт никаких звуковых эффектов не производят для человека, находящегося даже в непосредственной близости под проводами. В эпоху, когда не было телевидения и широкоэвещательные радиоприемники были в крайне ограниченном количестве, информация доводилась с помощью обыкновенных громкоговорителей и к многоквартирным домам проводились высоковольтные (~ 1 кВ) линии электропередач радиотрансляции на звуковой частоте. Находясь в непосредственной близости от таких линий, никто никогда (например, монтеры) не слышал звукового сопровождения. Вот еще один хорошо известный нам пример, никто и никогда не воспринимал звуки разряда молнии одновременно с ее световым излучением. Даже мобильный телефон на расстоянии 20 см создает поле с напряженностью ~ 20 В/м, однако мы это не воспринимаем. Таких примеров можно привести достаточно много, чтобы показать отсутствие звукового восприятия даже при полях не менее 100 В/м.

Однако электрофонический эффект при полете некоторых болидов наблюдали многие, что следует из упомянутых выше каталогов. Все это подсказывает, что существует еще какая-то, неизвестная нам возможность передачи звука одновременно со свечением болида. Не исключено, что тщательное исследование такого явления даст нам что-то новое для физики и ее приложений.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (Луганский национальный университет им. Владимира Даля). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфиногенов Д.Ф., Фаст В.Г. Яркий болид на юге Сибири // Земля и Вселенная. 1985. № 3. С. 72–75.
2. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Физ-мат. лит., 1958. 640 с.
3. Атмосфера стандартная, параметры. М.: Изд-во стандартов, 2004. 180 с.
4. Бронштэн В.А., Гребенников В.С., Рабунский Д.Д. Каталог электрофонных болидов. Актуальные вопросы метеоритики в Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. С. 158–204.
5. Бронштэн В.А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов // Астрон. вестн. 1983. Т. 17. С. 94–98. (Bronshnten V.A. A magnetohydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs // Sol. Syst. Res. 1983.V. 17. P. 70–74.)
6. Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
7. Гребенников В.С. Электрофонные болиды Сибири, Урала и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1984. С. 191–203.
8. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. (ред.). Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
9. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.
10. Дмитриев Е.В. Международный симпозиум “Астрономия – 2005”: Состояние и перспективы развития”, М.: ГАИШ МГУ – МГДДЮТ, 1–6 июня, 2005 г. Тез. докл. С. 85.
11. Докучаев В.П. Электрический разряд при пролете метеоров в атмосфере Земли // ДАН СССР. 1960. Т. 131. № 1. С. 78–81.
12. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
13. Егорова Л.А., Лохин В.В. О двустадийном разрушении метеороида с концевой вспышкой // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. 2016. № 4. С. 43–48.
14. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1996. 688 с.
15. Иванов В.В., Медведев Ю.А. Об электрическом эффекте крупных метеорных тел // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5. № 2. С. 284–288.
16. Исимору А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Изд-во “Мир”, 1981. Т. 2. 322 с.
17. Калашников А.Г. О наблюдении магнитного эффекта метеоров индукционным методом // ДАН СССР. 1949. Т. 66. № 3. С. 373–376.
18. Калашников А.Г. Магнитный эффект метеоров // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. 1952. № 6. С. 7–20.
19. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и в вакууме. М.–Л.: Гостехиздат, 1947. 836 с.
20. Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Эмиссионная электроника / Ред. Протасов Ю.С. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 596 с.
21. Кринов Е.Л. Железный дождь. М.: Наука, 1981. 192 с.
22. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т. 6. 736 с.
23. Морозова Т.И., Попель С.И. К вопросу о плазменно-пылевых процессах, сопровождающих метеорные потоки // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 11. С. 993–1006.
24. Морозова Т.И., Попель С.И. Модуляционное взаимодействие в пылевой плазме хвостов метеороидов // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 6. С. 794–802.
25. Морозова Т.И., Попель С.И. Проявления модуляционной неустойчивости в ионосфере Земли, включая хвосты метеороидов // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 1 С. 42–47.
