

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Б. А. Багаряцкий

## ВВЕДЕНИЕ

Отражения от ионосферы радиоволн метрового диапазона, характерным образом связанные с зонами полярных сияний, впервые были замечены незадолго до второй мировой войны<sup>1,2</sup>. Систематические исследования, опирающиеся на значительно более совершенную радиолокационную технику, стали осуществляться только после войны. Вторичному послевоенному открытию УКВ-отражений вблизи зон полярных сияний способствовало развертывание в ряде стран метеорной радиоастрономической службы, так как оптимальные частоты «авроральных»\*) и метеорных радиоотражений приблизительно совпадают (хотя характер отраженных сигналов в обоих случаях совершенно различен).

С 1947 г. в геофизике радиолокационным исследованиям полярных сияний уделяется значительное внимание. Оптические методы (спектроскопия, фотометрия) позволяли изучать полярные сияния с точки зрения происходящих в них процессов возбуждения. Обнаружившаяся возможность получать радиоотражения во время полярных сияний позволяет дополнить эти исследования изучением изменений в состоянии ионизации. Но изучение «авроральных радиоотражений» представляет и самостоятельный интерес. Существование их демонстрирует наличие некоторых новых, ранее неизвестных, черт полярной ионосферы. Связь отражений этого типа с магнитными возмущениями и полярными сияниями является одним из показателей интенсивного воздействия, испытываемого ионосферой высоких широт со стороны корпускулярных потоков. Интересно, что

\*) В связи с обширной программой исследований полярных сияний в период МГГ, по предложению С. Чэпмена была введена следующая терминология: районы земного шара, лежащие выше  $60^{\circ}$  северной или южной геомагнитной широты, были названы «авроральными поясами», районы между  $60$  и  $45^{\circ}$  — «субавроральными поясами», а область между геомагнитными параллелями  $45^{\circ}$  N и  $45^{\circ}$  S — «минавроральным поясом». Зоны полярных сияний в узком смысле слова, т. е. области, где частота появлений полярных сияний максимальна, лежат приблизительно в пределах  $65$  —  $68^{\circ}$  геомагнитных широт. Максимумы этих зон смешаются довольно значительно в сторону более низких широт во время геомагнитных возмущений. Термин «авроральные возмущения», который за последнее время стал употребляться для обозначения совокупности процессов, происходящих в зонах полярных сияний в периоды возмущений, удобен в силу краткости, и мы считаем возможным пользоваться им. Термин «авроральные отражения» в этом случае является удобным для обозначения того типа отражений от ионосферы, который характерен для зон полярных сияний в периоды «авроральных возмущений»; это название, может быть, вообще стоит предпочесть употребляющемуся сейчас словосочетанию «радиоотражения от полярных сияний», являющемуся, по существу, физически незаконным.

применение более чувствительной аппаратуры приводит к тому, что радиоотражения «аврорального типа» наблюдаются иногда на значительном удалении от зон полярных сияний, в отдельных случаях даже в субтропических широтах<sup>3—6</sup>. Специальный интерес представляет образование ионизации «аврорального» типа при атомных взрывах в верхней атмосфере. Высокая плотность ионизации, обусловливающая на десятки минут появление устойчивых УКВ-отражений, наблюдается при этом не только в зоне взрыва, но и (по прошествии короткого времени) на расстоянии в несколько тысяч километров в магнитно-сопряженной точке противоположного полушария. Явление это интересно с точки зрения понимания свойств радиационных поясов Земли, не говоря о том, что с ним связана также возможность уточнения структуры земного магнитного поля\*). Исследование авроральных радиоотражений имеет большое значение для радиосвязи, особенно в обширных областях вблизи зон полярных сияний. Периоды, когда наблюдаются УКВ-отражения, обычно характеризуются мощным поглощением коротких волн; в некоторых случаях отражения могут являться неприятной помехой для ультракоротковолновой связи и радиолокации. С другой стороны, специфические условия в ионосфере, создающиеся в высоких широтах во время часто повторяющихся и длительных магнитных возмущений, во-видимому, могут иногда быть использованы в целях осуществления сверхдальней связи на волнах УКВ-диапазона, причем нередко в такой обстановке, когда другие диапазоны оказываются полностью или почти полностью выключенными<sup>2,7,8</sup>.

Хотя в геофизике «радиоотражения от полярных сияний» исследуются уже более десяти лет, накопленные сведения оказываются не всегда достаточно хорошо известными специалистам смежных областей. Как пример, можно указать, что в книге «Радиоастрономия» Пози и Брейсуэлла (М., ИЛ, 1958), сравнительно недавно переведенной на русский язык, говорится: «На высоких радиочастотах, например 30 Мгц, все или практически все случайные отражения от ионосферных уровней обусловлены метеорами» (стр. 372). Это утверждение далеко от действительности.

В советской литературе не было пока опубликовано обзорных или обобщающих работ по радиолокационным исследованиям полярных сияний. В настоящей статье делается попытка дать обзор имеющихся в литературе данных и сообщить основные сведения о характеристиках «авроральных» радиоотражений.

Обширная программа Международного геофизического года включала в себя и исследования радиоотражений от полярных сияний. Интенсивные наблюдения велись во многих странах.

Советскими геофизиками за время Международного геофизического года и в процессе подготовки к нему также проведено большое количество наблюдений; некоторые из них представляют значительный интерес\*\*). Материалы, опубликованные к середине 1960 г., в основном включены в данный обзор, но следует учесть, что обработка и публикация большей части результатов МГГ еще не закончена, и они в обзор не включены.

#### § 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯВЛЕНИЯ

Термин «радиоотражения от полярных сияний» не является физически точным и удобен лишь благодаря относительной краткости: полярное сияние, как оптический объект, не может отражать радиоволны. В силу

\*.) По вопросу об искусственной ионизации см. серию статей в J. Geophys. Res., № 8, 64 (1959). В настоящей статье эти вопросы не освещаются.

\*\*) В постановке радиоисследований полярных сияний по программе МГГ в Советском Союзе следует специально отметить заслуги Я. Г. Бирфельда.

традиции можно, по-видимому, продолжать пользоваться им, с оговоркой, что под отражениями «от полярных сияний» следует понимать отражения от связанных с ними областей повышенной ионизации.

Как известно из многолетних данных ионосферного зондирования<sup>9</sup>, из наблюдений за искусственными спутниками<sup>10, 11</sup> и из прямых ракетных измерений<sup>12, 13</sup>, максимальная электронная плотность в ионосфере, если иметь в виду нормальные условия, не превосходит нескольких единиц на  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Такая величина дневного максимума имеет место на высоте около 300—350 км в слое  $F_2$ . В слое  $F_1$ , существующем только днем, концентрация на порядок меньше. На высотах 100—120 км в области  $E$  в дневных условиях нормальная величина электронной концентрации составляет приблизительно  $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ; ночью она существенно уменьшается. Слой  $D$  присутствует не постоянно и имеет электронную плотность не выше  $(5 \div 8) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Исследования последних лет показали<sup>10—13</sup>, что разделение ионосферы на резко разграниченные слои не соответствует действительности: рост электронной концентрации к максимуму в слое  $F_2$  (если отвлечься от деталей) происходит более или менее монотонно. Но в известном смысле указанное деление на области  $E$ ,  $F_1$  и  $F_2$  остается правомерным, так как, по-видимому, оно отражает реальное существование в ионосфере слоев с различными физическими условиями, характеризуемыми, например, различием природы ионизующего агента или основной ионизуемой компоненты.

На рис. 1 представлено распределение электронной концентрации от 100 км до внешней области ионосферы по данным Я. Л. Альперта и др.<sup>10</sup> (наблюдения за радиосигналами первого советского искусственного спутника Земли), К. И. Грингауз<sup>13</sup> (измерения электронной концентрации при запуске геофизической ракеты) и Шмеловского и др. (ГДР) (наблюдения сигналов третьего советского искусственного спутника)<sup>11</sup>.

Если воспользоваться формулой, связывающей критическую частоту  $f_{kp}$  регулярного отражения от ионосферы с электронной концентрацией  $N_m$  в максимуме слоя,

$$N_m = 1,24 \cdot 10^4 f_{kp}^2 \quad (1)$$

(критическая частота в Мгц), то в области абсолютного максимума концентрации критические частоты не должны превышать десяти-пятнадцати мегагерц ( $\lambda_{kp} \approx 30 \div 20 \text{ м}$ ). Для отражения от нормального слоя  $E$  они составляют  $3 \div 5 \text{ Мгц}$  ( $\lambda_{kp} \approx 100 \div 60 \text{ м}$ ), и, как правило, не превосходят 7—8 Мгц при отражении от спорадических слоев  $E_s$ .

В 1940 г. впервые было замечено, а после 1947 г. стало вполне установленным, что вблизи зон полярных сияний отражения от некоторой части ионосферы могут иметь место на частотах, значительно больших,

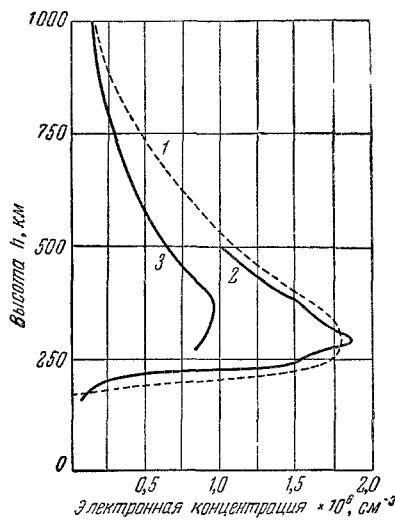


Рис. 1. Распределение электронной концентрации с высотой.

1 — по наблюдениям за радиосигналами первого советского искусственного спутника, 1957 г. (Я. Л. Альперт, Ф. Ф. Добринова, Э. Ф. Чудесенко, Б. С. Шапиро); 2 — по ракетным измерениям, 1958 г. (К. И. Грингауз); 3 — по наблюдениям третьего советского искусственного спутника, 1958—1959 гг. (К. Шмеловский, Л. Клинкер, Р. Шмит).

чем вышеуказанные, а именно, на частотах порядка  $30\text{ M}\mu$  и выше, вплоть до  $1000\text{ M}\mu$ .

Если предположить, что формула (1) может быть применена к отражениям на частотах метрового и дециметрового диапазонов в зонах полярных сияний на тех же основаниях, на которых она применяется к отражениям от регулярных ионосферных слоев, то это будет означать, что электронная концентрация в отражающих областях сияний должна превышать  $10^7\text{ см}^{-3}$  при частоте отраженных сигналов  $30\text{ M}\mu$  и  $10^8\text{ см}^{-3}$  при частотах  $100\text{ M}\mu$  и выше. Действительно ли такая концентрация электронов возникает в ионосфере во время полярных сияний? Для ответа на этот вопрос необходимо, очевидно, иметь какие-то данные о механизме «авроральных» отражений.

Априори можно говорить по крайней мере о четырех возможных механизмах: а) полное отражение от регулярной поверхности, ограничивающей область ионизации, в которой максимальная концентрация электронов выше критической для данной длины волн, а толщина переходного слоя — многое больше длины волн; б) частичное (френелевское) отражение от достаточно резкой границы раздела, за которой находится область ионизации с электронной концентрацией ниже критического значения (при толщинах переходного слоя в пределах немногих длин волн характер отражения сохраняется, но оно будет меньше френелевского); в) отражение от узкого, более или менее «симметричного» слоя, с электронной концентрацией в нем, превышающей критическое значение; отражение будет неполным в силу просачивания энергии волны сквозь слой; г) рассеяние, или некогерентное отражение от случайных неоднородностей ионизации. размеры, форма и электронная концентрация которых могут варьироваться различным образом.

Применение соотношения (1) для оценки электронной концентрации соответствует первому типу отражения, т. е. «классическому» случаю отражения от регулярных ионосферных слоев. Отражающий объект должен иметь размеры не меньше диаметра первой френелевой зоны. В силу условий радиолокационного отражения (совмещенные или близко друг к другу находящиеся антенны передатчика и приемника), отражающую поверхность надо представлять себе расположенной нормально по отношению к лучу локатора. Так как диаметр френелевой зоны для волны около  $4\text{ м}$  и расстояния порядка  $300\text{ км}$  (минимальная дальность для обычных радиолокационных отражений от полярных сияний) равен примерно  $1\text{ км}$ , то таков же должен быть и наименьший поперечник области ионизации, в которой средняя электронная концентрация имеет величину порядка  $10^7 \div 10^8\text{ электрон}\cdot\text{см}^{-3}$ . С точки зрения сведений о полярных сияниях, получаемых в результате оптических наблюдений, такие размеры областей ионизации не встречают каких-либо возражений. Действительно, как горизонтальные, так и вертикальные размеры дуг и драпри полярных сияний, не говоря о диффузных образованиях, значительно больше, чем  $1\text{ км}$ . Протяженность сияний в глубину, по-видимому, достигает сотен метров, а может быть и более. В противоречии с изложенными представлениями о строении ионизированных отражающих областей и механизме отражения оказывается оценка интенсивности отраженных сигналов. Уже на основании результатов первых наблюдений<sup>14</sup> было показано<sup>15</sup>, что мощности приходящих сигналов намного (на  $40\text{--}60\text{ дБ}$ ) меньше, чем этого требует только что описанная простая интерпретация. Очевидно, предположение о том, что при «авроральных» отражениях имеет место явление, аналогичное обычному отражению от ионосферных слоев (но на значительно больших частотах), не согласуется с основными результатами наблюдений.

