

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**МЕТЕОРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ И ИОНОСФЕРНЫЕ
АНОМАЛИИ *)****А. Ловелл****ВВЕДЕНИЕ**

Когда метеор влетает в земную атмосферу, он создаёт ионизованный след на высоте около 100 км над поверхностью Земли. При подходящих условиях эти ионизованные облака обладают достаточно высоким коэффициентом отражения радиоволн для того, чтобы на чувствительном приёмнике мог быть получен кратковременный отражённый сигнал. Развитие радиолокационной техники за последние годы создало метод для изучения метеоров днём и ночью, метод, который обладает большей чувствительностью, чем человеческий глаз, и который уже начал давать нам новые данные о физике атмосферы на этих высотах. Имеются надёжные экспериментальные указания на то, что общее влияние метеорной ионизации является также одной из главных причин и более длительных аномалий в слое *E* ионосферы.

Настоящий обзор разделён на две главные части: первая часть посвящена истории изучения аномалий в слое *E* ионосферы и обсуждению современных взглядов на природу спорадического слоя *E*; во второй части рассматриваются современные исследования кратковременных отражений от метеорных следов и применения этих исследований к метеорной астрономии и к физике высоких слоёв атмосферы.

*) Reports on progress in physics (Phys. Soc.), Vol. XI (1946—1947), London, 1948, стр. 415—444. Несколько переработанный перевод.

Ввиду того, что в статье А. Ловелла имеется много лишних ссылок, часто на статьи одного и того же автора, которые содержат одинаковые результаты и опубликованы лишь в разных журналах, а также на такие статьи, которые содержат устаревшие и мало существенные данные, редакция сократила и тем самым сделала более удобным для пользования список цитируемой литературы и дополнила его ссылками на более поздние публикации. Редакция.

1. АНОМАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЛОЕ *E* И ИХ СВЯЗЬ С МЕТЕОРАМИ

1. Общие сведения о структуре ионосферы

Основные черты строения ионосферы были выяснены путём изучения отражения радиоволн от верхних слоёв атмосферы, в основном импульсным методом. При этом было установлено существование двух главных ионизованных слоёв — слоя *E* на высоте 120 км и слоя *F* на высоте около 250 км. Об этих слоях ионосферы получено много сведений и опубликованы обширные обзоры на эту тему^{1, 2, 3, 4, 5}.

Для целей настоящего обзора достаточно указать, что при нормальных условиях электронная плотность в слое *E* обнаруживает отчётливую связь с Солнцем, достигая максимума в полдень и минимума (благодаря рекомбинации и прилипанию) в течение ночи. Например, в Англии в полдень летнего дня плотность в слое *E* составляет около $1,1 \cdot 10^5$ электронов в 1 см^3 , снижаясь к полуночи приблизительно до $7,9 \cdot 10^3$ электронов/см³. Эквивалентные критические частоты радиоволн составляют 3 Мгц и 0,8 Мгц соответственно. Волны более высоких частот проникают сквозь слой *E*, не отражаясь. Средняя электронная плотность в слое *F* составляет около $6 \cdot 10^5$ электронов/см³, соответствуя критической частоте в 7,0 Мгц.

2. Открытие аномальных эффектов в слое *E*

Указание на то, что ионизация в слое *E* не убывает плавно в течение ночи, было получено в 1928 г. Хейзингом⁶. Им была использована импульсная аппаратура на частотах 2,7 и 5,2 Мгц для изучения высоты ионизованных слоёв. После захода Солнца были замечены резкие уменьшения высоты слоя *E*, соответствовавшие резким увеличениям электронной плотности в этом слое. Эти результаты иллюстрируются рис. 1, который показывает, что нормальная тенденция уменьшения ионизации в слое *E* в течение ночи сопровождается отдельными резкими её усилениями.

Автор пишет: «Создаётся впечатление, как будто большое количество электронов вводится довольно быстро в атмосферу, в результате чего слой опускается, причём это опускание сопровождается турбуленцией и колебаниями плотности около его нижней границы». При этом он пришёл к выводу, что условия ионизации после захода Солнца непостоянны и не меняются регулярным образом; он полагал, что причиной неравномерностей могут быть частицы, исходящие от Солнца.

Дальнейшие указания на аномалии были получены Эккерслеем⁷. Изучалось распространение радиоволн в интервале частот от 6 до 20 Мгц. Было обнаружено, что в условиях, когда наблюдался переход отражений от слоя *E* к слою *F*, сигналы часто отра-

жались в промежуточной зоне. Автор приписал этот эффект присутствию плотных ионных облаков ниже 125 км, но не обсуждал их природы.

Другие авторы, изучавшие аномальные ночные эффекты, пришли к заключению, что «или нечто препятствует рекомбинации ионов, или существует какой-то ионизирующий агент, который может действовать на тёмной стороне Земли»⁸ и что быстрое изменение ионизации в течение ночи от одного момента к другому указывает на присутствие какого-то ионизирующего агента несолнечного происхождения⁹.

3. Первоначальные взгляды на метеоры как на причину аномальных эффектов в слое E

Предположение о том, что метеоры могут создавать достаточные возмущения в слое E для того, чтобы влиять на распространение радиоволн, было впервые высказано Нагаока¹⁰, который считал, что метеор будет «выметать» электроны на своём пути и хотя сам он будет ионизовать воздух, число создаваемых им электронов будет мало по сравнению с их числом, присутствовавшим до прохождения метеора. Таким образом, на пути метеора окажется меньше электронов, чем в окружающем воздухе, и это создаст резкие изменения показателя преломления для падающей радиоволны.

Предположение о том, что сама ионизация, вызванная метеорами, может влиять на условия в слое E, было высказано в 1931 г. Скеллетом^{11*}) причём было указано, что результаты, полученные ранее⁶, могут быть объяснены таким образом. Его теоретические оценки величины ионизации, создаваемой метеорами, основывались на теории Мэриса¹², и в настоящее время считается¹³, что они ошибочны даже по порядку величины. Тем не менее экспериментальные

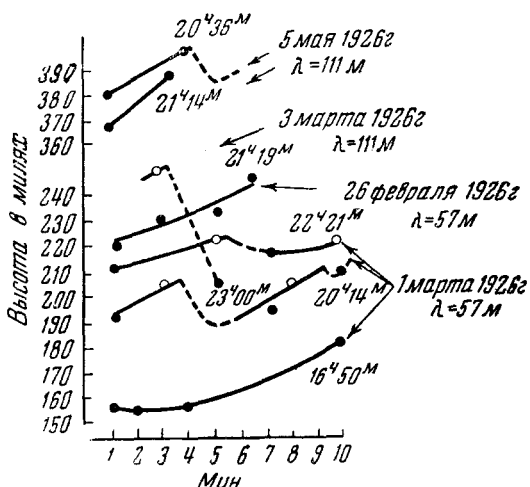


Рис. 1. Изменение высоты слоя E (кружки — измерения, при которых наблюдались многократные отражения).

*) Впервые это предположение было высказано Н. А. Ивановым^{11а}, который привёл многочисленные доводы, основанные на рассмотрении условий распространения радиоволн в течение ночи. Редакция.

исследования, выполненные во время потока Леонид 1931 г.^{11, 9}, дали убедительные указания на то, что метеорная ионизация ответственна за некоторые из ночных аномалий в слое *E*.

В этих исследованиях был использован импульсный метод на частотах между 1,6 и 6,4 МГц, причём частоты быстро чередовались. Во время потока Леонид 1931 г. в слое *E* были обнаружены сильно возмущённые условия с резкими аномальными увеличениями ионизации, достигшими максимума в ночь 16—17 ноября, которая,

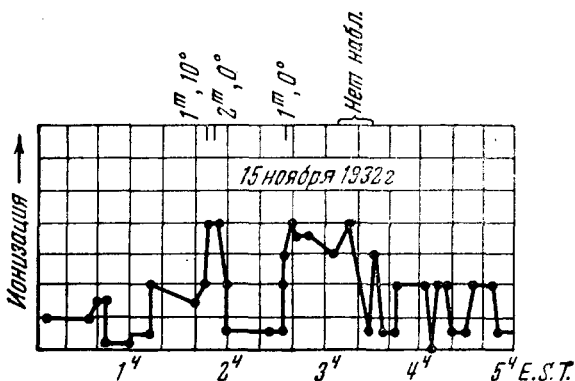


Рис. 2. Кратковременные возрастания ионизации слоя *E*, связанные с пролётом метеоров над головой.

как известно из визуальных наблюдений, соответствует максимуму потока. К сожалению, в эти ночи имелись магнитные возмущения, и поэтому нельзя было окончательно установить, что эффекты были вызваны метеорной ионизацией. Однако во время потока Леонид 1932 г. были получены удачные визуальные корреляции между метеорами, пролетавшими над головой, и резкими кратковременными возрастаниями ионизации в слое *E*¹¹. На рис. 2 показаны эти резкие возрастания ионизации вместе с данными о пролетавших метеорах. В ночи, когда не было активных метеорных потоков, эти резкие возрастания ионизации оказались очень редкими — аналогичный график для ночи 19—20 февраля 1929 г. показывает только одно подобное увеличение.

Из этих исследований были сделаны следующие заключения: а) ночные увеличения ионизации в слое *E* наиболее резко выражены во время метеорных потоков; б) во всех случаях наиболее резкого возрастания ионизации наблюдались метеоры, пролетавшие над головой; в) перемежающиеся отражения длительностью лишь в несколько секунд редки, за исключением времени метеорных потоков; г) наблюдения критической частоты показали, что во время максимума Леонид ионизация в слое *E* достигает 10^6 электронов/см³, т. е. больше, чем в летний полдень.

В Японии¹⁴ тоже исследовали влияние потока Леонид 1932 г. и обнаружили значительное увеличение числа кратковременных эхо в течение потока, но, повидимому, не связали отдельные эхо с метеорами.

как известно из визуальных наблюдений, соответствует максимуму потока. К сожалению, в эти ночи имелись магнитные возмущения, и поэтому нельзя было окончательно установить, что эффекты были вызваны метеорной ионизацией. Однако во время потока Леонид 1932 г. были получены удачные визуальные корреляции между метеорами, пролетавшими над головой, и резкими кратковременными возрастаниями ионизации в слое *E*¹¹. На рис. 2 показаны эти резкие возрастания ионизации вместе с данными о пролетавших метеорах. В ночи, когда не было активных метеорных потоков, эти резкие возрастания ионизации оказались очень редкими — аналогичный график для ночи 19—20 февраля 1929 г. показывает только одно подобное увеличение.

Ещё до этих исследований были специально рассмотрены возмущения на дальних линиях коротковолновой связи с целью установить наличие корреляции с метеорными потоками^{15, 16}. Некоторая корреляция была найдена, но ввиду высокой чувствительности подобных линий связи к магнитным возмущениям анализ не дал надёжных результатов.

4. Длительные аномалии (спорадический слой *E*)

Описанные выше работы показали, что вторжение метеора в земную атмосферу может создать кратковременное эхо из окрестностей слоя *E*. Однако эти работы не указали, какую роль играет метеорная ионизация в длительных аномальных возрастаниях ионизации, и из экспериментальных данных не удалось сделать каких-либо выводов в этом отношении, кроме общего заключения о том, что ночные возрастания ионизации в слое *E* резче всего проявляются во время метеорных потоков.