26. Невский А.П. Явление положительного стабилизированного электрического разряда и эффект электроразрядного взрыва крупных метеоритных тел при пролете в атмосфере планет // Астрон. вестн. 1978. Т. 12. № 4. С. 206–215.
27. Попов О.П., Немчинов И.В. Метеорные явления (болиды) в атмосфере Земли. Катастрофические воздействия космических тел. М.: ИКЦ Академкнига, 2005. С. 92–117.
28. Райзер Ю.П. Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков. Долгопрудный: Издательский Дом “Интеллект”, 2011. 432 с.
29. Райзер Ю.П. О дискуссии по поводу приобретения электрического потенциала метеоритным телом // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 4. С. 364–366. (Raizer Y.L. A debate over the acquisition of an electric potential by a meteoroid // Sol. Syst. Res. 2003. V. 37. P. 333–335.)
30. Сапожков М.А. (ред.). Акустика. Справочник. М.: Радио и связь, 1989. 336 с.
31. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.
32. Соляник В.Ф. Тунгусская катастрофа в свете электрической теории метеорных явлений // Взаимодействие метеорного вещества с Землей. Новосибирск: Наука, 1980. С. 178–188.

33. *Соболева Н.А., Меламид А.Е.* Фотоэлектронные приборы. М.: “Высшая школа”, 1974. 376 с.
34. *Турский Г.А., Ханукаева Д.Ю.* Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере // Космич. исслед. 2008. Т. 46. № 2. С. 122–134.
35. *Фесенков В.Г.* Сихотэ-Алинский метеорит и его значение для проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы // УФН. 1951. Т. 44. № 1. С. 89–103.
36. *Филоненко А.Д.* Радиоизлучение метеорных тел в диапазоне декаметровых волн // Геомагнетизм и Аэрономия. 2018. Т. 58. № 5. С. 720–727.
37. *Фридрихов С.А., Мовнин С.М.* Физические основы электронной техники. М.: Наука, 1982. 608 с.
38. *Херинг К., Никольс М.* Термоэлектронная эмиссия. М.: ИЛ, 1950. 196 с.
39. *Цытович В.Н.* Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. № 1. С. 57–99.
40. *Barringer B., Hart H.C.* The mechanism of the sounds from meteors // Popular Astron. 1949. Т. 57. С. 507–512.
41. *Beech M., Brown P., Jones J.* VLF detection of fireballs // Earth, Moon, and Planets. 1995. V. 68. P. 181–188.
42. *Beech M., Foschini L.A.* A space charge model for electrophonic bursters // Astron. and Astrophys. 1999. V. 345. P. L27–L31.
43. *Beech M., Foschini L.* Leonid electrophonic bursters // Astron. and Astrophys. 2001. V. 367. P. 1056–1060.
44. *Bronshten V.A.* Electrical and electromagnetic phenomena associated with the meteor flight // Sol. Syst. Res. 1991. V. 25. P. 93–104.
45. *Drobnock G.J.* Radio waves from meteor? // Sky and Telescope. 1992. P. 329–330.
46. *Garaj S., Vinkovic D., Zgrablic G., Kovacic D., Gradecak S., Biliskov N., Grbac N., Andreic Z.* Observational detection of meteor-produced VLF electromagnetic radiation // Fizika A (Zagreb). 1999. V. 8. № 3. P. 91–98.
47. *Guha A., DeKumar B., Choudhury A., Roy R.* Investigation on spectral character of ELF electromagnetic radiations during Leonid 2009 meteor shower // Astrophys. and Space Sci. 2012. V. 341. № 2. P. 287–294.
48. *Hawkins G.S.* A search for magnetic effect from meteors // J. Geophys. Res. 1958a. V. 63. P. 467–475.
49. *Hawkins G.S.* Radio noise from meteors // Nature. 1958b. V. 181. P. 1610.