Дальнейшие заключения в смысле выбора между механизмами отражений оказываются гораздо более трудными. Хотя вопрос о механизме отражения и основных физических характеристиках отражающих образований остается центральным вопросом всей проблемы и в той или иной форме обсуждается почти во всех работах, посвященных радиоотражениям от полярных сияний, однозначного ответа относительно механизма отражений, ответственного за основные черты радиоэха от полярных сияний, до сих пор нет.

Сущность затруднений, возникающих на пути интерпретации материалов наблюдений, должна стать ясной после описания самих материалов. Но прежде чем перейти к этому основному разделу статьи, следует сообщить некоторые данные о применяемых экспериментальных средствах исследования.

Для регистрации авроральных радиоэхо в первых наблюдениях использовалась радиолокационная техника метеорной астрономии. При организации в разных странах специальных станций радиолокационных наблюдений за полярными сияниями работа велась обычно с помощью незначительно переделанных стандартных локаторов. Позже начала применяться специализированная для определенных задач аппаратура, но максимальное число опубликованных результатов относится к работам с наиболее простой локационной техникой.

В силу относительной устойчивости радиоотражений от полярных сияний (по сравнению с метеорными отражениями) не только возможным, но и крайне желательным является применение направленных подвижных антенн.

На большинстве станций обеспечивается возможность вращения антенн только вокруг вертикальной оси, но в некоторых случаях — также и вокруг горизонтальной. Следует указать, что при заданной угловой ширине луча вероятность приема отражений от полярных сияний зависит от мощности и длительности импульса, возрастая пропорционально излучаемой энергии.

Таблица I содержит основные параметры радаров, обычно используемых для исследования полярных сияний (составлена по материалам следующих работ <sup>14, 16, 17-19, 21, 22, 24, 26, 30, 34, 42, 71</sup>).

Таблица I  
Характеристики радаров, использовавшихся  
для радиолокационных исследований полярных сияний

Применяемые частоты . . . . .	от 30 $M\text{гц}$ и выше (до 1000 $M\text{гц}$ )
Типы антенн . . . . .	волновой канал, параболическая
Усиление антennы . . . . .	от 4—5 до 270
Мощность передатчика . . . . .	от 5 до 100 $\text{kвт}$ (чаще всего 50—75 $\text{kвт}$ )
Чувствительность приемника . . . . .	от $10^{-12}$ до $10^{-16}$ $\text{вт}$
Длительность зондирующего импульса . . . . .	от 8 до 500 $\mu\text{сек}$
Частота повторения импульсов . . . . .	25÷60 $\text{гц}$
Типы индикаторов . . . . .	амплитудный, яркостный, кругового обзора

Первая послевоенная публикация о наблюдении радиоотражений, связанных с полярными сияниями, принадлежит Ловеллу, Клеггу

и Элиетту<sup>14</sup>. Поскольку даваемое этими авторами описание явления довольно типично для многих последующих работ, приведем из него основные факты. Установка находилась в южной Англии, в районе радиоастрономической обсерватории Джодрел-Бэнк и имела своим основным назначением исследование метеоров. Работа велась одновременно на частотах 46 и 72 Мгц. Антенны радаров имели слабую направленность (усиление относительно полуволнового диполя было равно 4). Основной лепесток диаграммы излучения был ориентирован в зенит. Отраженные сигналы, наблюдавшиеся в ночь с 15 на 16 августа 1947 г., имели большую длительность. Сигнал на частоте 46 Мгц фиксировался на экране локатора в пределах получаса; однако на частоте 72 Мгц отражения существовали лишь небольшую часть этого времени. На той и другой частоте отражения сохраняли приблизительно постоянную дальность порядка 450—480 км, хотя определенную часть времени область отражений простиралась до 600—700 км.

Одновременно с радиоотражениями визуально наблюдалось полярное сияние. Вблизи северного горизонта оно возникло в виде световых столбов за несколько часов до появления радиоотражений; в зените станции Джодрел-Бэнк появление светящегося облака совпало с началом радиоэха. Отражения прекратились приблизительно одновременно с распадом облака на отдельные полосы. Ловелл, Клегг и Элиетт сделали из этого вывод, что ими наблюдались устойчивые (на частоте 46 Мгц) отражения от области повышенной ионизации, совпадавшей с облакообразным полярным сиянием в зените. Авторы предположили, что ионизация в облаке была выше критической для частоты 46 Мгц ( $N_m > 2,6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ ), хотя, вероятно, не превышала  $6,5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ , и что дальность отражения ( $\sim 480 \text{ км}$ ) характеризовала действительную высоту полярного сияния.

Как было выяснено на основании ряда последующих работ, эти заключения оказались ошибочными. Все позднейшие наблюдения, проводившиеся с применением более узконаправленных антенн, показали, что зенитная область, как правило, не является ответственной за формирование отражений во время полярных сияний. Далее, высоту свечения 480 км следует признать чрезмерно большой для сияния того типа, какой наблюдался Ловеллом и др. Наконец, как первым указал Герлофсон<sup>15</sup>, предположение о полном отражении от ионизированного облака нельзя согласовать с оценками интенсивности отраженных сигналов.

Опуская описание ряда последующих экспериментов<sup>16—24</sup>, сформулируем основные черты явления радиоотражений от полярных сияний, какими они представляются в настоящее время.

#### а. Дальность отражений

Отраженные сигналы, как правило, приходят с расстояний 300—700 км и более. Хотя полярное сияние, наблюдаемое одновременно с отражениями, может разыгрываться в зените наблюдателя и, следовательно, расстояние до его нижней границы в таких случаях вряд ли больше 100—150 км, отражений на этих дальностях не наблюдается. Исключения из этого правила редки.

Указания на них можно найти в работе Мак-Кинли и Милмана<sup>25</sup> (Оттава), обнаруживших постоянное присутствие слабых отражений на частоте 33 Мгц при дальностях 80—90 км, и в работе Бирфельда<sup>8</sup>, наблюдавшего близ Мурманска случаи отражений с дальностями, начиная от 150 км.

### б. Типы отражений

Отраженные группы сигналов часто заполняют на экране локатора интервал дальности протяженностью в несколько сотен километров; такие

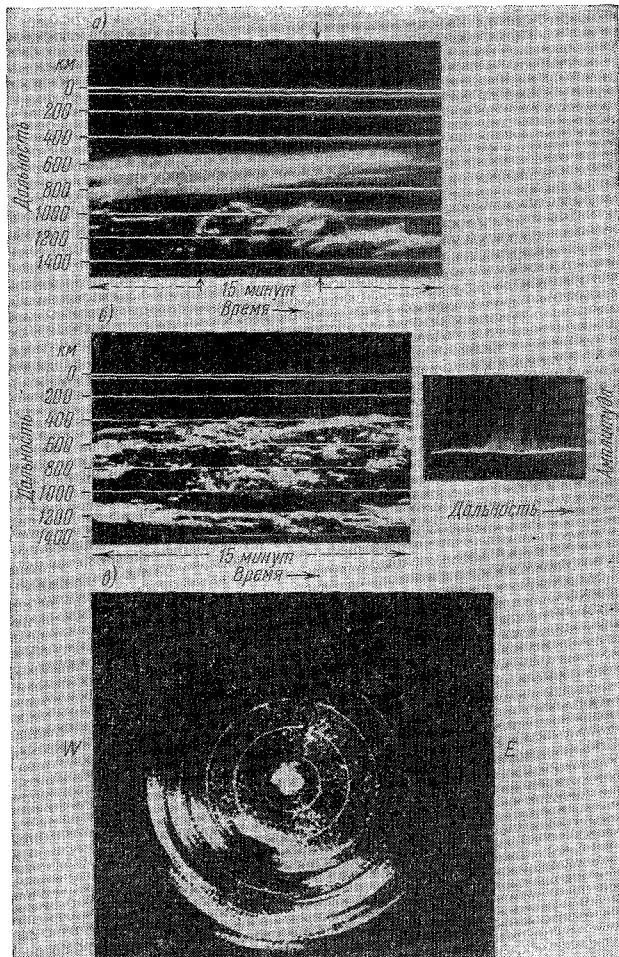


Рис. 2. Примеры регистрации радиоотражений от полярных сияний<sup>26,27</sup>.

а) Запись сигналов яркостного отметчика на непрерывно движущуюся пленку. Основной сигнал — диффузный без структуры. б) Слева — такая же запись, как и (а), но диффузный сигнал имеет структуру. Видны отдельные дискретные сигналы. Справа — сигнал на амплитудном отметчике. в) Картина сигналов на индикаторе кругового обзора. Запись сделана в южном полушарии, поэтому область отражений располагается к югу от станции.

группы сигналов получили название «диффузных отражений»; в противоположность этому сигналы, имеющие характер одиночных импульсов, носят название «дискретных отражений».

На рис. 2 приведены примеры некоторых типов отражений<sup>26,27</sup>.

### в. Характер связи с полярными сияниями

Хотя визуальные полярные сияния и радиоотражения совершенно определенно коррелируют друг с другом внутри больших отрезков времени, детальной корреляции в их временном ходе, как правило, не имеется. Изменяющаяся интенсивность радиоотражений большей частью не удается связать с последовательным развитием оптической картины сияния. Этот факт, констатируемый качественно большинством наблюдателей, был подвергнут убедительной статистической проверке в работе Гэдсдена<sup>28</sup>.

Таблица II, взятая из статьи Лайона<sup>29</sup>, дает представление о связи между наблюдаемыми формами полярных сияний и радиоотражениями. Числа во втором, третьем и четвертом столбцах означают количество десятиминутных интервалов, в течение которых наблюдателями было отмечено то или другое явление.

Таблица II

Корреляция между радиоэхо и визуальными формами полярных сияний (по Лайону<sup>29</sup>)

Формы полярных сияний	Визуальные сияния	Радиоэхо	Радиоэха отсутствовали	% визуальных форм, дающих радиоэхо
Однородные дуги .	365	18	347	5
Сложные формы дуг и полос . . . . .	174	54	120	31
Лучевые формы . .	371	52	319	14
Сияния отсутствовали . . . . .	—	4	—	—
Суммарно . .	940	124	786	14

### г. Длительность отражений

Средняя продолжительность существования отраженного сигнала на экране локатора исчисляется минутами и десятками минут. Как указывает Я. Г. Бирфельд<sup>24</sup>, иногда сигналы диффузного типа устойчиво сохраняются в течение многих часов. За это время сигналы могут менять свою форму (например, форму огибающей на развертке « дальность — амплитуда »), интенсивность, протяженность и дальность, но не исчезают с экрана. В других случаях время существования сигнала измеряется секундами (обычно это дискретные сигналы); иногда может наблюдаться сравнительно быстрое исчезновение сигналов на одних дальностях и появление их на других, соседних<sup>8, 24</sup>.

### д. Пространственное расположение областей отражений

Для станций северного полушария области, откуда приходят отражения, статистически располагаются преимущественно в северном квадранте относительно станции. Картина не зависит от того, удалена ли станция наблюдения от зоны полярных сияний в сторону низких или высоких широт, или же расположена в самой зоне. Первоначально существовавшее мнение, что области отражений располагаются симметрично относи-

тельно геомагнитных меридианов соответствующих станций, по-видимому, неверно. Наблюдения последних лет<sup>27, 30, 31</sup> заставляют связать симметрию отражающих областей скорее с локальными магнитными полями в окрестности каждой станции, т. е. с направлением магнитного склонения. На рис. 3 приведены осредненные данные для нескольких станций. Стрелкой  $\Gamma$  обозначено направление на геомагнитный полюс стрелкой  $M$  — направление магнитного склонения вблизи соответствующих станций; можно видеть, что зоны отражений группируются около последних направлений.

#### Ракурсная чувствительность отражений

При наблюдениях на среднеширотных станциях, таких как Джодрел-Бэнк, Осло, Саскатун, Рошино (Ленинград) и др., радиоотражения от полярных сияний не появляются при углах возвышения над горизонтом, больших  $10 \div 12^\circ$ . Это можно было бы объяснить тем, что в средних широтах полярные сияния вообще, как правило, не наблюдаются высоко над горизонтом. Неожиданным обстоятельством является, однако, то, что станции, расположенные в зонах полярных сияний или в непосредственной близости от этих зон, такие как Тромзе, Киуруна, Фербенкс, Лопарская (Мурманск) и др., также практически никогда не фиксируют радиоотражений под большими углами к горизонту, независимо от того, сколь интенсивны визуальные формы сияний, которые наблюдаются в моменты отражений вблизи зенита наблюдателя\*). Факт отсутствия отражений под большими углами к горизонту был тщательно проверен Харангом и Ландмарком<sup>22</sup> в Тромзе на частотах 35 и 74 МГц, и Киури, Форситом и Воутером<sup>19</sup> в Саскатуне на частотах 56 и 106,5 МГц. Направление излучения антенны могло изменяться в вертикальной плоскости от 0 до  $45^\circ$  (для 106,5 МГц — до  $90^\circ$ ), следуя за яркими визуальными формами сияний. В обоих случаях предельным углом возвышения для приема отражений оказывается угол, приблизительно равный  $15^\circ$ .