В течение нескольких лет после открытия длительных аномалий было высказано множество гипотез об их причине, и удобнее всего рассмотреть различные предположения отдельно.

А. Грозы и барометрические эффекты. Дневные наблюдения аномальных возрастаний ионизации в слое *E*, между маем 1931 г. и июнем 1932 г., привели к предположению¹⁷, что они сопровождаются своеобразными изобарическими ситуациями, характеризующимися присутствием областей низкого давления в месте наблюдения или к северу от него. Ещё за несколько лет до этого было высказано предположение, что грозы могут вызвать ионизацию верхних слоёв атмосферы. Наблюдения Эппльтона и Найсмита (январь — июль 1932 г.), показали¹⁸, что коэффициент корреляции между плотностью ионизации и «грозовым индексом», основанным на наблюдениях атмосфериков, равен примерно 0,75.

Грозовая гипотеза получила дальнейшую поддержку в последующих работах, из которых следовало, что ночные увеличения ионизации происходят на постоянной высоте 105 км (см.¹⁹), а также, что дневные спорадические эхо, длящиеся час или два, происходят на той же самой высоте. Из анализа данных следовало, что 74% грозовых дней показывают ночные аномалии в слое *E*, в то время как из дней без гроз этот эффект происходит только в 46% дней.

Все эти работы показали, что агент, ответственный за аномальные возрастания ионизации, влияет только на слой *E* и не влияет на слой *F*.

Заключение, которое в дальнейшем высказывалось в литературе, что грозы ответственны за поддержание ионизации в более низких отражающих слоях атмосферы, оказалось несостоятельным, так как существование этих более низких слоёв в дальнейшем не подтвердилось.

Измерения, сделанные в Калькутте, показали резкую корреляцию аномального слоя E с грозами. В Австралии нашли корреляцию между наличием ночных аномалий в слое E и барометрическим давлением у поверхности Земли, наблюдавшимся на следующее утро.

Однако в дальнейшем (в 1937—1938 гг.) ряд авторов установил отсутствие корреляции между аномальным слоем E и грозами и пришёл к заключению, что доводы в пользу связи аномального слоя E с грозами недостаточны, а также, что барометрический эффект, найденный в Австралии, не существует в Англии.

С этого времени мысль о том, что грозы и барометрические эффекты играют заметную роль в аномальных возрастаниях ионизации в слое E , была оставлена. Вследствие неточности в установлении грозового индекса и площади, на которой штормы могли считаться эффективными, подобные связи было очень трудно изучать, и потребовалось накопление статистических данных, охватывающих период в несколько лет, для того, чтобы можно было установить ошибочность исходной идеи.

Б. Магнитные бури и полярные сияния. В 1929 г. были проведены наблюдения во время магнитной бури и установлено заметное изменение высоты слоя E и характера эхо²⁰. Возможность связи между аномальной ионизацией в слое E и магнитной активностью изучалась Эппльтоном и Нейсмитом в 1932 г.⁸. В 1933 г. те же авторы нашли частую, но не неизменную связь между этими явлениями, но всегда во время магнитных бурь наблюдалось возрастание ионизации слоя E .

В экспедиции во время Международного полярного года (1932 г.) эта связь была детально исследована²¹. Хотя выявилась отчётливая связь между магнитной активностью и аномальной ионизацией слоя E , характер связи оказался сложным. Общая идея состояла в том, что вторжение заряженных солнечных частиц в верхние слои атмосферы должно создавать возрастание ионизации и, поэтому, надо было ожидать, что аномальная ионизация будет наблюдаться в то же самое время, что и магнитные бури и полярные сияния.

Однако в некоторых случаях, когда магнитная активность была исключительно велика, эхо от слоя E исчезало. Для объяснения этого факта было предположено, что когда солнечные частицы оказываются особо многочисленными и проникающими, они ионизируют также более низкие слои атмосферы и создают, таким образом, поглощающую завесу.

На рис. 3 показан график, который в удивительно ясной форме показывает связь между аномальным возрастанием ионизации и небольшим магнитным возмущением.

Результаты экспедиции полярного года показали отчётливую связь между магнитными возмущениями и аномальной ионизацией слоя E , но сложность явления была такова, что многие позднейшие исследователи не согласились с этими результатами. Неко-

торые из них получили данные, подтверждающие результаты полярного года, тогда как другие не обнаружили корреляции. Были найдены аномалии и в магнитно-возмущённые и в спокойные дни, а также установлено, что аномальный слой *E* связан с резкими магнитными нарушениями и полярными сияниями.

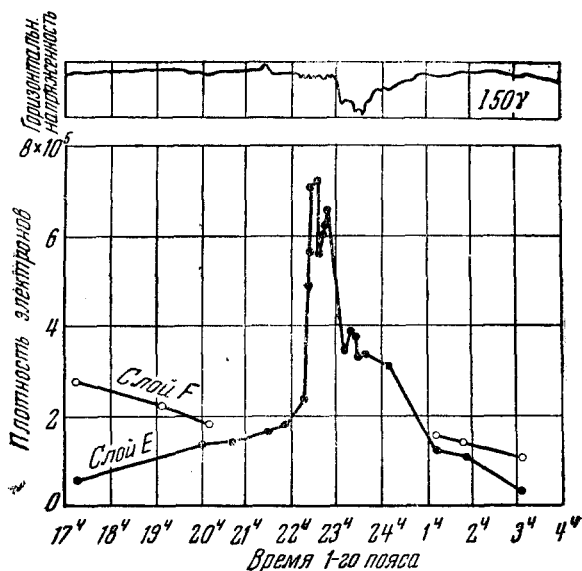


Рис. 3. Изменение в аномальном слое *E* в Тромсе во время небольшого магнитного возмущения 22—23 марта 1935 г.

Радиофединги при коротковолновой связи, как теперь известно, предшествуют подобным аномалиям, но всё же связаны с ними. В 1935 г. было привлечено внимание к частому повторению этого явления, но общая связь возмущённых условий распространения радиоволн с солнечными и магнитными возмущениями уже обсуждалась и ранее — ещё в 1927 г. Эти эффекты, повидимому, связаны с условиями исчезновения эхо, найденными во время полярного года, и вызваны солнечными частицами, ионизирующими слои, лежащие ниже слоя *E* и, таким образом, создающие поглощающий слой, исключающий возможность нормального отражения радиоволн от слоя *E*. Недавнее исследование²² показало связь между солнечными извержениями, радиоизлучением Солнца, магнитными бурями и подобными радиофедингами.

В. Метеоры. В течение ряда лет после работ Скеллета¹¹ и Шефера и Гудала⁹ попытки связать ионизацию в слое *E* с метеорами

делались только в Индии*). Во время Леонид 1933 г. измерялась электронная плотность в слое E^{24} . (рис. 4). В ночи 13 и 14 ноября электронная плотность достигала значений $3,3 \cdot 10^5$ и $2,2 \cdot 10^5$ электронов/см³ соответственно. Исследователи отмечают, что столь высокие ночные плотности являются исключительными и никогда не регистрировались ими при длительных наблюдениях во время полярного года¹ (1932 — 1933). Согласно регистрации близких

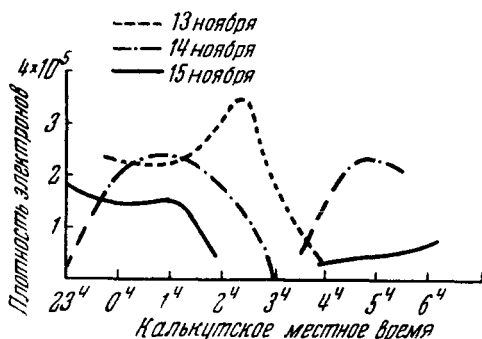


Рис. 4. Плотность электронов в слое E во время потока Леонид 1933 г.

обсерваторий эти дни были свободны от магнитных или солнечных возмущений.

Аналогичные измерения были проведены во время Леонид 1936 г.²⁵ Эти измерения также указали на ясную связь увеличения ночной ионизации с максимумом потока. Поиски эффектов в слое F дали отрицательный результат.

Во время звёздного дождя Драконид в 1946 г.

были получены регистрограммы, указывающие, что этот метеорный дождь вызвал появление отражающего слоя, который существовал в течение нескольких часов на частоте $3,5 \text{ Мгц}$ ²⁶.

Недавно были получены убедительные доводы в пользу того, что часть аномальной ионизации слоя E связана с метеорами. Численность кратковременных эхо на частоте 27 Мгц сравнивалась с появлением спорадического слоя E . Результаты измерений в течение интенсивного, но кратковременного метеорного дождя Драконид в октябре 1946 г. показаны на рис. 5, из которого видно, что корреляция между спорадическим слоем E и частотой возникновения метеорных эхо является очень тесной. Годичная вариация кратковременных эхо и спорадического слоя E показана на рис. 6. Соответствие тоже вполне удовлетворительное.

Г. Структура аномального слоя E . В разделе 2 уже было упомянуто, что Эккерслей⁷ пришёл к заключению, что кратковременное рассеяние, наблюдающееся при переходе отражений от слоя E к слою F , обусловлено ионными облаками ниже 125 км . Аналогичное предположение о том, что аномальная ионизация слоя E может являться результатом наличия облаков с повышенной электронной концентрацией, высказано и другими авто-

*) В СССР М. Н. Гневышев²³ установил влияние метеорного дождя Драконид 1933 г. на распространение радиоволн. Редакция.

рами²⁸, которые измеряли отражённые сигналы от слоя *E* на расстоянии до 200 км на волнах в диапазоне 200—500 м. Установлено присутствие рассеивающих центров с эффективным радиусом рассеяния около 200 км. Были указания в литературе, что аномальные эффекты распространяются на область поперечником около 100 км. Некоторые исследователи считали, что аномалии представляют собой случай частичного отражения на рез-

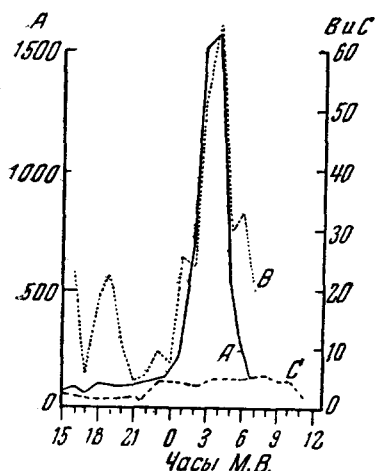


Рис. 5. Изменения численности «вспышек» ионизации (A) и спорадической ионизации слоя *E* (B) в ночь метеорного дождя Драконид (кривая C показывает численность «вспышек» ионизации в обычную ночь).

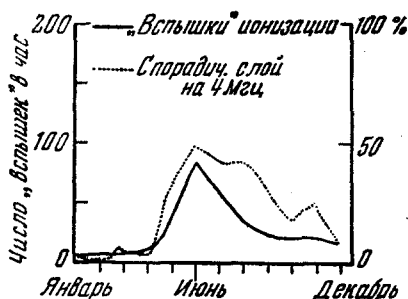


Рис. 6. Годичные вариации численности «вспышек» ионизации и частоты появления спорадического слоя *E* в дневное время (среднее за 1944—1946 гг.).

кой границе, но в дальнейшем ряд авторов детально рассмотрел этот вопрос и пришёл к заключению, что при аномальных условиях слой *E* содержит облака с плотностью электронов, превосходящей плотность в окружающих участках, и что аномальная ионизация не носит слоистого характера, а вызвана скоплением подобных облаков, погружённых в слой *E*, с максимумом ионизации на 7 км ниже максимума нормальной ионизации слоя *E*. Существование подобных рассеивающих облаков было независимо предположено на основе исследования кратковременных рассеивающих центров.