50. *Hawkins G.S.* A search for radio emission from meteors // Astrophys. J. 1958c. V. 128. P. 724–726.
51. *Henning P.A., Kavic M., Schinzel F.K., Simonetti J.H., Stoval K., Wilson T.L.* Detection of radio emission from fireballs // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 788. № 2. id. L. 26.
52. *Jenkins A.W., Philips C.A., Maple E.* Observed magnetic effects from meteors // J. Geophys. Res. 1960. V. 65. P. 1617–1619.
53. *Keay C.S.L.* Progress in explaining the mysterious sounds produced by very large meteor fireballs // J. Sci. Exploration. 1993. V. 7. № 4. P. 337–354.
54. *Keay C.S.L.* The 1978 New South Wales fireball // Nature. 1980a. V. 285. P. 464–466.
55. *Keay C.S.L.* Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs // Science. 1980b. V. 210. P. 11–15.
56. *Keay C.S.L., Ostwald P.M.* A laboratory test of the production of electrophonic sounds // J. Acoust. Soc. Am. 1991. V. 89. P. 1823–1824.
57. *Keay C.S.L.* Continued progress in electrophonic fireball investigations // Earth, Moon and Planets. 1995. V. 68. P. 361–368.
58. *Obenberger K.S., Taylor G.B., Hartman J.M., Dowell J., Ellingson S.W., Helmboldt J.F.,*
59. *Henning P.A., Kavic M., Schinzel F.K., Simonetti J.H., Stovall K., Wilson T.L.* Detection of Radio Emission from Fireballs // ArXiv: 1405.6772, 2014.
60. *Obenberger K.S., Dowell J.D., Hancock P.J., Holmes J.M., Pedersen T.R., Schinzel F.K., Taylor G.B.* Rates, Flux Densities, and Spectral Indices of Meteor Radio Afterglows // ArXiv: 1607.03002. 2016a.
61. *Obenberger K.S., Holmes J.M., Dowell J.D., Schinzel F.K., Stovall K., Sutton E.K.,*
62. *Taylor G.B.* Altitudinal dependence of meteor radio afterglows measured via optical counterparts // ArXiv: 1609.04701. 2016b.
63. *Ol'khovarov A.Yu.* About Mistakes in A.P. Nevskii's Paper // Tunguss. Vestn. 1997. № 6. P. 30.
64. *Ol'khovarov A.Yu.* Comments // Tunguss. Vestn. 1998. № 9. P. 35.
65. *Price C., Blum M.* ELF/VLF radiation produced by the 1999 Leonid meteors // Earth, Moon, and Planets. 2000. V. 82–83. P. 545–554.
66. *Sommer H.C., Gierke H.E.* Hearing sensations in electric fields // Aerosp. Med. 1964. V. 35. P. 834–839.
67. *Spalding R., Tencer J., Sweatt W., Conley B.* Photoacoustic sounds from meteors // Sci. Rep. 2017. V. 7. id. 41251.
68. *Spurny P., Betlem H., van't Leven J., Jenniskens P.* Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic

- Leonid meteors from the ground-based expedition to China // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2000. V. 35. P. 243–249.
69. *Spurny P.* Instrumentally documented meteorite falls: Two recent cases and statistics from all falls // *Proc. Int. Astron. Union.* 2015. V. 10. P. 69–79.
70. *Sung C.Y., Brown P., Marshall R.* A two-year survey for VLF emission from fireballs // *Planet. and Space Sci.* 2020. V. 184. id. 104872.
71. *Verveer A., Bland P.A., Bevan A.W.R.* Electrophonic sounds from the reentry of the MOLNIYA 1-67 satellite over Australia: Confirmation on the electromagnetic link // *Meteorit. and Planet.* 2000. V. 35. № 5. Suppl. id. 163.
72. *Zgrablić G., Vinković D., Gradečak S., Kovačić D., Biliškov N., Grbac N., Andreić Ž., Garaj S.* Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2002. V. 107. № A7. P. 1124.