Совокупность азимутальных и связанных с углом места особенностей отражений от полярных сияний, обнаруживаемая при работе с направленным лучом, получила название «ракурсной чувствительности отражений»

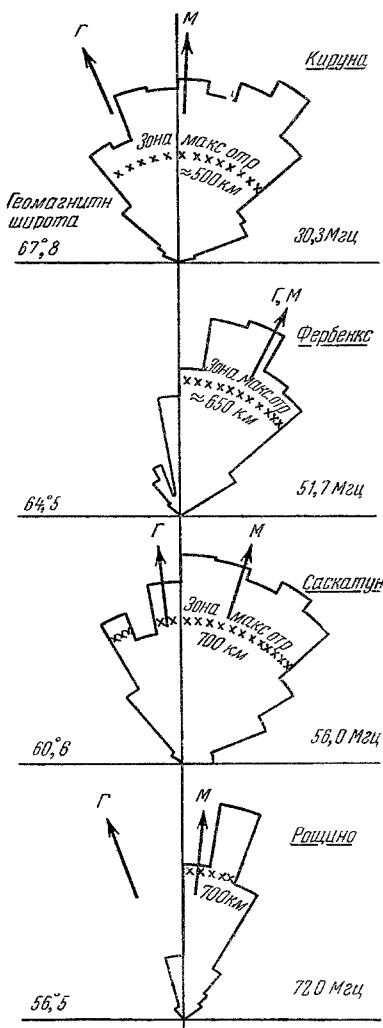


Рис. 3. Полярные диаграммы показывающие среднее распределение отраженных сигналов по азимутам для разных станций (по данным<sup>18, 30, 32</sup>)

\*). Я. Г. Бирфельд<sup>8</sup> сообщает об отдельных случаях приема зенитных отражений в Лопарской, близ Мурманска.

ж. Отождествление отражающих областей  
с визуальными особенностями структуры  
полярных сияний

Сообщения разных авторов по этому вопросу весьма противоречивы. В более ранних наблюдениях<sup>17, 18</sup> авторы пытались установить четкую связь между приходом отражений и появлением ярких форм сияний в соответствующих точках неба. Иногда подчеркивается преимущественная роль лучистых форм<sup>19, 32</sup>. Большинство позднейших работ, однако, свидетельствует о том, что прямой связи между отражающими областями и какими-либо характерными структурными особенностями визуальных форм сияний, по-видимому, не наблюдается<sup>20, 22, 29, 33, 34</sup>. Следует учесть, что в случае дальностей порядка 600—800 км, характерных для радиоотражений от полярных сияний, последние должны находиться низко над горизонтом, когда детали уже трудно различимы.

### 3. Высота отражений

При изучении полярных сияний оптическими методами весьма трудоемкой и вместе с тем важной задачей является определение абсолютной высоты свечения. Большое количество оптических измерений высот полярных сияний методом параллактической фотографии было выполнено Штёрмером и его сотрудниками<sup>35</sup> в Норвегии. Но современные фотоэлектрические методы фотометрии полярных сияний требуют быстрых определений высоты свечения. Первоначально предполагалось, что выполнение

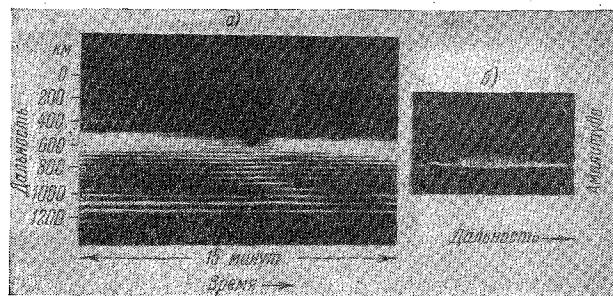


Рис. 4. Отражения от протяженного тонкого слоя, принимаемые на многолепестковую антенну (Ануин и Гэдден<sup>26, 27</sup>).  
а) — запись яркостного отметчика на движущуюся пленку; б) — картина на экране амплитудного отметчика.

этой задачи может взять на себя радиолокация. Эта цель пока не достигнута и, к сожалению, следует признать, что она вообще не достижима при использовании современных методов, по причине, указанной в пп. в и ж (отсутствие строгой корреляции видимых форм сияний с радиоотражениями).

Высота самих отражающих образований, конечно, может быть с большей или меньшей точностью определена по наклонной дальности и углу места отражений. Для повышения точности используется многолепестковость диаграмм направленности антенны. Кюрри, Форсит и Воутер<sup>19</sup>, проведя довольно кропотливый учет поправок на рефракцию и зависимость частоты появления сияний от геомагнитной широты, получили в качестве средней высоты отражающего слоя цифру, близкую к 110 км. В. Н. Довгер<sup>36</sup>, используя двухлепестковую диаграмму антенны («вольновой канал») с качающимся лучом, получил значения высот отражающих образований от 80 до 160 км, с точностью каждого измерения около  $\pm 5$  км.

Ануин и Гэдден<sup>26, 37</sup> в Новой Зеландии применяли антенну, имеющую до 21 лепестка. В большинстве случаев отраженные сигналы, обусловленные отдельными лепестками, накладывались, образуя дискретные или диффузные отражения того типа, который можно видеть на рис. 2. Но при одном типе диффузных отражений сигналы от всех лепестков получались раздельными, располагаясь последовательно на большом участке шкалы дальностей (рис. 4). По-видимому, глубина «эшелонирования» отражающих или рассеивающих неоднородностей, образующих в совокупности некоторый отражающий слой, была в этом случае достаточно малой (не более 2,5 км). Средняя высота слоя оказалась равной, по данным Ануина и Гэддена,  $110,9 \pm 3,1$  км, причем при увеличении расстояния от 400 до 1200 км вариации высоты слоя не превышали нескольких километров.

Описанные измерения, наряду с некоторыми другими, менее точными оценками позволяют в настоящее время считать более или менее установленным, что основной зоной, формирующей «авроральные» радиолокационные отражения, являются области ионосферы, приблизительно лежащие на высоте слоя *E* и нижней границы полярных сияний, т. е. примерно между высотами 90 и 120 км.

## § 2. СУТОЧНЫЙ ХОД РАДИООТРАЖЕНИЙ И КОРРЕЛЯЦИЯ ИХ С ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Совокупность результатов, указанных в предыдущем параграфе, создает картину довольно жестких условий, выполнение которых необходимо для регистрации отражений. Объяснение избирательности отражений, предложенное на основе аналогии с отражениями от метеорных следов<sup>15</sup>, заключается в предположении об анизотропии отражающих образований. Симметрия расположения отражающих областей относительно магнитного поля приводит к дополнительному выводу, что структура ионизированных областей, ответственных за радиоотражения во время полярных сияний, связана со структурой магнитного поля Земли. Это объяснение, впервые высказанное Герлофсоном<sup>15</sup>, было детально разработано Чэмпеном<sup>38</sup>. Предложенная им схема геометрических условий отражения будет рассмотрена позже (§ 4).

Связь «геометрии» авроральной ионизации с магнитным полем заставляет ожидать существования корреляции между магнитными возмущениями и параметрами, характеризующими радиоотражения

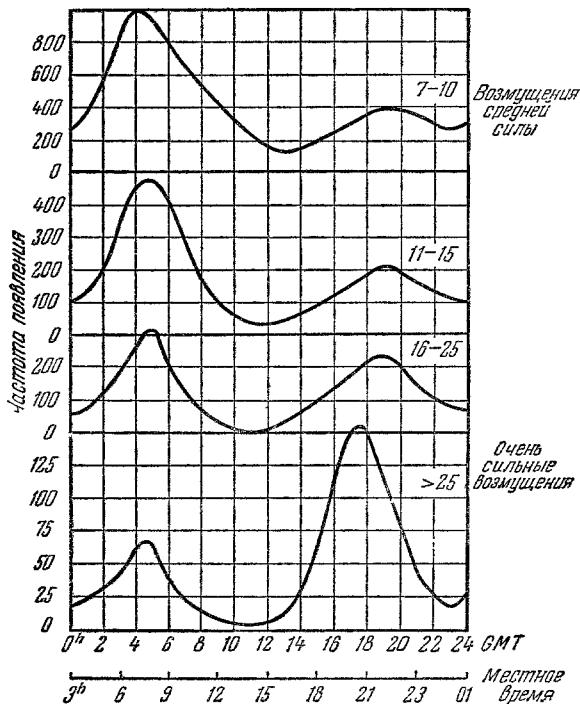


Рис. 5. Суточный ход магнитных возмущений на станции бухта Тихая (по А. П. Никольскому<sup>39</sup>). (Цифры — условный балл возмущения.)

В первую очередь следует отметить далеко идущий параллелизм между средним суточным ходом магнитных возмущений в полярных районах и вероятностью появления радиоотражений. На рис. 5, взятом из работы А. П. Никольского<sup>39</sup>, изображена зависимость от времени суток числа бухтообразных возмущений средней и большой силы для станции «бухта Тихая» за период 1933—1946 гг. Более поздние данные М. С. Боброва<sup>40</sup>, использовавшего материалы магнитных станций почти всего земного шара (данные МГГ), также показывают, что в областях, прилегающих к зонам полярных сияний, нарушается синфазность мировых магнитных возмущений, характерная для пояса средних и экваториальных широт, и что наибольшее число возмущений вблизи зон полярных сияний имеет место вочные часы.

Рисунки 6 и 7, а и б иллюстрируют статистику появления радиоотражений для нескольких станций восточного и западного полушарий<sup>41—43</sup>.

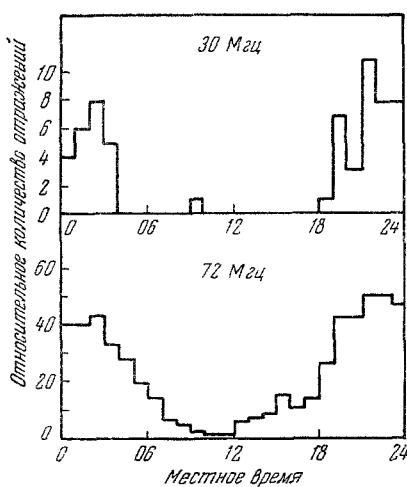


Рис. 6. Суточный ход радиоотражений на частотах 30 и 72 Мгц на ст. Лопарская (по А. И. Грачеву<sup>42</sup>).

Абсолютная величина и знак бухтообразных возмущений весьма существенно влияют на вероятность появления радиоотражений. Мик и Мак-Намара<sup>45</sup> исследовали зависимость между появлением радиоотражений и магнитными возмущениями для станции Саскатун (частоты 56 и 106,5 Мгц). Они нашли, что положительные магнитные бухты сопровождаются регулярным увеличением радиоотражений, но отрицательные бухты такого эффекта не дают.

В работах Бэллафа и Кэйзера с сотрудниками (станция Джодрел-Бэнк)<sup>21, 41, 46</sup>, В. И. Погорелова (станция Рошине близ Ленинграда)<sup>47</sup>, В. И. Ярина (Якутск)<sup>48</sup>, Гэдсдена (Новая Зеландия)<sup>49</sup> сопоставляется вероятность появления авроральных радиоотражений с абсолютной величиной магнитных возмущений. Во всех случаях уверенно получается, что вероятность появления отражений существенно увеличивается при больших магнитных возмущениях. В Джодрел-Бэнк 92 % интегральной продолжительности эха приходится на значения  $|\Delta Z| > 50 \gamma$ ; в Рошине, где геомагнитная широта больше, случаи появления эхо при  $|\Delta X| > 500 \gamma$  составляют около 70 % общего числа случаев и не более 30 % при  $|\Delta X| < 500 \gamma$ .

\*) Вопрос о дневных отражениях рассматривается в § 3

Около полуденные часы местного времени отличаются резким уменьшением числа бухтообразных возмущений и, как правило, почти полным отсутствием радиоотражений\*). Подробный статистический анализ времени наступления магнитных возмущений для большого числа полярных станций, расположенных на различных долготах и широтах, выполненный А. П. Никольским, выявил некоторые специфические, присущие отдельным арктическим станциям особенности в суточном ходе магнитных бурь. В зависимости от геомагнитных координат изменяется как количество максимумов (от одного до трех), так и время их наступления. Ход среднего числа радиоотражений по данным Я. Г. Бирфельда<sup>44</sup> во многих случаях хорошо следует и за этими особенностями суточного хода магнитных возмущений.

Знак магнитного возмущения, «предпочитаемый» радиоотражениями, на двух указанных станциях оказывается различным: в Рощине положи-

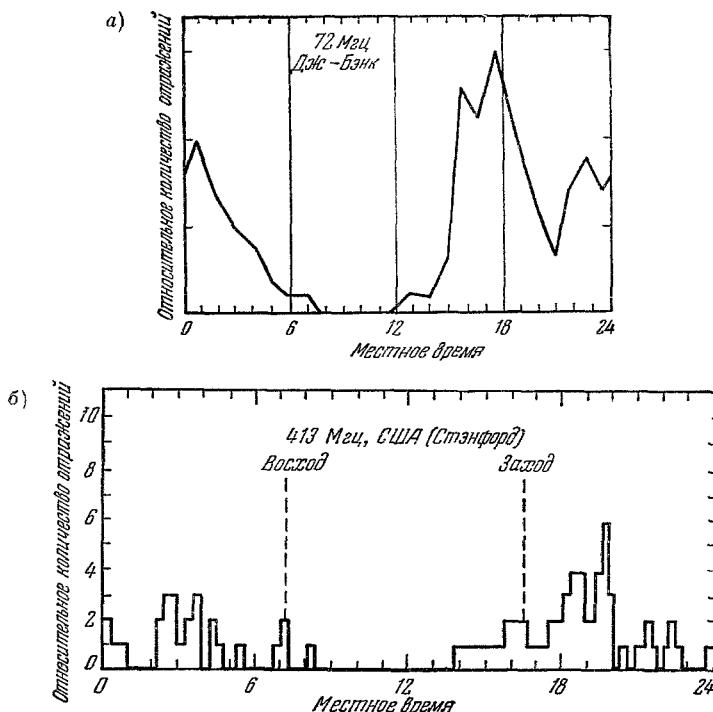


Рис. 7. а) Суточный ход радиоотражений на частоте 72 Мгц на станции Джордрел-Бэнк (по Т. Д. Кэйзеру<sup>41</sup>). б) Суточный ход радиоотражений на частоте 413 Мгц на станции Стэнфорд (по Фрикеру и др.<sup>43</sup>).