Д. Возможные причины аномалий в слое *E*. Экспериментальные данные указывают, что существуют две главные причины длительных аномалий в ионизации слоя *E*:

а) возрастания ионизации, связанные с магнитной активностью и вызванные солнечными корпускулами;

б) возрастания ионизации, вызванные метеорной ионизацией. Подобная ионизация при подходящих условиях может быть обна-

ружена как кратковременное эхо на частоте, близкой к критической. Накопление этих эффектов может дать длительную аномальную ионизацию.

Вследствие отклонения солнечных корпускул в земном магнитном поле первая причина, как можно ожидать, должна преобладать в высоких широтах. Поэтому можно легко объяснить различие в результатах, полученных различными исследователями, в частности ясную корреляцию с метеорной активностью, найденную индийскими исследователями, и отсутствие корреляции аномального слоя E с магнитной активностью, найденную многими исследователями, работавшими в низких широтах. Удаётся также объяснить изменения аномальной ионизации с широтой.

5. Кратковременные аномалии

В разделе 3 были описаны первые исследования кратковременных аномалий в слое E . Аномалии связывались с ионными облаками ниже 125 км, и было показано^{9, 11}, что они вызываются метеорной ионизацией. Однако это заключение вовсе не получило признания, и вплоть до 1940 г. не было получено никаких прямых указаний на связь кратковременных эхо с метеорами. В настоящем разделе мы рассматриваем сведения об этих кратковременных рассеивающих центрах, полученные в этот промежуточный период.

Кратковременные эхо наблюдались и во время экспедиции полярного года²¹, причём авторы ссылаются на метеорную ионизацию в качестве возможного их объяснения. В 1932 г. Эккерслей⁷ сделал попытку дать теорию рассеяния радиоволн ионными облаками в слое E (см. часть II). Однако в обсуждении природы рассеивающих центров он не пошёл дальше указания на то, что ионизация в слое E должна быть иррегулярной в пространстве и во времени. В 1937 г. он получил фотографическую регистрацию эхо от кратковременных облаков, используя импульсный передатчик на 9,1 Мгц, и нашёл, что кратковременные отражения длительностью порядка секунды наблюдаются почти непрерывно и днём и ночью. Среди других предположений автор упоминает, что эти эхо могут быть вызваны «маленькими метеорами». Эти результаты являются веской поддержкой предположения о метеорном происхождении ионизации²⁹.

Вычисления эквивалентной ночной плотности по регистрограммам всплесков ионизации на расстоянии между 80 и 100 км на частоте 6 Мгц показали³⁰ (1937 г.), что она должна быть в течение нескольких секунд порядка 10^{12} ионов/см³.

Первые детальные измерения кратковременных эхо были проведены в 1937 г.³¹ на частоте 8,8 Мгц. Полученное распределе-

ние высот приведено на рис. 7. Эти авторы считали, что эхо могут быть разделены на две группы, из которых одну составляют эхо длительностью от долей секунды до 1—2 секунд, а другую — эхо длительностью от нескольких секунд до нескольких минут. По амплитуде эхо можно было заключить, что рассеивающие центры являются облаками, содержащими 10^{16} электронов, концентрированных в области, линейные размеры которой малы по сравнению с длиной волны. Было высказано предположение, что эти результаты указывают на проникновение в атмосферу и днём и ночью какого-то агента, создающего вспышки ионизации очень значительной интенсивности.

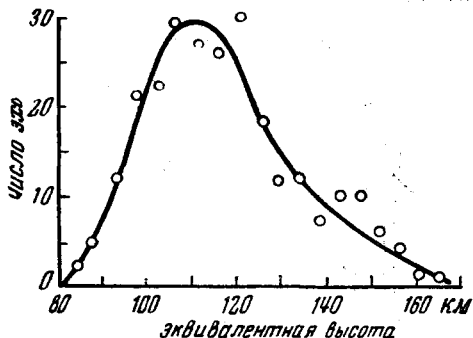


Рис. 7. Распределение высот кратковременных эхо (измерения 1937 г.).

В 1940 г. Эккерслеем проведено исследование эхо путём анализа рассеяния радиосигналов частотой от 7 до 18 $M\mu$, в условиях перехода отражения³⁷ (см. раздел 2). Результаты этого исследования в отношении распределения высот, суточной вариации и распределения продолжительностей приведены на рис. 8, 9 и 10. Распределение высот хорошо согласуется с распределением, приведенным на рис. 7.

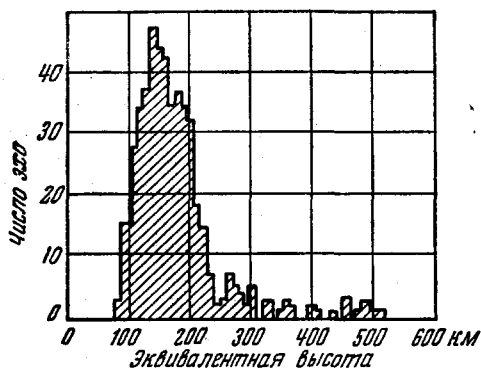


Рис. 8. Распределение высот кратковременных эхо (наблюдения на волне 39,5 м с августа по ноябрь 1936 г.).

переход между этими кратковременными эхо и длительными аномалиями в слое E.

Позднее Эккерслей и Фармер³² измеряли направление и поляризацию волн, отражённых от кратковременных облаков, с помощью двух антенн, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Обнаружены большие изменения фазы в течение долей секунды, что указывало на изменение направления источника вплоть до 15° за $\frac{1}{4}$ секунды. Авторы заключили, что эхо не могут быть вызваны единичными облаками, а создаются многочисленными центрами.

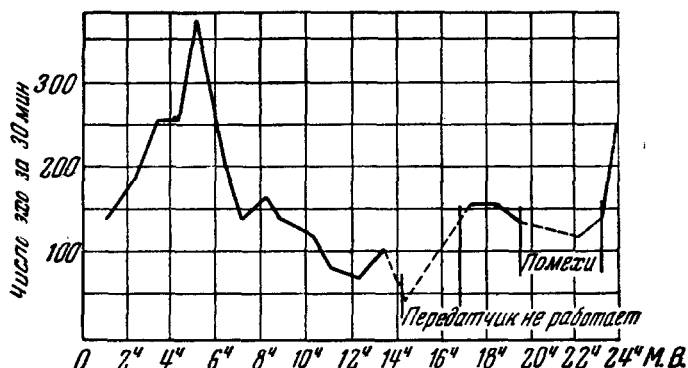


Рис. 9. Счёт числа эхо на волне 39,5 м при наблюдениях 15—16 октября 1938 г.

распределёнными в слое *E*, или же роем частиц, влетающих в атмосферу, и следовательно, что они не могут вызываться метеорной ионизацией. Однако более ранние работы, показавшие, что эхо вызваны метеорами, ныне получили полное подтверждение,

и в свете современных исследований (см. часть II) можно интерпретировать результаты Эккерслея и Фармера в терминах метеорной природы эхо.

В Норвегии³³ изучались кратковременные эхо на частоте 6—8 Мгц. Получено распределение высот, аналогичное изображённым на рис. 7 и 8; продол-



Рис. 10. Распределение длительностей эхо на волне 39,5 м (с августа по ноябрь 1936 г.).

жительность этих эхо колеблется в пределах от 0,5 до 2—3 секунд; не обнаружены эхо продолжительностью в $\frac{1}{10}$ секунды или меньше. В обсуждении природы кратковременных эхо автор не пошёл дальше утверждения о том, что они создаются облаками электронов.

Во время потока Леонид 1940 г. наблюдались кратковременные эхо на частоте 3 Мгц, в то время как метеоры пролетали над головой³⁴.

Описанные выше измерения кратковременных сигналов были сделаны либо непосредственно, используя импульсную технику, либо путём наблюдений рассеяния в условиях, когда частота была достаточной для проникновения сквозь нормальный слой *E* и отражения от слоя *F*. Существует третий тип явлений, который тоже может вызываться присутствием кратковременных плотных ионных облаков в слое *E*—распространение радиосигналов на большое

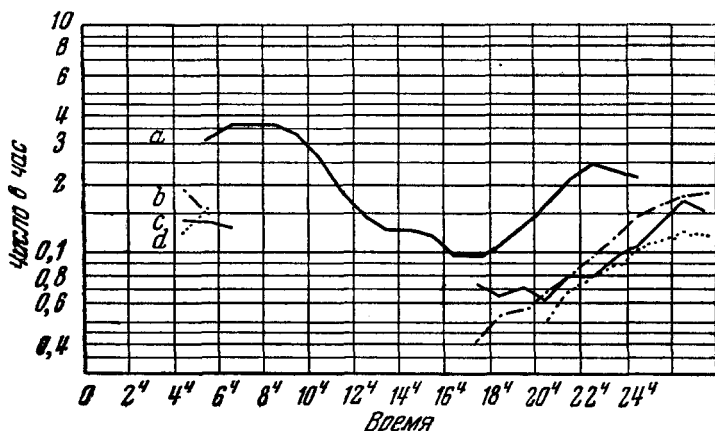


Рис. 11. Суточная вариация численности «вспышек» и метеоров. *a*—среднее число вспышек в час; февраль 1943—январь 1944 гг., *b*—число метеоров в час по наблюдениям Шмидта, *c*—то же по наблюдениям Кувье-Гравье, *d*—то же по наблюдениям Гофмейстера.

расстояние в случаях, когда частота такова, что пробиваются и слой *E* и слой *F*, и сигнал нормально не воспринимается дальше области распространения земного луча. Ещё в 1928—1929 гг. были сообщения об аномальных эффектах рассеяния, при которых высокочастотные радиосигналы принимались на удалённой станции после прохождения очень длинного пути. В 1931 г. были обнаружены отдельные сигналы на очень больших расстояниях на такой высокой частоте, как 40 *Мгц*. В 1933 г. наблюдались вспышки сигналов на расстоянии до 200 миль от передатчиков, работавших на частоте в интервале от 36 до 100 *Мгц*, причём отдельные максимумы были очень большой интенсивности. В 1938 г. явления этого типа подверглись рассмотрению и было указано³⁵, что вспышки могут обуславливаться метеорной ионизацией.

В 1942—1944 гг. эти вспышки были детально исследованы, используя передатчики на частотах от 42 до 84 *Мгц* и наблюдения на расстояниях от 100 до 340 миль³⁶. В течение августа и ноября 1944 г. в нескольких случаях были получены визуальные корреляции между вспышками и метеорами. Суточная вариация вспышек (рис. 11) показывает хорошее согласие с теоретическими

и экспериментальными данными по суточной вариации численности метеоров. Было установлено, что на частоте 71,75 *Мгц* вспышки происходят реже и являются более кратковременными, чем на частоте 44 *Мгц*.

6. Эхо с высот, превышающих высоту слоя *E*

Многие исследователи кратковременных эхо искали аналогичные эффекты, происходящие в слое *F*, но с отрицательным результатом, и Бхар²⁵ пришёл к заключению, что метеоры не оказывают измеримого влияния на ионизацию слоя *F*. Эхо с эффективными высотами, на много превосходящими высоту слоя *F*, объяснялись тем, что происходит прохождение сквозь слой *E*, затем отражение от слоя *F*, отражение вверх от слоя *E*, второе отражение от слоя *F* и затем проникновение сквозь слой *E* к Земле — эхо «типа *M*».

Эхо с высот от 600 до 1800 *км*, о которых были сообщения в 1934 г. тоже, повидимому, являются эхо «типа *M*» или же могут быть истолкованы как результат бокового рассеяния от кратковременных облаков в слое *E*. В 1940 г. наблюдались подобные же эффекты и были получены новые данные в пользу того, что эти эхо обусловлены рассеянием кратковременными облаками в слое *E*, причём рассеянный сигнал возвращается к Земле после отражения от слоя *F*²⁷. Повидимому, аномальная ионизация в слое *E* может дать удовлетворительное объяснение большинству наблюдений эхо с больших кажущихся высот. Некоторое время назад были якобы обнаружены быстро перемещающиеся ионосферные облака, движущиеся от высоты 800—900 *км* к слою *E*, а иногда и возвращающиеся обратно²⁸. Авторы приписали эти облака потокам солнечных корпускул, но в опубликованных ими данных нет ничего, что исключало бы этот эффект из категории рассмотренных выше.

Недавно²⁹, на частоте 46 *Мгц*, обнаружено эхо от светящегося облака полярного сияния с высоты 480 *км*, которое просуществовало в течение 30 минут.

II. СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ МЕТЕОРНЫХ ЭХО

Развитие за время войны радиопередатчиков и приёмников, работающих на частотах, значительно превышающих критические частоты слоев *E* и *F*, дало толчок к изучению кратковременных метеорных эхо. Исследование Хей и Стюарта⁴⁰, в котором были использованы частоты порядка 60 *Мгц*, показало, что вне всяких

сомнений по крайней мере часть этих кратковременных эхо на высоких частотах связана с метеорами, влетающими в земную атмосферу.

В течение последних двух лет достигнут значительный прогресс в применении этой техники к метеорной астрономии и физике высоких слоёв атмосферы.

7. Применение к метеорной астрономии

А. Метеорная активность. До сих пор получение сведений о метеорной активности зависело от темноты и ясности неба. Радиотехника снимает оба эти ограничения и позволяет проводить непрерывное изучение уровня метеорной активности.

В настоящее время известно, что число метеорных эхо, наблюдаемых с помощью радио, очень сильно зависит от длины волны.

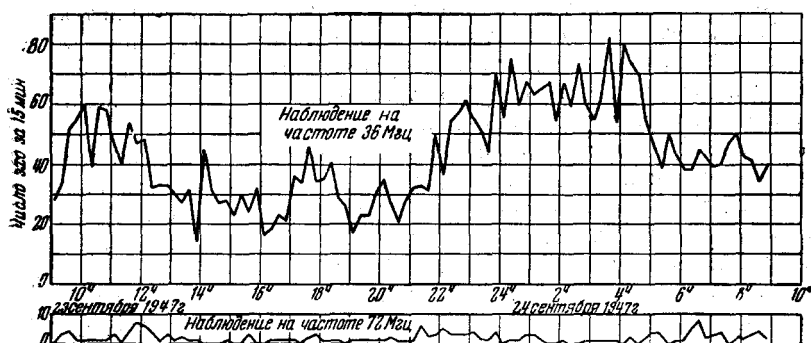


Рис. 12. Одновременные наблюдения численности кратковременных эхо на частотах 36 и 72 МГц.

При длине волны менее 6 м число эхо очень мало, за исключением периодов метеорных потоков, и существует тесная корреляция между этими эхо и визуально наблюдаемыми метеорами^{40, 41, 42, 44}, при длине волны 8 м и больше с аппаратурой эквивалентной чувствительности эти эхо «визуального типа» обычно тонут в исключительно многочисленном фоне, который обнаруживает заметную годичную и суточную вариации. Эти вариации детально изучались^{27, 37, 43}. Выяснилось, что численность эхо бывает максимальной между полночью и шестью часами и минимальной после полудня и что общий уровень активности осенью выше, чем весной. Эти вариации могут быть объяснены движением Земли сквозь распределённую в пространстве метеорную материю. Не существует тесной корреляции между видимыми метеорными потоками и этим обильным фоном, обнаруживающим суточную и годичную вариации.

Эти эффекты иллюстрируются рис. 12, который показывает численность кратковременных эхо, наблюдавшихся одновременно

на 4 и 8 м, аппаратурой с аналогичными антеннами в течение 24 часов — с 9 ч. 00 м. МВ 23 сентября до 9 ч. 00 м. МВ 24 сентября 1947 г. Эти наблюдения указывают на два важных факта:

а) имеются несомненные экспериментальные данные (см., например, ^{40, 44}) о том, что эхо, показанные на нижней кривой, связаны с метеорами того типа, которые встречаются в известных видимых метеорных потоках;

б) во время этих наблюдений все эхо, наблюдавшиеся на 4 м, наблюдались также и на 8 м, но в дополнение на 8 м наблюдался очень интенсивный фон с суточной вариацией. До сих пор нет прямых экспериментальных данных о том, что эти многочисленные эхо связаны с метеорами. Обычно принимается, что это так, во-первых, потому, что эти эхо неотличимы от эхо, создаваемых метеорами, для которых может быть получена визуальная корреляция, и, во-вторых, потому, что годичная и суточная вариации таковы, какими их следует ожидать на основании общего распределения метеорной материи, сквозь которую Земля должна проходить.

Истинная природа второго типа «метеорных» эхо подлежит дальнейшему исследованию. Если, как это представляется весьма вероятным ²⁷, оно связано с равномерно распределённой метеорной пылью, слишком мелкой для того, чтобы создавать видимые метеоры, то вопрос о том, связана ли эта пыль с солнечной системой или же приходит из межзвёздного пространства, представляет большой астрономический интерес.

Б. Изучение численности метеоров главных метеорных потоков. Кроме случаев исключительной численности метеоров в метеорных потоках, фон эхо, описанный выше, перекрывает влияние обычных метеорных потоков на радиоаппаратуре, работающей на длине волны 8 м и больше. В четырёхметровом диапазоне численность фона очень низкая и связана лишь с метеорами слабых радиантов и со случайными одиночными метеорами. Это позволяет детально изучать главные метеорные потоки.

Первые измерения главных метеорных потоков были проведены на длине волны 4—5 м ⁴⁰. Рис. 13 показывает среднее число эхо в час, полученное в течение первой половины 1946 г. Максимум в январе соответствует потоку Квадрантид, а максимум в апреле — Лиридам, причём оба максимума совпадают по времени с визуальными максимумами этих потоков.

Аналогичные кривые метеорной активности в течение лета 1946 г., включающие поток Персеид, опубликованы Прентисом, Ловеллом и Бануеллом ⁴⁴.

Замечательный метеорный дождь Драконид 10 октября 1946 г. изучался в Англии и в Америке ^{26, 27, 41, 45, 46 *}). Численность эхо

*) Он наблюдался с помощью радиолокационных станций также и в СССР ⁴⁷. Редакция

в течение ночи 9—10 октября 1946 г. на частоте 27 Мгц²⁷ показана на рис. 5. Это наблюдение является исключительным случаем, когда метеорный поток видимого типа дал огромный эффект, превзошедший высокую численность фона, наблюдающегося на этих частотах.

Аналогичная кривая численности, полученная на частоте 72 Мгц, показана на рис. 14⁴¹. Нормальная численность вне потоков на этой аппаратуре составляет около двух эхо в час, и эти условия выполнялись вплоть до 0 ч. МВ 10 октября. Но около 3 ч. 40 м. МВ

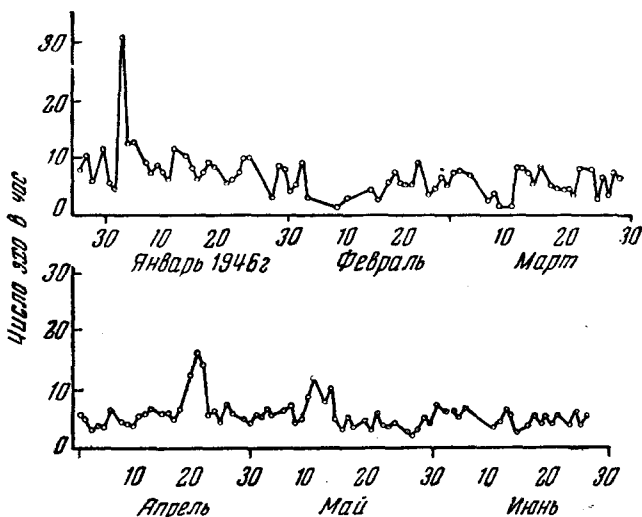


Рис. 13. Средняя численность эхо по наблюдениям станции с вертикальным лучом.

численность эхо достигла огромного максимума в 168 эхо в минуту, а к 6 ч. 00 м. снова спустилась до нормальной численности вне потока.

С октября 1946 г. активность главных метеорных потоков систематически изучалась Ловеллом с сотрудниками на частоте 72 Мгц. Случай метеорного дождя Драконид является, конечно, уникальным как по своей активности, так и по малой длительности. Более нормальное поведение главных потоков иллюстрируется кривой численности потока Геминид для декабря 1946 г., показанной на рис. 15.

В. Определение метеорных радиантов. В 1938 г. было обращено внимание³⁵ на влияние ориентировки метеорного следа по отношению к наблюдающей аппаратуре. Дальнейшие экспериментальные исследования^{40, 41} показали, что действительно при наблюдении метеорных следов сказывается влияние угла,

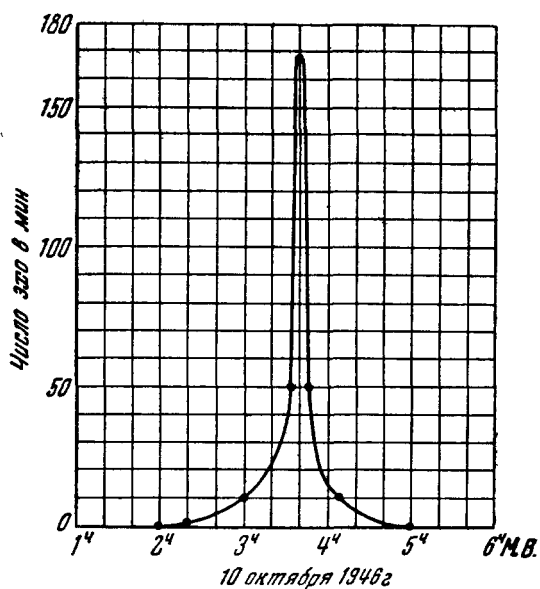


Рис. 14. Численность кратковременных эхо от метеоров потока Драконид 10 октября 1946 г. по измерениям киноснимков экрана осциллографа (частота 72 Мгц, антенна — полуволновой диполь).

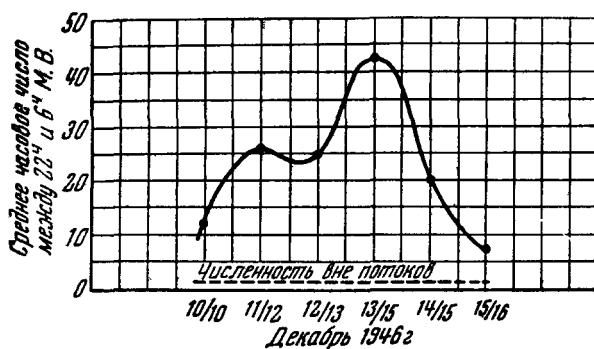


Рис. 15. Среднее часовое число Геминид в течение ночи (наблюдения на частоте 72 Мгц).