тельные бухтообразные возмущения почти никогда не сопровождаются радиоотражениями, тогда как в Джордрел-Бэнке вероятность появления отражений при положительных бухтах оказывается примерно вдвое больше, чем при отрицательных.

Для станции Якутск, как показал В. И. Ярин<sup>48</sup> на довольно большом статистическом материале, радиоотражения на частоте 72 Мгц в течение большей части суток коррелируют с отрицательными магнитными возмущениями (от уровня спокойного поля) и лишь в вечерние часы — с положительными.

Кривые рис. 8 изображают полученную Гэдденом<sup>49</sup> при исследованиях в Новой Зеландии среднюю зависимость между местным *K*-индексом магнитной активности и вероятностью радиоотражений на частоте 55 Мгц. (Пункт наблюдения имел геомагнитную широту 51°, 5 S; значения *K*-индекса брались для острова Маккуори, широта которого близка к предполагаемой

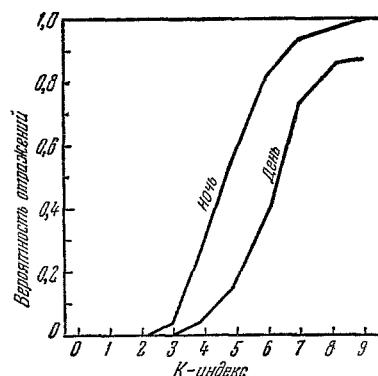


Рис. 8. Зависимость между вероятностью радиоотражений и *K*-индексом магнитной активности (по Гэддену<sup>4</sup>).

широте области отражений.) Аналогичную зависимость получил в Оттаве на частоте 50  $M\mu$  Бхаттачарайя<sup>50</sup>. Последний, однако, не обнаружил какого-либо различия в появлении отражений при положительных и отрицательных бухтах. Вероятность возникновения отражений в обоих случаях была одинаково высокой (82—86%). Бхаттачарайя также отмечает систематическое запаздывание на несколько минут момента наступления максимума магнитного возмущения по отношению к максимуму интенсивности отражений.

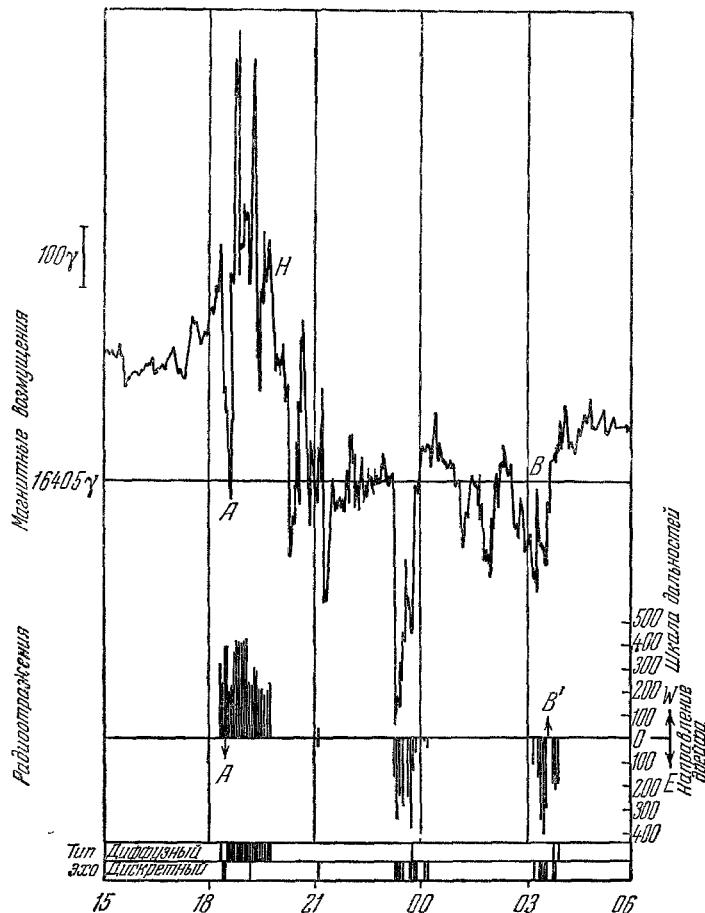


Рис. 9. Запись магнитного возмущения (вверху) и диаграмма, показывающая дальность, направление дрейфа и тип одновременных эхосигналов (внизу); по Беллафу и др.<sup>46</sup>.  
По оси абсцисс—мировое время.

Избирательность радиоотражений по отношению к знаку магнитных возмущений, согласно некоторым предположениям<sup>45, 50</sup>, связана с тем, что при отрицательных бухтах ионизация и ионосферные токи локализуются в более низких широтах, чем при положительных возмущениях. Для высоколатитудных радиолокационных станций это должно приводить к исчезновению отражений с северного (преобладающего) направления, тогда как для среднеширотных пунктов это обстоятельство, очевидно, будет менее существенным.

В качестве иллюстрации параллельного хода интенсивности радиоотражений и магнитных бухт приводим одну из магнитограмм Баллафа, Дэвидсона, Кэйзера и Уоткинса<sup>46</sup>, на которой ход интенсивности и направление дрейфа фронта отражений сопоставляются с ходом магнитного возмущения (рис. 9). Как видно из этого рисунка, отражения на станции Джодрел-Бэнк коррелируют с бухтами обоих знаков, но вместе со знаком бухты изменяется направление дрейфа отражений. Это обстоятельство согласуется с приведенной выше интерпретацией Бхаттачарая<sup>50</sup>.

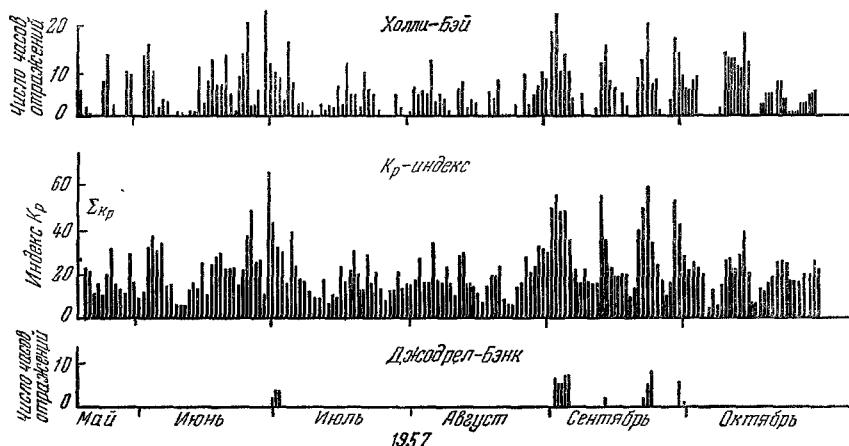


Рис. 10. Сопоставление изменений числа радиоотражений с изменениями магнитной активности (по Харрисону и Уоткинсу<sup>51</sup>).

Вверху — радиоотражения (число часов в сутки) на станции Холли-Бэй, внизу —то же на станции Джодрел-Бэнк. В середине — дневные суммы планетарного К-индекса.

В 1957 г. были впервые начаты наблюдения за радиоотражениями в Антарктиде. На рис. 10, опубликованном Харрисоном и Уоткинсом<sup>51</sup>, изображено для станции Холли-Бэй (географические координаты  $75^{\circ}, 5^{\circ}$  S и  $26^{\circ}, 6^{\circ}$  W) распределение числа часов приема отражений по дням в течение шести месяцев работы станции (верхняя диаграмма). Ниже даны распределение суточных сумм планетарного  $K_p$ -индекса ( $K_p$ ) и диаграмма приема отражений за тот же период на станции Джодрел-Бэнк. Бросается в глаза почти полное совпадение первых двух диаграмм: число часов, в течение которых в определенный день удается наблюдать радиоотражения, пропорционально степени магнитной возмущенности дня. Нижняя диаграмма рис. 10 говорит о такой же закономерности и для станции Джодрел-Бэнк, хотя из-за среднеширотного расположения этой станции вероятность приема радиоотражений там значительно меньше по сравнению с Холли-Бэй.

В 1959 г. советскими исследователями Б. Е. Брюнелли и С. М. Сандуленко велись радиолокационные наблюдения за полярными сияниями на станции Мирный<sup>51</sup>. Локатор имел частоту 72  $M\text{c}\mu$  и мощность в импульсе 75 квт. Мирный находится внутри южной зоны полярных сияний, а плоскость магнитного меридиана проходит через станцию в направлении восток — запад. Максимальное число радиоотражений наблюдается с востока, т. е. со стороны магнитного полюса, в хорошем согласии с правилом ортогональности отражения (см. § 4), если за действующее поле на высотах около 100 км принять локальное, но не геомагнитное поле. Распределение дальностей отражений, принимаемых в Мирном, дано на рис. 11. Согласно вычислениям Брюнелли и Сандуленко высоты точек отражения,

удовлетворяющих условию ортогональности, оказываются ниже 80 км для всех дальностей (к востоку от станции), исключая расстояние  $\sim 600$  км. С этим обстоятельством, по мнению авторов, связано и положение максимума у 600—800 км. Вычисления были сделаны, однако, без учета изменения магнитного наклонения с высотой, что в случае локального поля, по-видимому, не вполне верно; в действительности истинные высоты могут быть близки к 100 км, если считать, что наклонение на  $1^{\circ},5$  меньше принятого в расчете.

Результаты радионаблюдений позволяют также заключить о статистической корреляции авроральных радиоотражений с суточными вариациями невозмущенного магнитного поля Земли. Одним из легко регистрируемых параметров является средняя скорость перемещения отражающих образований по отношению к наблюдателю. Перемещение сигналов хорошо видно на экране амплитудного индикатора<sup>24</sup>. Еще удобнее смещение фронта отражений измеряется путем фотографирования экрана яркостного отметчика на непрерывно движущуюся пленку. Бэллаф и Кэйзер с сотрудниками<sup>41</sup> на станции Джодрел-Бэнк, анализируя статистику изменения радиальных составляющих скоростей фронта отражений, нашли существование закономерности, изображенной на рис. 12. Смещение отражающих образований происходит в направлении от наблюдателя в вечерние часы по местному времени, прекращается около 21 часа (в это время число отражений минимально), после чего меняет знак на обратный. Максимального значения средние скорости фронта отражений достигают примерно в 16 часов ( $+600$  м/сек) и в 03—06 часов ( $-600$  м/сек). В период 06—15 часов не наблюдается отражений. С ходом изменения скорости смещения фронта сигнала коррелирует ход среднего значения вертикальной составляющей ( $Z$ -компоненты) магнитного поля в районе, близком к положению области отражений (кривая (б) на рис. 12). Вариация  $\Delta Z$  также обращается в нуль и меняет знак около 21 часа по местному времени. Исходя из этого, Бэллаф и Кэйзер интерпретируют радиальные скорости, фиксируемые локатором как проекции восточно-западного движения ионизированных образований вдоль линий геомагнитной широты.

В. И. Погореловым<sup>52</sup> на станции Рощино близ Ленинграда обнаружена другая статистическая закономерность, а именно, корреляция средней дальности отражений с вариациями спокойного магнитного поля. На рис. 13

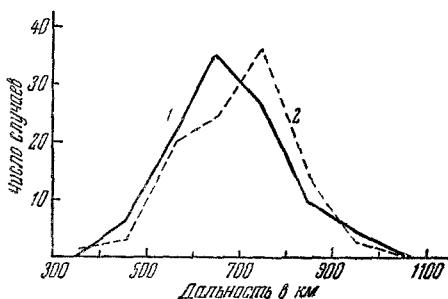


Рис. 11. Распределение средних дальностей радиоотражений на станции Мирный (по Брюнелли и Сандуленко<sup>31</sup>).

1—март, май и 2—апрель 1959 г.

изображенный на рис. 12. Смещение отражающих образований происходит в направлении от наблюдателя в вечерние часы по местному времени, прекращается около 21 часа (в это время число отражений минимально), после чего меняет знак на обратный. Максимального значения средние скорости фронта отражений достигают примерно в 16 часов ( $+600$  м/сек) и в 03—06 часов ( $-600$  м/сек). В период 06—15 часов не наблюдается отражений. С ходом изменения скорости смещения фронта сигнала коррелирует ход среднего значения вертикальной составляющей ( $Z$ -компоненты) магнитного поля в районе, близком к положению области отражений (кривая (б) на рис. 12). Вариация  $\Delta Z$  также обращается в нуль и меняет знак около 21 часа по местному времени. Исходя из этого, Бэллаф и Кэйзер интерпретируют радиальные скорости, фиксируемые локатором как проекции восточно-западного движения ионизированных образований вдоль линий геомагнитной широты.