так что главное радиоэхо получается только тогда, когда радиолуч направлен перпендикулярно к следу *). Это свойство метеорных следов было использовано для определения радиантов потоков путём наблюдения радиоэхо.

а. Первое определение метеорных радиантов радиометодом было проведено в 1947 г. ⁴⁰. Авторы использовали три отдельные станции, работавшие на частоте 73 Мгц и расположенные, как показано на рис. 16. Антенны были повернуты так, что лучи пересекались в точке на высоте 100 км, равноотстоящей от всех станций. Поскольку метеорный след даёт радиоэхо только, если он направлен перпендикулярно к оси луча, то следовало ожидать, что, когда радиант движется по небу, он не будет создавать эхо одновременно для всех трёх станций, но только для тех, для которых метеорные следы оказываются ориентированными под прямым углом к радиолучу **).

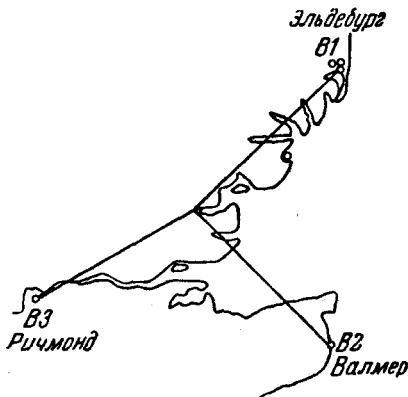


Рис. 16. Расположение станций, работавших в июне-июле 1945 г.

Суточная вариация средних часовых чисел, полученная на станциях B1, B2, B3 (рис. 16) между 26 июля и 1 августа 1945 г., показана на рис. 17. Области возможных положений радианта, соответствующие максимальной численности эхо для B2 — в 2 ч. 30 м. и для B3 в 4 ч. 30 м., показаны на рис. 18. Центр R участка перекрытия этих областей может быть принят за положение радианта, и это даёт следующие его экваториальные координаты: $\alpha = 345^\circ$, $\delta = -10^\circ$. Для станции B1 не получилось заметного максимума. Этого и следовало ожидать, поскольку радиант, имеющий такие координаты, никогда не оказывается в положении,

*) Это влияние резко выражено на волнах короче $6\frac{1}{2}$ м. На более длинных волнах сильное отражение получается не только при облучении ионной колонны под прямым углом к ней. На длинных волнах удаётся наблюдать и интенсивное отражение от головы приближающегося метеора и отражение от удаляющегося метеора. Оказывается также возможной «триангуляция» метеорного следа путём одновременных наблюдений с помощью трёх станций, расположенных на больших расстояниях друг от друга ^{49, 50}. Редакция.

**) Как уже отмечено в предыдущем примечании, это справедливо лишь при достаточно коротких волнах. Редакция.

благоприятном для В1. Полученный радиант хорошо согласуется с радиантом Дельта-акварид, который, как известно, активен в эти даты.

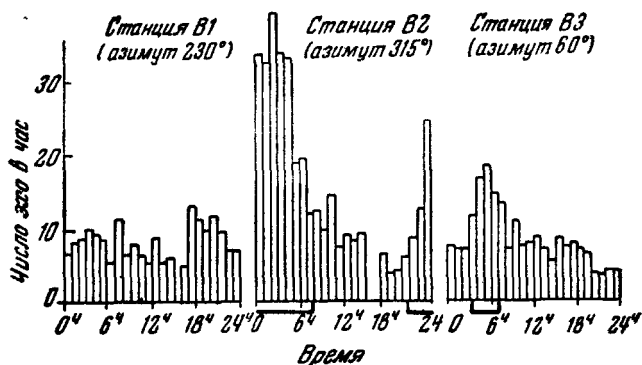


Рис. 17. Суточная вариация среднего часового числа эхо в период с 26 июля до 1 августа 1950 г. Периоды, когда радиант R занимает благоприятное положение, отмечены жирными линиями.

Точность определения координат радианта зависит от ширины лепестка излучения. Авторы считают, что у них ошибка в определении положения радианта, вызванная этой причиной, может составлять 10° .

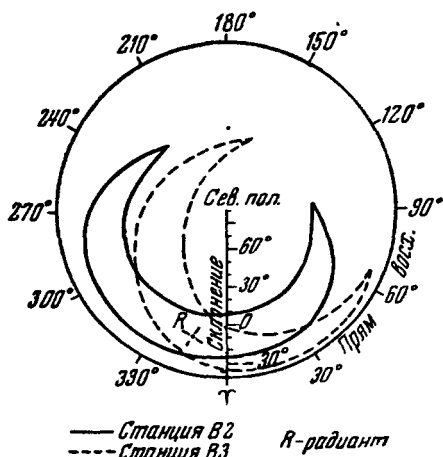


Рис. 18. Области возможных положений радианта, соответствующие главным максимумам часовых чисел для станций В2 и В3.

6. Другой метод определения метеорных радиантов, использующий подвижную антенну с узким лучом на одной единственной станции, был разработан Клеггом⁵¹. Для определения прямого восхождения радианта луч направляется точно на восток. Эхо не будут наблюдаться до тех пор, пока метеорные следы не будут пересекать луч под прямым углом, т. е. пока радиант не будет точно на юге.

Рассмотрение геометрии пересечения радиолуча со слоем на высоте 100 км,

в котором метеоры производят ионизацию, показывает, что эхо появляются на больших дальностях и что по мере движения ра-

дианта к западу дальность эхо непрерывно убывает. Когда радиант выходит из луча, эхо исчезают на самых малых дальностях. Время первого появления эхо на большой дальности совпадает со временем кульминации радианта, по которому можно вычислить его прямое восхождение.

Для определения склонения радианта луч поворачивается на некоторый угол к югу так, что он оказывается снова впереди радианта. Когда радиант достигает положения, перпендикулярного к этому новому направлению луча, эхо снова появляются на боль-

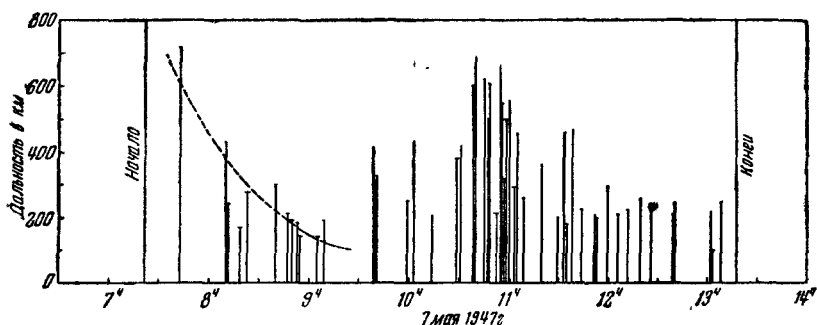


Рис. 19. Дальности эхо в функции времени. Наблюдения 7 мая 1947 г. с узким лепестком излучения, направленным на восток с целью определения положения радиантов по методу Клегга. Между 7^ч 30^м и 9^ч 30^м наблюдалось прохождение через луч радианта Эта-акварид (пунктиром показана теоретическая кривая дальностей). Дальнейшие эхо принадлежат новому дневному потоку, прохождение которого начинается в 10^ч 35^м (поток из созвездия Рыб).

ших дальностях и их дальности убывают по мере того, как радиант всё дальше продвигается к западу. Зная промежуток времени между первыми появлениями эхо большой дальности при обоих положениях, т. е. зная время, в течение которого радиант повернулся на угол θ после кульминации, можно вычислить склонение радианта.

Рис. 19 показывает характер результатов, получаемых этим методом. На нём показаны дальности отдельных эхо, наблюдавшихся 7 мая 1947 г. при луче, направленном точно на восток. Первый поток был Эта-аквариды, которые кульминировали в 7 ч. 40 м. МВ. Когда этот поток прошёл через луч, появился второй радиант в 10 ч. 40 м. МВ, который исчез около 12 ч. 30 м. МВ. Дальнейшие отсчёты на другом азимуте позволили определить его склонение, которое показало, что этот второй поток был из радианта в созвездии Рыб (см. раздел 7, Г).

Точность этого метода зависит от горизонтальной ширины пучка, от численности эхо и от склонения радианта. При задан-

ной ширине луча этот метод даёт значительно большую точность, чем метод, описанный в предыдущем разделе, поскольку он использует измеренные дальности эхо. Используемая аппаратура позволяет определять положение среднего радианта, дающего эхо в количестве около 30 в час, с точностью $\pm 3^\circ$ в направлении, перпендикулярном к небесному экватору, и $\pm 1^\circ$ в направлении, параллельном ему.

Г. Открытие дневных метеорных потоков. Описанные выше методы позволяют изучать метеорные потоки днём, и предварительные результаты дневных наблюдений обнаруживают некоторые удивительные факты. Сначала был найден ⁴⁰ метеорный поток, активный между 6 и 13 июня 1945 г., с координатами $\alpha = 58^\circ$, $\delta = +5^\circ$, а измерения в течение лета 1946 г. ⁴⁴ выявили наличие значительной метеорной активности в дневное время. Систематическое изучение главных потоков, начатое в октябре 1946 г., показало, что осенью и зимой общие предсказания активности метеорных потоков, основанные на визуальных наблюдениях, в основном верны. Но при исследовании радианта Эта-акварид, которое началось 1 мая 1947 г., обнаружилось, что метеорный поток, наблюдаемый астрономами, является лишь началом исключительно активной полосы, тянущейся по направлению к Солнцу.

Положения радиантов были определены методом Клегга, и выяснилось, что главный радиант лежит в Рыбах. Так как его кульминация происходит между 9 и 11 часами дня, изучение этого потока при помощи визуальных наблюдений невозможно.

Наблюдения *), проведённые в 1947 и 1948 гг., позволили изучить дневные потоки, действующие в летние месяцы ⁵². Выделено девять отдельных потоков, некоторые из которых имеют по несколько радиантов (или большую площадь радиантов), расположенных в созвездиях Рыб, Персея, Овна, Тельца, Ориона и Близнецов. У некоторых из этих потоков в максимуме число метеоров достигает 80—100 в час.

В течение августа заметных дневных потоков не наблюдается, но в июне — июле имеются радианты (кульминирующие рано утром), которые остаются пока неизученными.

В 1946 и 1947 гг. проводились наблюдения в середине ноября и в начале декабря с целью изучения очень слабых потоков, связанных с кометой Биэла ⁵³. Наблюдения дали мало результатов из-за малочисленности метеоров. В конце декабря 1947 г. проводились наблюдения потока Урсид, недавно открытого Бечваром. Удалось определить положение радианта и численность потока ⁵⁴.

Д. Определение скоростей метеоров. Во время звёздного дождя Драконид в 1946 г. впервые удалось провести

*) Дополнение редакции (до конца раздела).

определение скоростей метеоров по наблюдениям радиоэхо⁴⁶. Вместо обычной амплитудной развёртки, при которой сигналы создают отклонения на линейной развёртке дальностей на экране катодного осциллографа, приходившие эхо модулировали яркость линейной развёртки дальностей. Эта развёртка фотографировалась на киноплёнке,двигающейся в перпендикулярном к ней направлении со скоростью 2,4 мм в секунду.