В. И. Погореловым<sup>52</sup> на станции Рощино близ Ленинграда обнаружена другая статистическая закономерность, а именно, корреляция средней дальности отражений с вариациями спокойного магнитного поля. На рис. 13

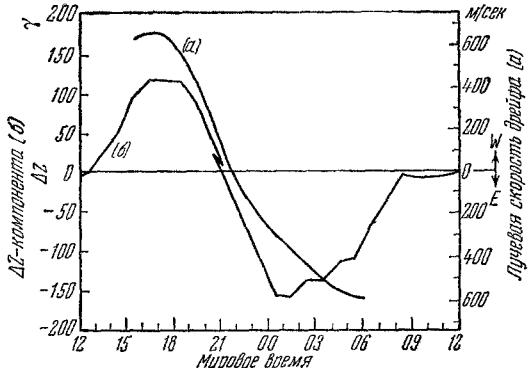


Рис. 12. Лучевая скорость дрейфа радиоотражений (a) и вариации  $Z$ -компоненты магнитного поля (б) (по Кэйзеру<sup>41</sup>).

изображен суточный ход изменения дальности отражений, принимаемых в Рошино, и ход одновременного изменения горизонтальной составляющей магнитного поля в зоне, близкой к области отражений. По мнению автора, изменение дальности отражений можно интерпретировать как непосредственный результат изменения наклона магнитных линий к земной поверхности в той области, откуда приходят отражения. Это в свою очередь вызывает смещение точек, удовлетворяющих условиям ортогональности.

Некоторые оптические наблюдения довольно наглядно демонстрируют реальную возможность местных изменений кривизны магнитных линий во время полярных сияний. Так, например, Эббот<sup>53</sup> наблюдал в процессе развития короны (зенитная форма полярного сияния) смещение точки радианта лучей сияния на величину до  $7,5^\circ$ , хотя в это же время основные магнитные элементы, измеренные у поверхности земли, оставались почти неизменными.

Помимо непосредственной и тесной корреляции с магнитными возмущениями (и периодическими вариациями), по-видимому, можно констатировать определенную корреляцию радиоотражений с солнечной активностью. На существование такой зависимости указывает Я. Г. Бирфельд<sup>8</sup>, который, сопоставив результаты наблюдений приблизительно за пять лет (1954—1959 гг.), приходит к выводу, что по мере приближения к максимуму солнечной активности, число и интенсивность радиоотражений возрастают. Очевидно, эта тенденция вполне соответствует закономерности, уже давно установленной для магнитных возмущений и полярных сияний.

Таким образом, доступный анализу материал наблюдений позволяет констатировать, что между магнитными возмущениями и появлением аномалий в полярной ионосфере, выражающихся в наличии «авроральных» радиоотражений, имеет место несомненная корреляция. Можно думать, что в результате вторжения корпускулярных потоков ионосфера в зоне полярных сияний и околополюсной области приобретает ряд новых свойств, отсутствующих в более спокойные периоды и не отмечающихся на других широтах.

### § 3. СВЯЗЬ РАДИООТРАЖЕНИЙ С НЕКОТОРЫМИ ОСОБЕННОСТЯМИ СПОРАДИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИИ ВБЛИЗИ ЗОН ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Наряду с существованием «авроральных» радиоотражений полярная ионосфера характеризуется также другими аномалиями. К ним относятся повышенная интенсивность спорадической ионизации типа  $E_S$ ,  $E_{2S}$ ,  $F_S$ , аномальное поглощение и др.

Подробное рассмотрение вопроса о спорадической ионизации не входит в задачи данной статьи, но краткий обзор наблюдающихся в высоких широтных областях закономерностей  $E_S$ -ионизации представляется полезным в связи с наличием определенной корреляции ее с радиоотражениями.

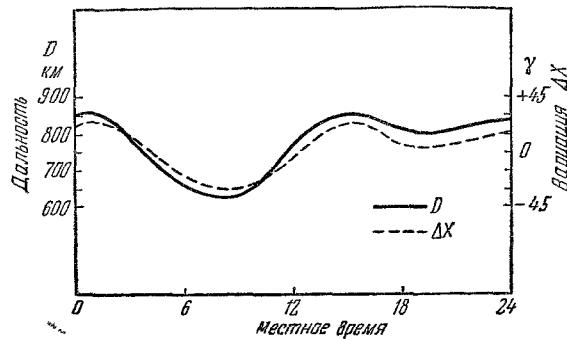


Рис. 13. Корреляция средней дальности отражений с вариациями магнитного поля ( $X$ -компоненты) (по Погорелову<sup>52</sup>).

Сporадическая ионизация в полярных районах значительно более интенсивна, чем в каких-либо других областях<sup>54—56</sup>. Спорадические слои на высотах от 100 до 150 км возникают там более часто и существуют в среднем более продолжительное время. Установленным фактом можно считать, что ход интенсивности  $E_S$ -ионизации в высоких широтах контролируется геомагнитным временем. На это одним из первых обратил внимание В. М. Дриацкий<sup>56</sup>, указавший, что максимум  $E_S$ -ионизации, по данным арктических станций восточного полушария, совпадает примерно с геомагнитной полуночью. Пендорф и Коронити<sup>56</sup> получили тот же результат для западного полушария, указав, что он справедлив только для станций, лежащих севернее зоны полярных сияний. Максимум  $E_S$ -ионизации для станций, лежащих в зоне полярных сияний, соответствует, как правило, времени до местной полуночи, причем разброс для отдельных станций может достигать  $\pm 2$ —3 часов.

Как и «авроральные» радиоотражения на УКВ-частотах, спорадические  $E_S$ -образования в зоне полярных сияний почти не наблюдаются в дневные часы суток. Это относится, по данным Пендорфа и Коронити<sup>56</sup>, одинаково к  $E_S$ -отражениям с предельными частотами  $f_{E_S} > 5$  Мгц и  $f_{E_S} > 7$  Мгц. Такое поведение  $E_S$ -ионизации подтверждается другими наблюдателями. Я. И. Фельдштейн<sup>57</sup>, ведший наблюдения на о-ве Диксон, указывает, что ночные слои  $E_S$  (он их обозначает как  $E_H$ ) обычно полностью исчезают в дневное время даже в периоды сильных магнитных возмущений.

Аналогичный суточный ход появления  $E_S$ -отражений в Мурманске наблюдали в течение ряда лет Р. А. Зевакина и З. Ц. Ращопорт<sup>54</sup>. Вероятность появления  $E_S$  в ночные часы, как пишут эти авторы, достигала 90 %, а максимум  $E_S$ -отражений совпадал с местной полуночью.

Интересные данные, основанные на обработке наблюдений на станции СП-3 (1954—1955 гг.), сообщают В. М. Дриацкий и А. С. Беспрозванная<sup>55</sup>. Станция СП-3 дрейфовала внутри зоны полярных сияний; часть времени она находилась в непосредственной близости к географическому полюсу. Средняя магнитная возмущенность в районе полюса была много ниже, чем за тот же период в зоне полярных сияний (бухта Тикси, о-в Диксон).

Постоянный слой  $E$  полностью отсутствовал в зимние месяцы, когда Солнце было ниже 10,5° под горизонтом. Спорадический слой  $E_S$  (а также расположенный несколько выше слой  $E_{2S}$ ) наблюдался во все периоды года, хотя предельные частоты  $f_{E_S} > 7$  Мгц фиксировались значительно реже, чем  $f_{E_S} > 3$  Мгц. Осредненные данные позволяют заключить о корреляции между суточным ходом магнитной возмущенности ( $r_H^v$ ) и поведением  $E_S$ : увеличению  $f_{E_S}$  соответствовал рост магнитной активности. По-видимому, определенное положение максимума во времени, характерное для менее высоких широт, на станции СП-3 не наблюдалось, что может быть связано как с перемещением станции, так и с ее положением внутри зоны полярных сияний. Наиболее часто  $E_S$ -отражения появлялись в утренние часы по местному времени на станции СП-3.

Таким образом, характер распределения спорадических  $E_S$ -отражений во времени вблизи зоны полярных сияний и севернее этой зоны коренным образом отличается от суточного хода  $E_S$ -отражений в южных широтах (см., например,<sup>58</sup>), где максимум появления  $E_S$  почти всегда приходится на дневные околополуденные часы.

Поэтому авторы приведенных выше работ<sup>54—57</sup> единодушно сходятся на том, что главным фактором, обусловливающим спорадическую ионизацию в полярных районах, является корпускулярная радиация

Солнца, т. е. тот же агент, который служит причиной возникновения полярных сияний и магнитных возмущений. Очень веским дополнительным аргументом в пользу того, что корпускулярные потоки играют решающую роль в формировании полярной ионосферы, являются, по мнению В. М. Дриацкого и А. С. Беспрозванной<sup>55</sup>, некоторые наблюдавшиеся ими особенности поведения слоя  $F_2$ , например, большие значения и частая изменчивость в зимний период критических частот  $f_{0F_2}$  в окополюсном районе.

Были сделаны некоторые попытки найти прямую корреляцию между спорадической  $E_S$ -ионизацией и визуально наблюдаемыми полярными сияниями (а также и магнитными возмущениями). Можно указать работы Кнхекта<sup>59</sup>, Ф. Я. Зaborщикова и Н. И. Федякиной<sup>60</sup>, Я. И. Фельдштейна<sup>57</sup>. В первой из этих работ, проводившейся в Барроу (Аляска),

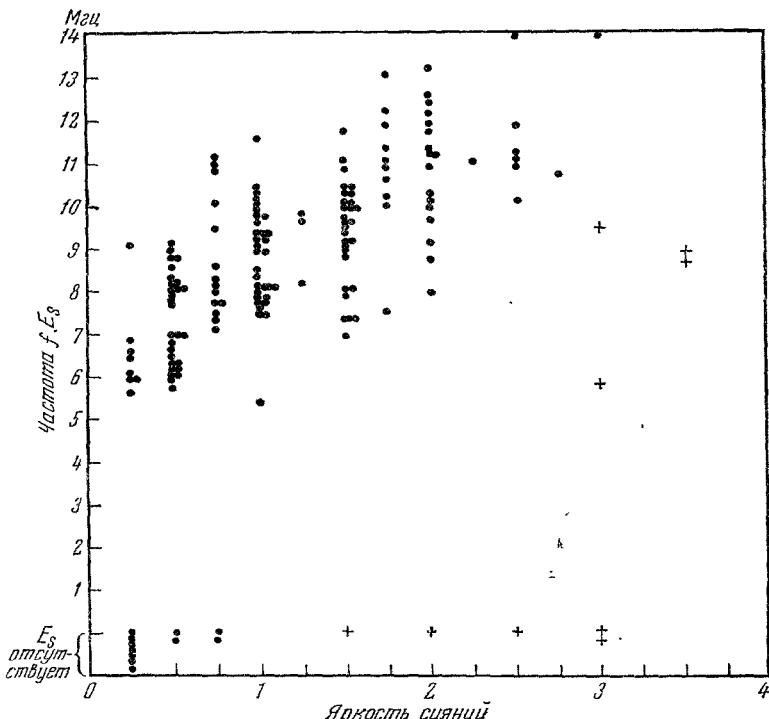


Рис. 14. Зависимость между предельной частотой  $f_{ES}$  и яркостью сияния (по четырехбалльной шкале) (по Кнхекту<sup>59</sup>).

было исследовано 10 ночей в период значительной активности полярных сияний (весенне-равноденствие). Итоги исследований Кнхекта можно свести к следующему:

а) Если полярное сияние наблюдалось близко к околосенитной области и по своей визуальной яркости не относилось к числу исключительно сильных (балл < 4 по четырехбалльной шкале), то можно было установить отчетливую корреляцию между яркостью сияния и предельной частотой отражений от слоя  $E_S$  (рис. 14). Частота  $f_{ES}$ , а следовательно, и электронная концентрация увеличиваются с ростом интенсивности полярного сияния.

б) Имелись исключения из этого правила, а именно: отражения от спорадических слоев не наблюдались, во-первых, при очень слабых

сияниях (балл  $\cong 1/4$ ), во-вторых, при мощных сияниях с баллом, достигающим 4. Последний факт можно объяснить сильным ростом поглощения в коротковолновом диапазоне во время интенсивных вспышек «авроральной» активности.

в) Минимальными частотами  $f_{ES}$ , наблюдавшимися во время полярных сияний, являются 5,5–6 Мгц (аппаратура обладала чувствительностью в диапазоне 1–15 Мгц).

Анализируя эти данные, Кнект считает возможным предположить, что вторжение корпуксуллярных потоков вызывает специфическую «авроральную» ионизацию  $E_a$ , существенно большую, чем спорадическая ионизация  $E_S$ , не связанная с полярными сияниями. Результаты, близкие к описанному, но анализируемые менее подробно, приводятся и в работе<sup>60</sup>. Наконец, согласно Фельдштейну<sup>57</sup>, «авроральный» тип  $E_S$ -ионизации ( $E_{Sa}$ ) всегда сопровождается занимающим обширную площадь полярным сиянием в зенитной области.

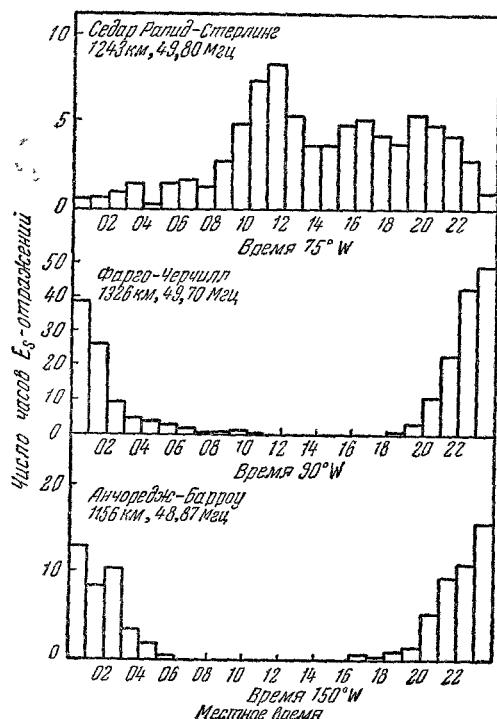
Существенное отличие в природе среднеширотной и «авроральной» спорадической ионизации довольно характерно проявляется в исследованиях по дальнему ионосферному распространению УКВ. Вопрос этот изучался, например, в работе Бейли и др.<sup>7</sup>. В тех случаях, когда каналы связи проходили через зону полярных сияний, всплески амплитуды непрерывного сигнала наблюдались, как правило, совсем в другие часы суток, чем в случае среднеширотных трасс, что видно на рис. 15, взятом из работы<sup>7</sup>.

На среднепиротной трассе Седар Рапид — Стерлинг (протяженность 1243 км, частота сигнала за счет появления  $E_S$ -ионизации) вероятность отражений этого типа довольно велика и в остальное время суток (верхняя часть рис. 15). Для трасс, расположенных близ зоны сияний (две нижние гистограммы на рис. 15), только в течениеочных часов наблюдается аномально интенсивное « $E_{Sa}$ -распространение»; днем появление этого типа отражений совершенно исключено. Такой суточный ход находится в полном согласии с вероятностью появления  $E_{Sa}$ -ионизации в зоне полярных сияний и весьма похож на суточное распределение радиоотражений, приведенное на рис. 6 и 7. Это совпадение можно понять, если допустить, что в обоих случаях действует один и тот же регулирующий фактор, роль которого, по всей вероятности, играют солнечные корпуксуллярные потоки.

Рис. 15. Вероятность прохождения сигналов за счет  $E_S$ -отражений на разных трассах в различные часы суток (по Бейли и др.).

49,8 Мгц) увеличение интенсивности происходит преимущественно днем, хотя вероятность отражений этого типа довольно велика и в остальное время суток (верхняя часть рис. 15). Для трасс, расположенных близ зоны сияний (две нижние гистограммы на рис. 15), только в течениеочных часов наблюдается аномально интенсивное « $E_{Sa}$ -распространение»; днем появление этого типа отражений совершенно исключено. Такой суточный ход находится в полном согласии с вероятностью появления  $E_{Sa}$ -ионизации в зоне полярных сияний и весьма похож на суточное распределение радиоотражений, приведенное на рис. 6 и 7. Это совпадение можно понять, если допустить, что в обоих случаях действует один и тот же регулирующий фактор, роль которого, по всей вероятности, играют солнечные корпуксуллярные потоки.

Распространение УКВ вблизи зоны полярных сияний (особенно в периоды сильных возмущений) характерно также тем, что оно сопрово-



ждается значительными колебаниями средней интенсивности сигнала и увеличением частоты федингов, которая возрастает от единиц до сотен герц<sup>2, 7, 32</sup>. (Отметим интересный опыт, проведенный Джеймсом и др.<sup>61</sup> для изучения поведения сигнала при прохождении через «авроральную» зону возмущения. Была использована линия передачи с отражением от Луны. Передатчик мощностью 10 квт, работавший на частоте 440 Мгц, располагался в Колледже, приемник — в Оттаве. Было обнаружено, что в периоды большой активности полярных сияний увеличивается уровень федингов и возникают быстрые флуктуации направления плоскости поляризации отраженного сигнала. Увеличения поглощения обнаружено не было \*).)

Представление о характере физических процессов в ионосфере во время вторжений корпскулярных потоков дает одновременная запись изменения силы сигнала на двух частотах во время полярного блек-аута<sup>7</sup> (рис. 16). Резкое ослабление сигнала на частоте 28 Мгц при этом ионосферном возмущении сопровождалось увеличением интенсивности сигнала на частоте 49 Мгц при начале блек-аута; понижение уровня космических радиошумов (на том же рисунке внизу) фиксирует наступление и конец блек-аута. Ослабление сигнала на частоте 28 Мгц означает резкий скачок поглощения, происходящего, по-видимому, на уровне слоя D; если бы одновременно не наблюдалось увеличение рассеяния в слое E (что видно из поведения сигналов на 49 Мгц), скачок был бы еще большим. Такое сочетание явлений, т. е. мощное поглощение на коротких волнах и одновременное усиление отражения в коротковолновой части УКВ-диапазона, совпадающее по времени с началом магнитной бури и появлением полярных сияний, характерно для условий распространения в полярной ионосфере.

Специальное исследование особенностей «аврорального» распространения ультракоротких волн в диапазоне около 40 Мгц и сопоставление их с магнитными возмущениями выполнено Форситом с сотрудниками<sup>63-65</sup>. Исследование подвергались трассы, расположенные в достаточной близости к зоне полярных сияний, либо пересекающие ее. Расстояния между передающими и приемными пунктами были порядка 800—1200 км; можно было считать, что радиосвязь между этими пунктами осуществлялась за счет ионосферного распространения, с отражением волны приблизительно в середине траектории. Работа велась при непрерывном излучении. На приемных пунктах автоматически регистрировалась интенсивность

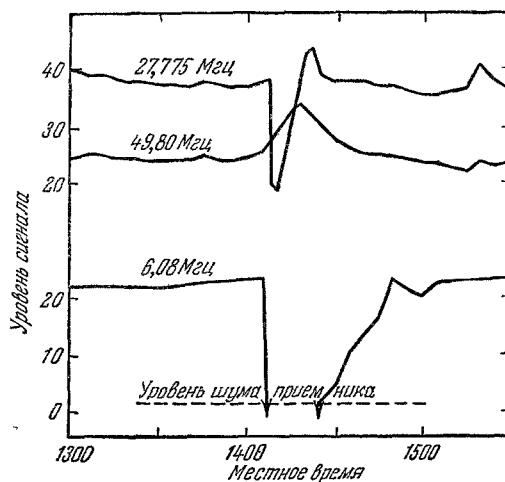


Рис. 16. Вариации уровня сигналов на частотах 27,775 и 49,80 Мгц во время полярного блек-аута.  
Нижняя кривая — уровень космических шумов на частоте 6,08 Мгц (по Бейли и др.<sup>7</sup>).

\*) Изменения состояния поляризации при отражении от ионизированных областей полярных сияний исследовались в ряде работ (см.<sup>62</sup>). Как правило, наблюдается почти полная деполяризация отраженного сигнала. Интенсивность отраженных сигналов мало зависит от того, в какой плоскости (вертикальной или горизонтальной) поляризовано излучение антенны передатчика.

приходящего сигнала. Авторы исследовали и классифицировали все основные случаи возрастания интенсивности отраженных сигналов; их оказалось возможным разделить на несколько групп, выделив следующие типы отражений:

Тип Е. Внезапное значительное усиление уровня сигнала продолжительностью от одного до трех часов. Сигналы от метеоров пропадают на фоне возросшей амплитуды непрерывного сигнала передатчика. Однако уровень сигнала не остается постоянным, а подвергается медленным и глубоким замираниям. При этом типе ионосферного возмущения вблизи трассы не замечается признаков магнитного возмущения.

Тип S. Сравнительно медленное, многочасовое усиление уровня сигнала, сопровождающееся учащением замираний. Метеорные сигналы остаются видимыми на фоне увеличенной амплитуды сигнала передатчика. Сопутствующих магнитных возмущений не наблюдается.

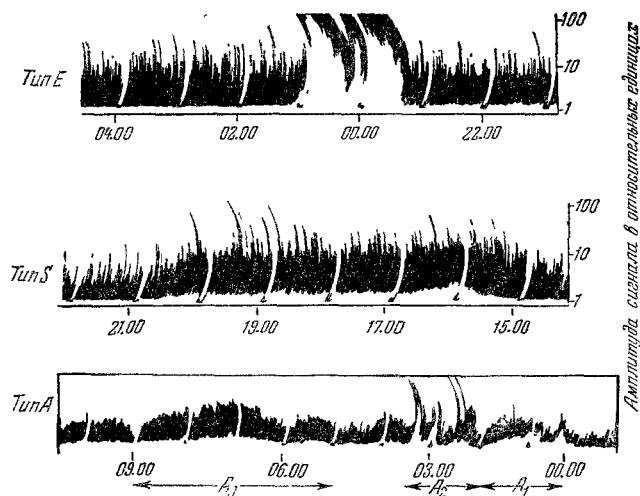


Рис. 17. Запись поведения непрерывного сигнала с частотой 39,22  $M\mu$  на трассе Гринвуд—Оттава при различных типах ионосферных возмущений (по Коллинзу и Форситу<sup>64</sup>).

Отдельные частые пики — метеорные сигналы.

Типы  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ . Общим для них является наличие одновременных магнитных возмущений. При этом при отражениях типа  $A_1$  происходит резкое и значительное усиление сигнала, сопровождающееся быстрыми замираниями; при отражениях типа  $A_2$  наблюдается, как и в случае  $A_1$ , резкое усиление сигнала, но сопровождаемое медленными и глубокими замираниями; наконец, отражение типа  $A_3$  носит такой же характер, как и в случае типа S, однако одновременно имеет место магнитное возмущение. Примеры регистрации всех этих типов отражений изображены на рис. 17. При отражениях типа E и S не наблюдалось одновременного развития полярных сияний; сияния почти не появлялись также при отражениях типа  $A_3$ . Отражения  $A_1$  и, особенно,  $A_2$  сопровождались в значительном числе случаев полярными сияниями.

Продолжение опытов при несколько пониженной чувствительности аппаратуры (см. работу Форсита, Грина и Ма<sup>65</sup>) подтвердило целесообразность предложенной классификации и неслучайный ее характер. Но при меньшей чувствительности основными остались отражения типа S

и  $A_2$  (в дальнейшем обозначаемые просто  $A$ ). «Авроральные» отражения типа  $A$  оказались определенно тяготеющими к зоне полярных сияний и имеющими максимум в оклополуподочные часы местного времени. S-отражения имели явно выраженный дневной максимум (12—14 часов местного времени), а в зоне полярных сияний оказались несколько менее частными, чем при отражениях южнее и севернее этой зоны. Так как передача и прием велись с помощью направленных антенн, опыты Форсита и др. позволили, до известной степени, выяснить, как различаются во всех перечисленных случаях геометрические условия отражения. Предваряя обсуждение вопроса о геометрии отражений (см. § 4), укажем, каковы результаты этих опытов. При отражениях типа  $A_1$  и  $A_2$  обнаружилась зависимость отражения от угла встречи луча радиолокатора (его волнового вектора) с магнитной силовой линией. Для  $A_1$  этот угол оказался очень мало отличающимся от  $90^\circ$ , что в свете гипотезы Герлофсона — Чэпмена означает отражение, близкое к зеркальному, для  $A_2$  отклонения от угла зеркального отражения достигали  $30$ — $40^\circ$ .

В случае отражений прочих типов ( $A_3$ , E, S) никакой селективности отражений по отношению к какому-либо углу отражения не наблюдалось.

Отражения типа E, по мнению авторов, не связаны с полярными сияниями и магнитными возмущениями и являются результатом прохождения ионизированных облаков нормального типа  $E_S$ . Сходство отражений типов S (без магнитных возмущений) и  $A_3$  (сопровождаемых магнитными возмущениями) означает сходство в структуре ионизированных образований, по-видимому, слабоанизотропных. Природу ионизирующего фактора, ответственного за появление S-отражений и, возможно, не связанного с зоной полярных сияний, авторы оставляют открытой. Появление отражений типа A происходит, по мнению Коллинза и Форсита<sup>64</sup>, в результате проникновения корпуксуллярных потоков. Слабую анизотропию ионосферных неоднородностей в случае отражений  $A_3$  они связывают с фактом турбулентного перемешивания на сравнительно низких уровнях ионосферы, где упорядочивающее воздействие магнитного поля не может существенно проявиться. Исходя из такого предположения, отражения типов  $A_1$  и  $A_2$ , характеризующиеся существенной анизотропностью отражающих образований, авторы относят к большим высотам, чем  $A_3$ , и приписывают их воздействию на ионосферу корпуксуллярных потоков значительной интенсивности.