Таким способом была получена непрерывная фотографическая запись дальностей эхо, момента их возникновения и длительности.

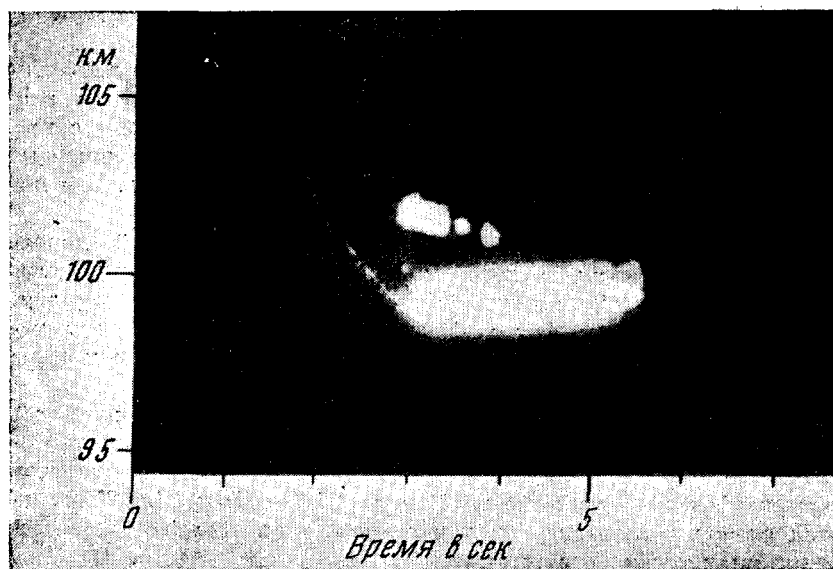


Рис. 20. Фотографическая регистрация кратковременного ионосферного эхо во время метеорного дождя Драконид в 1946 г.

На многих из этих фотографий заметны удивительные быстро движущиеся эхо, предшествующие образованию главного эхо. Пример такого эхо показан на рис. 20, на котором можно видеть слабый след, начинающийся в точке с приблизительными координатами 103 км, 1,75 секунды и движущийся к главному эхо, простирающемуся примерно от 2,75 до 5 секунд на постоянной дальности около 100 км.

Авторы приписали этот слабый след энергии, рассеянной от головы ионной колонны, создаваемой приближающимся метеором, тогда как главное интенсивное эхо является обычным отражением, возникающим, когда метеорный след приближается к основанию перпендикуляра, опущенного из наблюдающей станции на траекто-

рию метеора. Таким образом, слабый след даёт зависимость между переменной дальностью и временем для приближающегося метеора. Если метеор имеет скорость V , то дальность R в момент T даётся формулой

$$R^2 = R_0^2 + V^2(T - T_0)^2,$$

где T_0 есть момент, когда метеор достигает минимальной дальности R_0 . Скорость определялась по трём наблюдаемым значениям R и T путём исключения R_0 и T_0 . Этим методом была вычислена скорость для 22 метеоров Драконид. В среднем получилось $22,9 \pm 1,3$ км/сек в прекрасном согласии с теоретической геоцентрической скоростью 23,7 км/сек.

Позднее*) удалось определять скорость метеоров по дифракции во время образования следа⁵⁵. Изменения амплитуды эхо, происходящие ещё во время движения метеора, связаны с тем, что через наблюдающую станцию проносятся дифракционные максимумы и минимумы, которые могут быть вычислены с помощью интегралов Френеля.

Для регистрации изменений амплитуды был применён дополнительный отметчик, в котором горизонтальная развёртка длительностью в 0,2 секунды запускалась отражённым сигналом. На этом отметчике фотографически регистрировалась амплитуда каждого эхо (для каждого посылаемого импульса) в течение 0,2 секунды с момента появления метеорного следа.

Сначала этот метод был применён к определению скоростей потоков Геминид (1947) и Квадрантид. Для Геминид скорость получилась $34,4 \pm 2,8$ км/сек в прекрасном согласии с результатом фотографических наблюдений Уиппла 34,7 км/сек. Для Квадрантид скорости распались на три группы, а определения скоростей другими методами отсутствуют.

В 1948 г. этим методом изучались скорости метеоров дневных потоков⁵⁶, открытых с помощью радиолокационных наблюдений. Удалось определить геоцентрические скорости двух потоков, которые после пересчёта на гелиоцентрические скорости показали, что эти потоки обладают небольшими эллиптическими орбитами.

Об определении скоростей путём регистрации метеорных свистов см. стр. 41.

8. Приложение к физике верхних слоёв атмосферы

А. Интенсивность рассеяния радиоволн. а. Опыты Эккерслея^{7,37} по наблюдению кратковременных эхо были проведены на длинах волн, превышающих 15 м, т. е. таких, на которых

*) Дополнение редакции (до конца параграфа)

фон эхо, обнаруживающий суточную и годовую вариации, доминирует над эффектом метеоров потоков. Автор считал, что эхо вызывается ионными облаками, существующими больше 0,02 секунды, но меньше 1,0 секунды, и рассматривал рассеяние радиоволн подобными облаками аналогично рассеянию α -частиц тяжёлыми атомами. По его теории интенсивность рассеяния назад должна быть пропорциональна λ^4 .

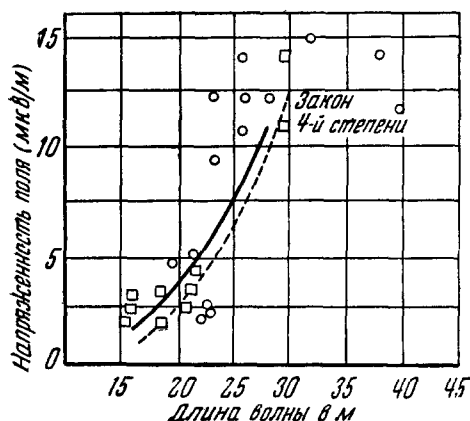


Рис. 21. Интенсивность рассеяния в функции длины волны по наблюдениям различных станций, приведённым к стандартной мощности в 5 *квт*. Для сравнения приведён закон четвертой степени.

На рис. 21 приведено сравнение экспериментальных данных для интенсивности рассеяния на диапазоне длин волн от 15 до 30 м с предсказанным законом четвертой степени.

6. Пирсом³⁵ вычислено отношение энергии, рассеянной от следа метеора, к энергии, рассеянной ионизованным слоем, в предположении, что в следе электроны образуют длинную колонну, диаметр которой велик по сравнению с длиной волны.

На рис. 22 AB — эквивалентная отражающая плоскость ионизованного слоя, а круг с центром в C — эквивалентный отражающий цилиндр, ось которого совпадает с траекторией метеора. Энергия, излучённая из O и отражённая от AB в направлении к O и приходящаяся на малый элемент поверхности в O , есть

$$E_p = \frac{k}{h^2}.$$

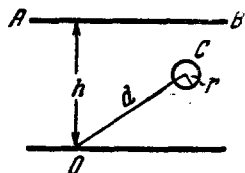
Для цилиндра в C , если плотность в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра, пропорциональна $\frac{r}{d}$ и однородна вдоль оси, то отражённая энергия равна:

$$E_c = \frac{k}{d^2} \frac{r}{d} = \frac{kr}{d^3}.$$

Таким образом,

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{rh^2}{d^3}.$$

Автор приводит в качестве примера случай отражения от следа метеора на расстоянии $d = 100$ км с $r = 0,25$ км по сравнению с отражением от слоя F на высоте 200 км и получает:



$$\frac{E_c}{E_p} = 0,0156.$$

Отношение соответствующих напряжённостей поля равно:

Рис. 22.

$$\sqrt{\frac{E_c}{E_p}} = 12,5:100.$$

Автор упоминает, что это отношение удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями напряжённости поля, найденными им при «вспышках» (см. раздел 5), но не приводит каких-либо более подробных экспериментальных данных, которые могли бы подтвердить правильность его подхода к вопросу. Согласно Херлофсону¹⁸ эти вычисления приводят к плотностям в метеорном следе, которые могут быть ошибочны во много раз.

в. Предположение о том, что некоторые из кратковременных радиоэхо могут быть вызваны когерентным рассеянием на электронах в длинной колонне, диаметр которой мал по сравнению с длиной волны λ , было высказано Блеккетом и Ловеллом⁵⁷. Эта идея была применена в частном случае метеорных следов⁵⁸. В этом случае число электронов N , рассеивающих когерентно, равно их количеству в отрезке колонны, длина которой равна первой зоне Френеля, т. е.

$$N = \alpha \sqrt{\frac{\lambda R}{2}},$$

где α — число электронов, создаваемых метеором на сантиметр пути.

Вводя параметры радиоаппаратуры, можно показать, что

$$\alpha = \sqrt{24 \pi} \frac{mc^2}{e^2} \frac{1}{G} \sqrt{\frac{\varepsilon R^3}{\rho \lambda^3}}, \quad (1)$$

где G — коэффициент усиления приёмной и передающей антенн по сравнению с полуволновым диполем, ε — рассеянная мощность, возвращающаяся к приёмнику, R — расстояние до следа, P — пиковая мощность передатчика и $\frac{mc^3}{e^3}$ — обратная величина классического радиуса электрона.

Предсказанная зависимость между ε и λ проверялась экспериментально⁵⁸ путём одновременных наблюдений радиоэхо от одного и того же следа метеора на разных длинах волн. В пределах ошибок наблюдений зависимость согласуется с предсказанной на использованном диапазоне длин волн, а именно, от 1,4 до 8 м. Измеренные значения α для визуально наблюдаемых метеоров, основанные на этой формуле, также хорошо согласуются с теорией¹⁸.

г. Имеющихся наблюдательных данных пока недостаточно для решения вопроса о том, какая из приведённых выше трактовок вопроса правильна. Трактовка Ловелла⁵⁸ согласуется с экспериментальными данными в отношении зависимости ε от λ на исследованном диапазоне длин волн от 1,4 до 8 м и даёт электронную плотность, хорошо согласующуюся с теорией. Она также правильно предсказывает изменение числа зарегистрированных эхо при изменении λ от 1,4 до 6 м. Однако она совершенно не способна объяснить резкое увеличение численности эхо на 8 м по сравнению с 6 м, описанное выше в разделе 7,А.

Формула $\sim \lambda^4$ согласуется с экспериментом на диапазоне от 15 до 30 м, но она неприложима к длинам волн менее 8 м, где доминируют метеоры потоков. Эта формула, так же как и расчёт Пирса⁸⁵, даёт плотности электронов, которые расходятся с современными теоретическими оценками¹⁸.

Представляется возможным, что фон высокой численности на длинных волнах вызван метеорной пылью, создающей электронные колонны, свойства которых отличны от тех, которые создаются метеорами потоков. Действительно, трудно представить себе, чтобы свойства обоих типов ионизации были одинаковы, поскольку, как указано выше, при наблюдениях на 8 м «невидимые метеоры фона» дают эхо такого же характера и амплитуды, как и те, которые связаны с визуально наблюдаемыми метеорами.

Б. Электронная плотность в метеорных следах. Проводя одновременные визуальные наблюдения и наблюдения радиоэхо, можно измерить амплитуду радиоэхо, создаваемого видимым метеором. Такие наблюдения проводились для Персеид 1946 г.⁴⁴, Драконид 1946 г.⁴¹ и Персеид 1947 г.⁴¹.