В заключение параграфа кратко рассмотрим некоторые данные о дневных отражениях. Как уже указывалось (§ 1), для большинства станций общим правилом является резкое уменьшение числа отраженных сигналов (или даже полное их исчезновение) в дневное время, примерно между 9 и 14 часами местного времени. Этот факт не тривиален, поскольку такой ход авроральных радиоотражений заранее не является очевидным. В первый период исследований нередко делались оптимистические прогнозы о том, что невидимые днем полярные сияния, быть может, окажется возможным обнаруживать и изучать при помощи радиолокационных отражений. Специфический суточный ход вероятности отражений сделал эти предположения бесперспективными. Учитывая все обстоятельства корреляции радиоотражений с магнитными возмущениями и полярными сияниями, можно, по-видимому, сделать важный, хотя пока предварительный вывод о том, что «дневных полярных сияний» на земном шаре, как правило, не происходит. Еще несколько лет назад это утверждение невозможно было подкрепить какими-либо прямыми доказательствами; отсутствие полярных сияний днем можно было объяснять просто невозможностью их наблюдать. (Известна, например, попытка Патона и Эллисона<sup>66, 67</sup>

наблюдать сияние в районе Исландии во время полного солнечного затмения 1954 г. Ими не было замечено признаков сияния.) Вместе с тем стоит отметить, что для теории полярных сияний и магнитных бурь, опирающейся на представления о вторжении в атмосферу корпускулярных потоков, трудности интерпретации в настоящее время не уменьшились, а увеличились. Если теория Штёрмера довольно легко справлялась с объяснением прихода корпускул на ночную, неосвещенную Солнцем сторону Земли, то включение в рассмотрение радиационных поясов Земли — резервуаров корпускул в ближайшем околоземном космическом пространстве — усложняет дело. Законы «вытряхивания» корпускул из радиационных поясов в моменты их неустойчивости значительно менее ясны, чем закономерности вторжения корпускул прямых солнечных потоков.

Можно считать, что хотя резко выраженный дневной минимум радиоотражений в зоне полярных сияний пока не объяснен, он во всяком случае подчеркивает корпускулярную природу агента, ответственно го за комплекс «авроральных» процессов.

Редкая наблюдаемость радиоотражений днем является лишь общим правилом. Для отдельных станций это не совсем так. Есть станции, где днем отражения наблюдаются довольно регулярно, хотя интенсивность дневной активности обычно меньше, чем ночной. Трудно решить, какую роль здесь играют характеристики аппаратуры, ее чувствительность и другие параметры. Мы уже упоминали об S-отражениях Форсита и др.<sup>64, 65</sup>. Аналогичные наблюдения при наклонном зондировании (трасса Кэми — Кируна длиной 310 км; частота 92,8 Мгц) описывают Эгеланд, Хультквист и Ортнер<sup>68</sup>. Ими зафиксирован дневной максимум в 12—16 часов местного времени, причем характер дневных иочных сигналов аналогичен.

Я. Г. Бирфельд<sup>44</sup> дал обстоятельную сводку особенностей приема дневных отражений на ряде станций Советского Союза и указал также на наблюдавшиеся им вслески отражений в дневные и утренние часы в периоды хромосферных вспышек<sup>8</sup>. Интересные данные сообщают Преснелл и др.<sup>34</sup> о радиозондировании сияний в Колледже (Аляска) на сверхвысоких частотах (216; 398 и 780 Мгц). Отражения на первых двух из этих частот регулярно возникали параллельно с отражениями на частоте 41 Мгц, причем двум типам сигналов (диффузные и дискретные) соответствовали совершенно определенные условия появления. Дискретные сигналы наблюдались только в то время, когда область формирования отражений не была освещена Солнцем. Диффузные сигналы, наоборот, возникали преимущественно в дневные часы. В отличие от наблюдений Форсита<sup>64, 65</sup>, обоим типам отражений соответствовало усиление магнитной активности. Работа на очень высоких частотах позволила авторам выявить резко различный характер структуры отражающих областей при двух указанных типах сигналов: дискретным, ночным сигналам соответствовала вертикально протяженная отражающая поверхность (образующие этой поверхности, по-видимому, были параллельны силовым линиям земного магнитного поля), тогда как при диффузных сигналах отражения происходили от горизонтально-протяженного слоя. Высота отражений в обоих случаях отвечала уровню слоя E ионосферы.

В литературе можно найти и некоторые другие указания на наблюдение дневных УКВ-радиоотражений<sup>5, 69</sup>; часть таких сообщений исходит от наблюдателей, работавших в большом удалении от зоны полярных сияний, в средних или даже тропических широтах. Всех этих материалов пока недостаточно для заключений о природе «дневных» УКВ-отражений.

#### § 4. ГЕОМЕТРИЯ РАДИООТРАЖЕНИЙ

Как было указано в § 1, главными особенностями «геометрии» радиоотражений от полярных сияний являются: отсутствие отражений под сколько-нибудь значительными углами к горизонту, сосредоточение дальностей преимущественно за пределами 400—500 км (с тенденцией роста дальностей для более высокоширотных станций) и расположение отражающих областей в основном в северном квадранте относительно станции, независимо от географической широты станции (если иметь в виду северное полушарие).

Так как было констатировано, что высоты, на которых возникают «авроральные» отражения, соответствуют примерно высотам слоя  $E$ , то первые два обстоятельства, очевидно, связаны друг с другом. Верхний предел дальностей (около 1200—1400 км) для прямых отражений может определяться тем обстоятельством, что более далекие области скрыты за горизонтом наблюдателя.

Для объяснения «ракурсных» особенностей ионосферных отражений, связанных с магнитными возмущениями и полярными сияниями, предложено несколько гипотез. Основой общепринятой интерпретации является гипотеза Герлофсона — Чэпмена, прочие представляют сейчас только исторический интерес.

Так, Форсит, Кюрри и Воутер<sup>19</sup> выдвигали предположение, что угловый эффект обусловливается сильным поглощением в слое, располагающемся непосредственно ниже зон отражения. Однако величина необходимого поглощения, по-видимому, не реализуется в действительности. Согласно Мак-Кинли и Милману<sup>25</sup> ослабление космических шумов, наблюдаемое во время полярных сияний, достигает в соответствующем частотном диапазоне лишь нескольких децибел, тогда как ослабление, требуемое гипотезой Форсита и др., должно достигать десятков децибел.

По вычислениям Чэпмена и Литтла<sup>70</sup> увеличение поглощения на высотах 80—90 км составляет во время полярных сияний примерно 2,5 дБ на частоте 30 Мгц.

Харанг и Ландмарк<sup>22</sup>, основываясь на некоторых особенностях наблюдавшихся ими отражений на двух различных частотах, предположили, что радиоэхо во время полярных сияний возникают в результате двойных отражений от земной поверхности и ионосферы. Угловой эффект, по мнению Харанга и Ландмарка, определяется не анизотропией отражающих образований, а существованием различных предельных углов падения при работе на разных частотах. В практике радиопередачи этот эффект хорошо известен и учитывается «фактором МПЧ» (максимальной применимой частоты). Наблюдавшиеся Харангом и Ландмарком частотные особенности отражений не подтвердились при последующих опытах.

Принятое в настоящее время большинством исследователей объяснение «ракурской чувствительности» впервые предложено Герлофсоном<sup>15</sup>. В развитие этой идеи Чэпмен<sup>38</sup> опубликовал работу, содержащую формулы, таблицы и графики для расчета «геометрии радиоотражений». Согласно гипотезе Герлофсона — Чэпмена «ракурсная чувствительность» радиоотражений от полярных сияний, как и особенности отражения от метеорных следов, объясняется анизотропией отражающих ионизированных образований. Фактором, контролирующим характер анизотропии, служит в случае полярных сияний магнитное поле Земли. Предполагается, что отражающие центры «авроральной» ионизации располагаются вдоль силовых линий поля, образуя вытянутые вдоль них структуры. Если допустить близкий к зеркальному характер отражения на пограничных поверхностях, то легко объясняется ракурсная чувствительность. Как

и в случае метеорного следа, оптимальные условия отражения будут соответствовать случаю взаимной ортогональности радиолуча и отражающей поверхности.

В работе Чэпмена<sup>38</sup> рассчитаны геометрические места точек отражения, дающие конфигурацию и положение «авроральных отражающих поверхностей» для различно расположенных наблюдателей. Чэпмен рассматривает только поле центрированного диполя и не делает попытки более строго учесть реальное поле Земли; он не учитывает также рефракции радиоволны в тропосфере и нижних слоях ионосферы. Основные результаты расчетов Чэпмена иллюстрируются рис. 18–20.

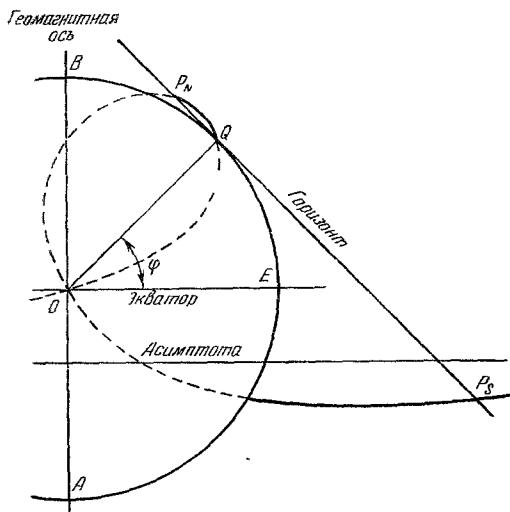


Рис. 18. Меридиональное сечение чэпменовской поверхности, отвечающей условию ортогональности  $(Hr)=0$  (по Чэпмену<sup>38</sup>).

алгебраическим уравнением третьей степени. На рис. 18 изображено сечение этой поверхности меридиональной плоскостью (проходящей через *Q* и через диполь) для точки *Q*, имеющей геомагнитную широту  $\varphi=45^\circ$ . Часть кривой, показанная пунктиром, расположена под поверхностью Земли, и, очевидно, для проблемы радиоотражений не интересна.

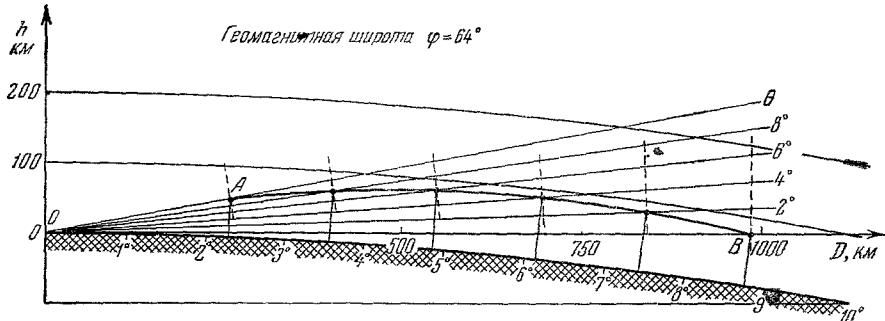


Рис. 19а. Чэпменовская отражающая поверхность (меридиональное сечение) для станции с геомагнитной широтой  $\varphi=64^\circ$ .  
*OD* — горизонт наблюдателя, на котором отложен масштаб дальности в километрах,  
 $\theta$  — угол места. Пунктиром показано направление линий геомагнитного поля.

Участки кривой, расположенные ниже линии *P\_N—P\_S*, т. е. ниже горизонта наблюдателя (тоже в первом приближении), не активны с точки зрения создания отражений. Лишь участки, расположенные над горизонтом наблюдателя, содержат точки, прием отражений от которых возмож-

жен. Для этого, однако, необходимо, чтобы в соответствующих областях пространства имелась достаточная ионизация. Последнее означает, что практически, по-видимому, можно учитывать только те части чэпменовской поверхности, которые расположены не ниже 80—90 км над поверхностью Земли. На рис. 19а и 19б изображены для станций наблюдения

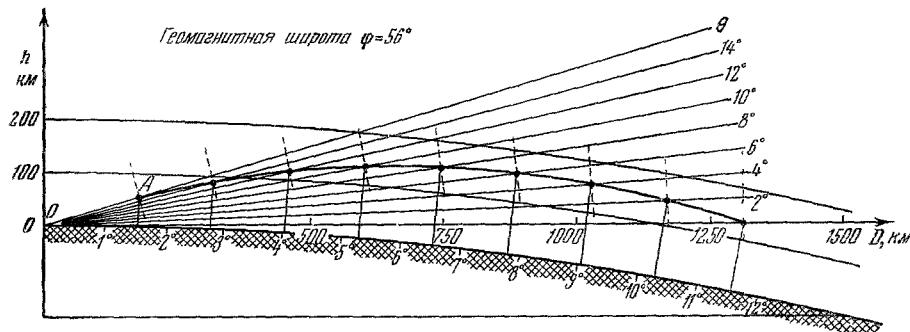


Рис. 19б. Чэпменовская отражающая поверхность (меридиональное сечение) для геомагнитной широты  $\varphi = 56^\circ$ ; (см. также подпись к рис. 19а).

и  $\varphi = 64^\circ$  и  $\varphi = 56^\circ$  участки меридиональной кривой, лежащие в сторону высоких широт от наблюдателя. Чэпмен обсуждает возможность прихода отражений также от экваториальных зон (участок  $P_S$  кривой рис. 18), но реально такие отражения не наблюдались.

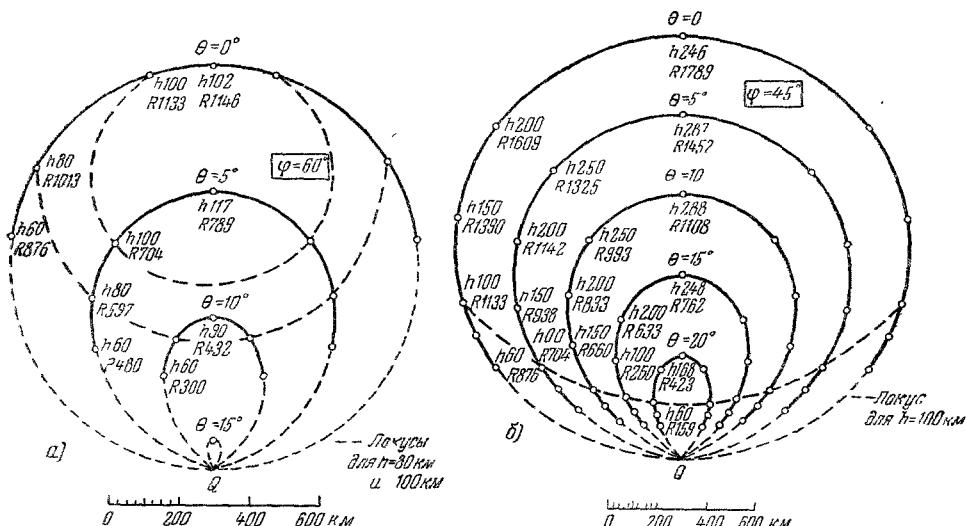


Рис. 20. Сечения чэпменовской поверхности плоскостями с данным углом возвышения  $\theta$  в меридиональной плоскости (сплошные кривые) и концентрическими с земной поверхностью сферами с заданным расстоянием от земной поверхности  $h$  (крупный пунктир). а)  $\varphi = 60^\circ$ , б)  $\varphi = 45^\circ$ .