Используя формулу (1), можно было вычислить α — число электронов, создаваемых на сантиметр пути, поскольку G , P , λ —

известные константы аппаратуры, а ϵ и R измеряются для каждого следа.

Три серии наблюдений хорошо согласуются друг с другом и дают значение α между 10^9 и 10^{12} электронов на сантиметр пути.

Детальные сравнения α с визуальными звёздными величинами пока что не проведены, однако видно, что метеоры приблизительно 5-й звёздной величины, близкие к пределу видимости невооружённым глазом, создают около $2 \cdot 10^{10}$ электронов на сантиметр пути. Это хорошо согласуется с теоретическими оценками¹⁸. Интересно отметить, что если эти оценки правильны, то видимый метеор имеет радиус приблизительно $1/10$ мм и вес в несколько миллиграмм.

Пирсом²⁶ была вычислена энергия, принесённая в атмосферу всем метеорным дождём Драконид в октябре 1946 г., и получена величина потока энергии 3 *вт* на *км*². Основываясь на теории метеорной ионизации Мэриса¹² Пирс, вычислил скорость образования ионов и получил 42 иона на *см*³ в секунду. Согласно Херлофсону¹³ эти оценки могут быть ошибочны во много раз *).

В. Продолжительности кратковременных эхо. Распределение продолжительностей кратковременных эхо изучалось многими исследователями^{29, 37, 40, 44} и все они согласно получили, что распределение имеет характер, показанный на рис. 10.

Недавние исследования, при которых одини тот же метеорный след наблюдался одновременно на двух длинах волн (неопубликованные результаты Ловелла и его сотрудников), подтвердили прежнее предположение о том, что продолжительность эхо возрастает с увеличением длины волны. Таким образом, хотя общий характер кривой распределения остаётся одним и тем же, нынешний предел смещается в сторону меньших продолжительностей при возрастании частоты. При измерениях на частоте 27 *Мгц* установлено²⁷, что продолжительности после полуночи оказываются больше, чем до полуночи. Эти результаты истолкованы авторами как указание на то, что во второй половине ночи получают более сильные отражения, чем в первой половине.

До сих пор нет удовлетворительного объяснения того, какие факторы определяют продолжительность кратковременных эхо. Ясно только, что высота образования следа в атмосфере не является единственным существенным фактором. Хотя высоты индивидуальных эхо пока что не измерялись точно ни одним из исследователей, все наблюдения указывают, что эхо в интервале высот 100 ± 5 км могут иметь продолжительности, отличающиеся друг от друга до тысячи раз.

*) Оценки электронной плотности содержатся также в⁵⁹. Редакция.

Далее, систематическое изучение главных потоков показало, что распределение продолжительностей эхо у главных потоков не обнаруживает каких-либо заметных различий. Рис. 23 показывает распределение продолжительностей для потоков Геминид, Леонид, Орионид и Драконид 1946 г. и Квадрантид 1947 г. Скорости этих потоков метеоров составляют от 23,7 км/сек (Дракониды) до 72 км/сек (Леониды) и визуальные наблюдения обнаруживают

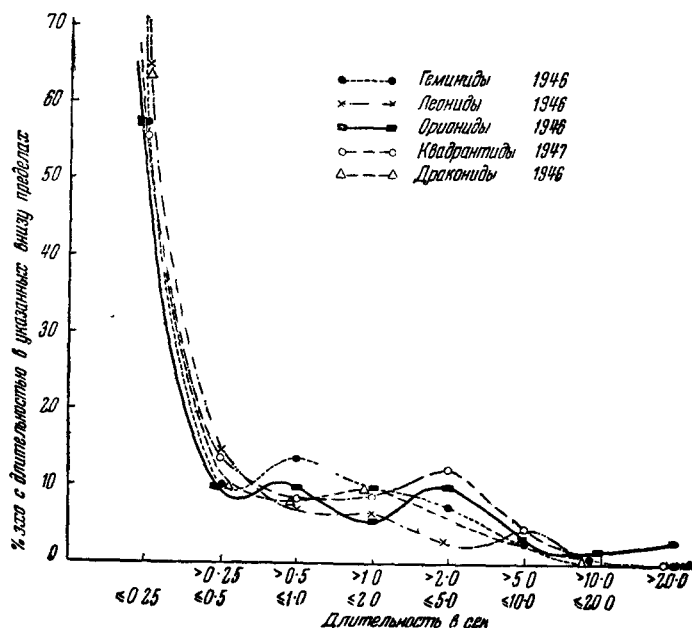


Рис. 23. Распределение длительностей эхо для пяти главных потоков.

ясную связь между высотой появления метеора и его скоростью. Метеоры малой скорости становятся заметными на высоте приблизительно 95 км, а быстрые метеоры на высоте около 120 км. Атмосферное давление изменяется в 10 раз в пределах этого слоя, и если бы процессы рекомбинации и прилипания были единственными, определяющими длительность эхо, то этот эффект давления был бы заметен на рис. 23. Сходство кривых, таким образом, показывает, что скорость рекомбинации и прилипания, определяемая высотой появления метеора в атмосфере, не является единственным фактором, определяющим длительность радиоэхо.

Высказано предположение¹⁸, что главным фактором, определяющим длительность эхо, может быть не рекомбинация, а диффузия электронов. В зависимости от направления метеорного следа

по отношению к силовым линиям земного магнитного поля диффузия будет происходить таким образом, что электронная колонна будет или расширяться или удлиняться. Таким образом, длительность радиоэхо должна зависеть от направления антенны — от того, наблюдается ли эхо от колонны, которая удлиняется, или от колонны, которая расширяется. В последнем случае интерференционные эффекты быстро уменьшат интенсивность рассеяния, и эхо будет длиться меньший промежуток времени, чем в первом случае.

Существующие экспериментальные данные хорошо подтверждают эту теорию: а) если диффузия определяет длительность,

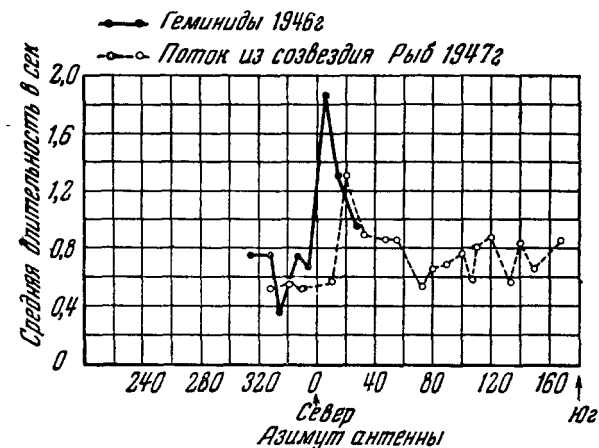


Рис. 24. Средние длительности эхо в зависимости от направления наблюдений.

тогда при заданной чувствительности аппаратуры продолжительность эхо должна зависеть от длины волны. Одновременные наблюдения на двух длинах волны эхо от тех же самых метеорных следов показывают, что длительность пропорциональна приблизительно λ^2 ; б) если важно направление следа по отношению к земному магнитному полю, тогда длительность эхо от метеоров одного и того же потока будет зависеть от направления радиолуча.

При исследованиях, выполненных на экспериментальной станции Манчестерского университета ($53^{\circ}13'54''$ сев. шир. ; $2^{\circ}18'11''$ зап. долг.) с помощью направленной антенны была измерена средняя продолжительность эхо в функции азимута антенны (в северном направлении) для Леонид и Геминид 1946 г. и для потока из созвездия Рыб 1947 г. Во всех случаях получились максимумы средней продолжительности эхо между 0° и 20° вост. долготы. Результаты для Геминид и потока из созвездия Рыб показаны на рис. 24, на котором средние продолжительности эхо нанесены в функции азимута антенны.

Г. Флуктуации и движения эхо и возможные приложения к изучению ветров. Радиозэхо, получаемые от метеорных следов, обнаруживают в течение своей жизни очень заметные флуктуации интенсивности. Техника изучения их с помощью киносъёмки для эхо большой продолжительности и примеры полученных таким образом флуктуаций описаны Ловеллом, Бануэллом и Клеггом⁴¹. Дальнейшие (не опубликованные) исследования, основанные на киноснимках нескольких сотен метеорных эхо, показали, что почти все эхо обнаруживают значительные флуктуации амплитуды, накладывающиеся на спад после начального максимума. Эти флуктуации обычно носят беспорядочный характер при сравнении последовательных фотографий, снятых через $\frac{1}{8}$ секунды, но иногда они группируются во вторичные максимумы



Рис. 25. Флуктуации амплитуды эхо по измерениям на частоте 62 Мгц (метеор из радианта в созвездии Рыб).

длительностью около секунды или более и разделённые интервалами в несколько секунд.

Пример эхо подобного типа показан на рис. 25, на котором амплитуда эхо дана по сравнению с высотой уровня шумов, а время в секундах отсчитывается от произвольного нуля, выбранного около момента начала эхо. Подобные изменения могут быть связаны с искажением ионизованной колонны стратосферными ветрами¹³. Установлено также, что очень быстрые флуктуации, с периодом порядка $\frac{1}{10}$ секунды или менее, накладываются на флуктуации большего периода, упомянутые выше. Объяснения этого явления пока не существует. Найдено⁴⁰, что около 2% всех наблюдавшихся эхо обнаруживают смещение по дальности, а из эхо длительностью более 1 секунды смещение обнаруживается у 15% эхо. Эхо с длительностью более 0,5 секунды имеют радиальные скорости этих смещений, заключённые обычно между 0 и -5 км/сек. Лишь очень немногие имеют большие скорости — от $+5$ до -25 км/сек. Большинство этих движений должно означать явление, отличное от наблюдающейся иногда ионизации в голове движущегося метеора, использованной для определения скоростей. Вероятно, они связаны с дрейфом ионизованной колонны под влиянием стратосферных ветров. Возможно, что дальнейшие исследо-

вания флуктуаций и дрейфа эхо могут дать сведения о ветрах на больших высотах.

Д. Распределение метеорных масс. Как описано выше (стр. 35—36), наблюдения кратковременных эхо позволяют вычислить электронную плотность в метеорном следе. Предполагая, что формула (1) верна для метеоров потоков, было вычислено ⁴¹ распределение электронных плотностей для метеоров потока Драконид 1946 г. Это было сделано по измерениям амплитуд и дальностей эхо на кинофильме, снятом около максимума потока с помощью аппаратуры, работавшей на частоте в 72 Мгц. Было найдено, что распределение плотностей подчиняется закону обратной пропорциональности с показателем степени, равным $0,9 \pm 0,2$. Дальнейшие измерения для Геминид 1946 г. дали значение показателя $0,9 \pm 0,2$, а измерения для Квадрантид 1947 г. — значение $1,0 \pm 0,2$. Таким образом, распределение электронных плотностей у метеоров потоков согласуется с законом обратной пропорциональности, с показателем степени близким к единице, на интервале электронных плотностей, охваченном измерениями (от 10^9 до 10^{12} электронов на сантиметр пути).

Если предположить, что скорости метеоров данного потока одинаковы, то из теории метеорной ионизации следует, что распределение масс метеоров должно быть такое же, как и распределение электронных плотностей. Следовательно, описанные выше измерения указывают, что число метеоров заданной массы в этих потоках обратно пропорционально массе метеоров.

Этот результат согласуется с существующими визуальными наблюдениями, которые указывают, что для каждой звёздной величины общая масса метеорного вещества одинакова. Дальнейшее изучение распределения масс путём наблюдений радиоэхо представит особенно большой интерес, если его удастся применить к метеорам слабее предела видимости.

6. Явление «свистящих метеоров». В 1941 г. было обращено внимание ⁶⁰ на слабые свисты необычного характера при настройке на немодулированную несущую волну частотой в 7 Мгц на расстоянии 10 миль от коротковолнового передатчика Дэли. Эти свисты воспринимались как звуки высокого тона, причём высота тона быстро убывала. Они имели малую продолжительность — обычно от $\frac{1}{5}$ секунды до нескольких секунд — и проходили через беспорядочные промежутки времени. Путём установления визуальных корреляций было показано, что эти свисты связаны с пролётом метеоров. Согласно этим исследователям объяснение свистов состоит в том, что они являются звуками биения, возникающими в результате интерференции радиоволны, отражённой от головы ионной колонны, создаваемой приближающимся метеором, с прямым земным лучом. Для объяснения убывающего тона было предположено, что скорость метеора убывает

по мере его погружения в атмосферу. В этом случае рассеянная волна, интерферируя с земным лучом, даёт свист постепенно убывающего тона.

Эти эксперименты были проанализированы⁶¹, причём было высказано сомнение в приведённом выше объяснении свистов и предположено, что некоторые из них могут быть вызваны атмосфериками, а некоторые — метеорами, создающими «электрический импульс», когда они задерживаются атмосферой. Однако связь свистов с метеорами получила дальнейшее подтверждение. Во время потока Драконид 1946 г. было проведено слушание на двух типах аппаратуры⁶²: а) в 72 милях от 100-киловаттного передатчика на 15 *Мгц* и б) в 1 миле от 0,7-киловаттного передатчика на 29 *Мгц*. На обоих приёмниках наблюдались доплеровские свисты, совпадавшие с метеорами, наблюдавшимися визуально, и, зачастую, свисты сопровождалась вспышками сильного сигнала.

Пирс²⁶ также наблюдал доплеровские свисты во время потока Драконид и пришёл к заключению, что объяснение, согласно которому свисты связаны с торможением метеора, является неправильным; он предполагает, что доплеровское биение создаётся «ионной головной волной» и является функцией как скорости метеора, так и скорости диффузии электронов.

Эпплтон и Нейсмит²⁷ также считают, что объяснение, связанное с торможением метеора, является неправильным; тон свиста должен уменьшаться и в том случае, когда волна отражается от голдры колонны, приближающейся с постоянной скоростью. Когда метеор достигает основания перпендикуляра, опущенного со станции на траекторию метеора, тон должен падать до нуля. Но это есть точка, в которой метеорный след создаёт главное радиоэхо, и, следовательно, свист всегда должен предшествовать эхо, если это объяснение правильно. Наблюдения⁶², согласно которым вспышки интенсивного сигнала следовали за свистами, говорят в пользу этого объяснения.

Исследования скоростей метеоров указывают, что это объяснение почти несомненно правильно. Заметного торможения метеора не обнаружено, но получены фотографические записи быстро движущегося эхо, вызванного ионизацией в голове приближающегося метеора.

В дальнейших работах *) по изучению метеорных свистов даются формулы для определения истинных путей метеоров в атмосфере и положения радиантов по кривым высоты тона свиста, полученным на трёх станциях⁶³, и приводятся результаты определения скоростей метеоров⁶⁴ путём регистрации тона свиста на частотах 12 и 30 *Мгц*, находящиеся в удовлетворительном согласии с астрономическими данными.

*) Дополнение редакции (до конца абзаца).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. H. R. Mimp'o. *Rev. Mod. Physic* **2**, 1 (1937).
2. Я. Л. Альперт, Распространение радиоволн в ионосфере, Гостехиздат, 1947.
3. М. Эйгенсон, М. И. Гневыхшев, А. И. Оль, Б. М. Рубашев, Солнечная активность и её земные проявления, Гостехиздат, 1948.
4. В. Л. Гинзбург, Теория распространения радиоволн в ионосфере, Гостехиздат, 1949.
5. Я. Л. Альперт, УФН **34**, 262 (1948); **36**, 1 (1948).
6. R. A. Heising, *Proc. Inst. Radio Eng.* **16**, 75 (1928).
7. T. L. Eckersley *J. Inst. Electr. Engr.* **67**, 992 (1929); **71**, 405 (1932).
8. E. V. Appleton and R. Naismith, *Proc. Roy. Soc.* **A137**, 36 (1932).
9. J. P. Schafer and W. M. Goodall, *Proc. Inst. Radio Eng.* **19**, 1434 (1931).
10. H. Nagaoka, *Imp. Acad. Tokyo Proc.* **5**, 233 (1929); *Inst. Phys. Chem. Res. Sci. Papers, Tokyo* **15**, 169 (1931).
11. A. M. Skellett, *Phys. Rev.* **37**, 1668 (1931); *Proc. Inst. Radio Eng.* **20**, 1933 (1932); **23**, 132 (1935).
- 11a. Н. А. Иванов, *Астр. Журн.* **8**, 240 (1931).
12. H. B. Maris, *Terr. Magn. Atm. Electr.* **34**, 309 (1929).
13. N. Herlofson, *Rep. Progr. Phys.* **11**, 444 (1948).
14. T. Minohara and Y. Ito, *Rep. Radio Res. Japan* **3**, 115 (1933).
15. E. Quäck, *Elektr. Nachr.-Techn.* **8**, 46 (1931).
16. G. W. Pickard, *Proc. Inst. Radio Eng.* **19**, 1166 (1931).
17. I. Ranzi, *Nature* **130**, 368 (1932).
18. E. V. Appleton and R. Naismith, *Proc. Phys. Soc.* **45**, 389 (1933).
19. J. A. Ratcliffe and E. L. C. White, *Proc. Phys. Soc.* **45**, 399 (1933); **46**, 107 (1934).
20. L. R. Hafstad and M. A. Tuve, *Terr. Magn. Atmos. Electr.* **34**, 39 (1929).
21. E. V. Appleton, R. Naismith and L. J. Ingram, *Phil. Trans. Roy. Soc.* **A236**, 191 (1937).
22. E. V. Appleton and J. S. Hey, *Phil. Mag.* **37**, 73 (1946).
23. М. Н. Гневыхшев, *Климат и погода* **10**, № 2, 17 (1934).
24. S. K. Mitra, P. Syam and B. N. Ghose, *Nature* **133**, 533 (1934).
25. J. N. Bhar, *Nature* **139**, 470 (1937); *Indian J. Phys.* **11**, 109 (1937).
26. J. A. Pierce, *Phys. Rev.* **71**, 88 (1947).
27. E. V. Appleton and R. Naismith, *Proc. Phys. Soc.* **59**, 461 (1947); *Nature* **158**, 936 (1946).
28. J. A. Ratcliffe and J. L. Pawsey, *Proc. Cambr. Phil. Soc.* **29**, 301 (1933).
29. A. M. Skellett, *Nature* **141**, 472 (1938).
30. R. A. Watson-Watt, A. F. Wilkins and E. G. Bowen, *Proc. Roy. Soc.* **A161**, 181 (1937).
31. E. V. Appleton and J. H. Piddington, *Proc. Roy. Soc.* **A164**, 467 (1938).
32. T. L. Eckersley and F. T. Farmer, *Proc. Roy. Soc.* **A184**, 196 (1945).
33. L. Harang, *Geofysike Publikas (Oslo)* **13**, No. 4 (1942).
34. J. A. Pierce, *Phys. Rev.* **59**, 625 (1941).
35. J. A. Pierce, *Proc. Inst. Radio Eng.* **26**, 892 (1938).
36. Federal Communications Commission, Engineering Dept., Docket No. 6651 (1944).
37. T. L. Eckersley, *J. Inst. Electr. Engr.* **86**, 548 (1940).
38. H. W. Wells, J. M. Watts and D. E. George, *Phys. Rev.* **69**, 540 (1946).

39. A. C. B. Lovell, J. A. Clegg and C. D. Ellyett, *Nature* **160**, 372 (1947).
 40. J. S. Hey and G. S. Stewart, *Proc. Phys. Soc.* **59**, 858 (1947).
 41. A. C. B. Lovell, C. J. Banwell and J. A. Clegg, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **107**, 164 (1947).
 42. O. P. Ferrell, *Phys. Rev.* **69**, 32 (1946).
 43. E. Eastwood and K. A. Mercer, *Proc. Phys. Soc.* (1948).
 44. J. P. M. Prentice, A. C. B. Lovell and C. J. Banwell, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **107**, 155 (1947).
 45. J. S. Hey, S. J. Parsons and G. S. Stewart, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **107**, 176 (1947).
 46. J. Q. Stewart, M. Ference, J. J. Slattery and H. A. Zahl, *Sky and Telescope* **6**, 3 (1947).
 47. Б. Ю. Левин, *Астр. цирк.* № 57, 2 (1946).
 48. A. C. B. Lovell, *Nature* **161**, 279 (1948); P. M. Millman McKinley and M. S. Burland, *Nature* **161**, 278 (1948).
 49. P. M. Millman and McKinley, J. R., *Astr. Soc. Canada* **42**, 121 (1948).
 50. P. M. Millman and McKinley, *Sky and Telescope* **8**, 114 (1949).
 51. J. A. Clegg, *J. Brit. Astr. Assoc.* **58**, 271 (1948); *Phyl. Mag.* **39**, 577 (1948).
 52. A. Aspinall, J. A. Clegg and A. C. B. Lovell, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **109**, 352 (1949).
 53. A. C. B. Lovell and J. P. M. Prentice, *J. Brit. Astr. Assoc.* **58**, 140 (1948).
 54. J. A. Clegg, V. A. Hughes and A. C. B. Lovell, *J. Brit. Astr. Assoc.* **58**, 134 (1948).
 55. C. D. Davis and C. D. Ellyett, *Nature* **161**, 596 (1948); *Phil. Mag.* **40**, 614 (1949).
 56. C. D. Ellyett, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **109**, 359 (1949).
 57. P. M. S. Blackett and A. C. B. Lovell, *Proc. Roy. Soc.* **A177**, 183 (1941).
 58. A. B. C. Lovell and J. A. Clegg, *Proc. Phys. Soc.* **60**, 491 (1948).
 59. E. W. Allen, *Proc. Inst. Radio Eng.* **36**, 346 (1948).
 60. Chamanlal and K. Venkataraman, *Electrotechnics* **14**, 28 (1941).
 61. S. R. Khastgir, *Indian J. Phys.* **17**, 239 (1943).
 62. L. A. Manning, R. A. Helliwell, O. C. Villard and W. E. Evans, *Phys. Rev.* **70**, 767 (1946).
 63. D. D. Cherry and C. S. Shyman, *Phys. Rev.* **75**, 1441 (1949).
 64. D. W. Heightman and T. W. Bennington, *Wireless World* **53**, 219 (1947).
 65. L. A. Manning, *J. Appl. Phys.*, No. 8 (1948).
 66. J. A. Clegg, V. A. Hughes and A. C. B. Lovell, *Mon. Not. R. Astr. Soc.* **107**, 369 (1947).
 67. M. Hurohata, *Publ. Astr. Soc. Japan* **1**, 39 (1949).
 68. A. C. B. Lovell, *J. Inst. Electr. Eng.* **95**, 324 (1948),
-