Цифры при буквах  $h$  и  $R$  означают высоту и дальность соответствующей точки в километрах (по Чэпмену 38).

Сечение чэпменовской поверхности горизонтальной плоскостью, содержащей точку наблюдения, дает кривую, близкую к кругу, для  $\varphi$  не слишком малых (см. на рис. 20 кривые  $\theta = 0$  для  $\varphi = 60^\circ$  и  $\varphi = 45^\circ$ ).

При сечении плоскостями с заданным углом возвышения  $\theta$  (в меридиональной плоскости) точки отражения лежат на овалах. Наконец, сечение чэпменовских поверхностей сферами радиуса  $R_0 + h$  (где  $R_0$  — радиус Земли), концентрическими с земной поверхностью, дает так называемые «чэпменовские локусы», т. е. положение точек оптимального отражения, соответствующих заданной высоте отражения  $h$  (на рис. 20, а пунктиром изображены локусы для высот  $h = 80$  км и  $h = 100$  км; на рис. 20, б — локус для высоты  $h = 100$  км). Если отражающие ионизированные ауроральные области локализованы действительно в некотором узком интервале высот, «локус» дает пространственное положение зоны, ответственной за отражения.

Вопрос о происхождении анизотропии ионизации не рассматривается в работе Чэпмена. Однако и Герлофсон, и Чэпмен, как и некоторые другие авторы, считают само собою разумеющимся, что ионизация вдоль линий земного магнитного поля может непосредственно создаваться в результате движения вторгающихся в атмосферу корпукул. Иной концепции в этом вопросе придерживается Букер, соображения которого будут рассмотрены в § 5.

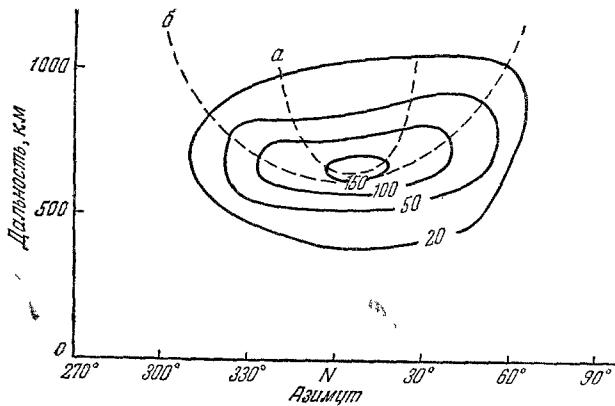


Рис. 21. Положение точек равной вероятности отражений, в координатах азимут—дальность, с нанесенным чэпменовским локусом (а) и локусом, построенным на основе картины реального магнитного поля (б). N — географический север (по В. И. Погорелову<sup>20</sup>; станция Рощино близ Ленинграда).

«Схема Чэпмена» явилась превосходным рабочим инструментом и с большим успехом используется при интерпретации результатов радионаблюдений полярных сияний. Поэтому можно думать, что лежащие в ее основе идеи правильны. Вместе с тем очевидно, что она содержит и существенную идеализацию. Это видно из того, что в ряде случаев наблюдаемая «геометрия отражений» не укладывается в схему Чэпмена. Среднеширотные наблюдения соответствуют ей значительно лучше, чем высокоширотные. Так, большая часть отражений, получаемых в Мурманске, Колледже (Аляска), или Тромзе (Норвегия), должна быть интерпретирована при помощи схемы Чэпмена как отражения от поверхностей, расположенных ниже 80—85 км (см. рис. 19а), что соответствует лишь уровню минимальных высот полярных сияний, и существенно ниже действительно наблюдавшихся высот отражений.

Если земное магнитное поле на уровне 100—150 км не рассматривать как поле центрированного диполя, то для ряда станций чэпменовское условие ортогональности выполняется гораздо лучше. Такая замена идеи-

лизированного «геомагнитного поля» картиной силовых линий, связанных с локальной структурой поля у поверхности Земли, проделана в работах Погорелова<sup>30</sup>, Ануина<sup>26, 27</sup> и в ряде других (рис. 21 и 22).

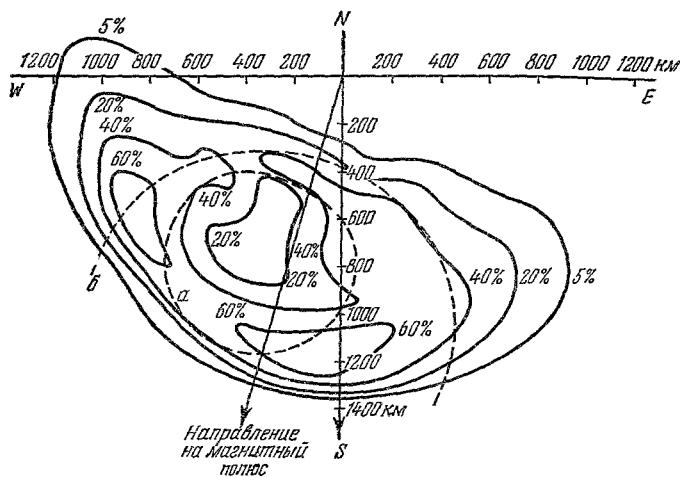


Рис. 22. Кривые, аналогичные рис. 21, для станции Инверкартилл (Новая Зеландия) (по Ануину<sup>27</sup>).

*a* — чэпменовский локус, *b* — локус, построенный в соответствии с локальным магнитным полем

Второе обстоятельство, требующее уточнения в теории Герлофсона — Чэпмена, это учет реальных индикаторов рассеяния ионизированных «авроральных» образований. Если отвлечься от выделенных Коллинзом и Форситом<sup>64</sup> специальных типов отражений под большими углами ( $30^\circ \div 40^\circ$ ), то по наблюдениям большинства авторов (см., например,<sup>19, 26, 27, 31, 34, 71</sup>) отклонение отраженного луча от условий ортогональности обычно не превосходит  $5 \div 15^\circ$ . Делая наиболее простое для расчета предположение, что форма отражающих образований может быть описана эллипсоидом вращения (сфериондом), и что размеры последнего велики по сравнению с длиной волны, Кэйзер<sup>41</sup> получил приблизительное представление о соотношении полуосей эллипса (считая, что ось последнего совпадает с направлением силовой линии). На рис. 23 приведена зависимость эффективного сечения от соотношения полуосей и угла падения волны. Отношение полуосей  $1 : 10$  соответствует резкому понижению отражающей способности при углах падения, больших  $5^\circ$ , к оси сфероида, а отношение полуосей  $1 : 5$  может объяснить случаи более медленного ослабления интенсивности отражений в пределах примерно  $15^\circ$ .

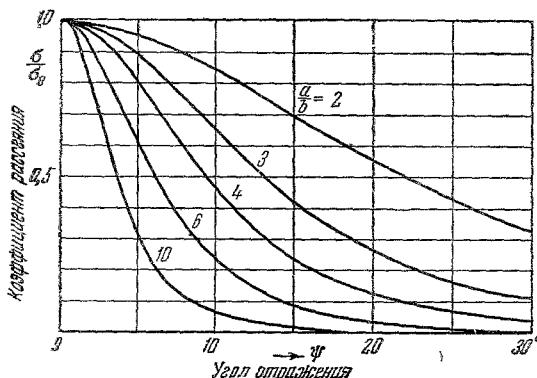


Рис. 23. Относительное эффективное сечение в зависимости от соотношения полуосей сфероида и угла отражения  $\psi$ .

$\frac{a}{b}$  — отношение вертикального и горизонтального размеров сфероида (по Кэйзеру<sup>41</sup>).

Как уже было указано (§ 1), Кэйзер и группа исследователей радиоотражений, работающая на станции Джодрел-Бэнк<sup>21, 41, 46</sup>, придерживается особой точки зрения на пространственное расположение «авроральных» отражающих объемов. Эти авторы полагают, что ни «чэпменовский локус», ни «локус», определяемый на основе локального магнитного поля, не соответствуют пространственному расположению отражающих образований. По мнению Кэйзера и др., наблюдаемую картину изменения дальностей эха в зависимости от азимута правильнее можно объяснить расположением отражающих центров вдоль некоторой фиксированной геомагнитной параллели. Для подтверждения строятся диаграммы дальность — азимут. Диаграмма рис. 24 из работы Кэйзера<sup>72</sup> действительно плохая

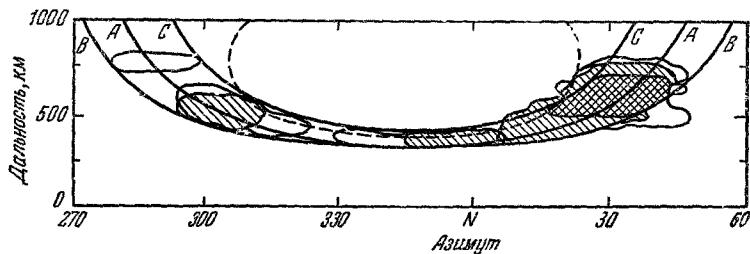


Рис. 24. Пространственное положение отражающих областей (в координатах дальность—азимут) для станции Джодрел-Бэнк (по Кэйзеру<sup>72</sup>).

Пунктир — «чэпменовский локус»; А — геомагнитная параллель, В, С — граници, определяемые углом раствора диаграммы излучения антенны локатора.

увязывается с «чэпменовским локусом» и лучше соответствует предположению о широтном протяжении зоны отражений. Однако на приводимой в той же работе диаграмме для станции Стэнфорд (США) этот эффект почти не выявляется. К вопросу о пространственном расположении отражающих областей и причинах «ракурсной чувствительности» вновь возвращается в недавней работе Форсит<sup>33</sup>. Как уже было указано, Форситу и его коллегам не удалось доказать существования сильного поглощения в области ниже зоны отражений, и при интерпретации результатов исследований с непрерывным излучением и бистатической (двухпозиционной) установкой<sup>63, 64</sup> эти авторы присоединились к гипотезе отражения от ориентированных по магнитному полю сфериоидов для тех случаев, когда в опыте наблюдалась ракурсная чувствительность.

В работе 1960 г. Форсит предлагает иное объяснение. По его мнению, ясно выраженная связь, существующая между некоторой частью сияний и радиоотражениями, позволяет допустить, что области отражений и оптического свечения действительно совпадают, хотя это может быть и не всегда очевидно для наблюдателя. Преимущественные формы сияний — дуги и полосы — обычно вытянуты на многие сотни километров в широтном направлении, но при этом имеют малую глубину (порядка 1 км). Более редкими являются сложные формы сияний в виде петель, завитков и т. д. Статистическая вероятность приема отражений, при прочих равных условиях, пропорциональна интенсивности отраженных сигналов. Если считать, что имеет место некогерентное рассеяние, интенсивность отраженного сигнала будет зависеть (при фиксированной длительности зондирующего импульса и заданных угловой ширине луча и расстоянии до цели) от поперечника «цели» и ее глубины, т. е. от величины рассеивающего объема<sup>8, 33, 73</sup>. Простые «плоские» формы сияний находятся в выгодном для создания отражений положении, если луч направлен приблизительно по

нормали к ним, т. е. примерно по азимуту «север» или «юг»; наоборот, азимуты «восток» и «запад» характеризуются малой вероятностью отражений от однородных дуг независимо от расположения станции. В противоположность этому, сложные «неплоские» формы сияний, которые встречаются реже, будут с равной вероятностью обеспечивать отражения по всем азимутам. Учитывая эти соображения и принимая во внимание также широтный фактор в появлении сияний, автор пытается рассчитывать статистику появления радиоотражений для станций Саскатун и Колледж, не пользуясь никакими предположениями о микроструктуре отражающих ионизированных образований.

Соображения Форсита вряд ли могут вызвать какие-нибудь возражения, однако они до конца не объясняют, почему для станции Колледж (геомагн. широта  $64^{\circ}$ ), находящейся очень близко к максимуму зоны сияний, сохраняется, по данным наблюдений, резкое преобладание прихода отражений с севера и нет соответствующего максимума отражений на юге. Какой фактор в расчете Форсита для Колледжа должен подчеркивать эту преимущественность северного магнитного азимута, остается из работы не ясным, и, таким образом, приведенные соображения не снимают полностью вопроса о специфической анизотропной структуре авроральных отражающих образований.

### § 5. ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ

Если не считать схемы отражений Чэпмена, устанавливающей связь между «ракурсной чувствительностью» и структурой магнитного поля, на пути физической интерпретации наблюданной картины отражений сделано пока очень мало.

Параметром, который наряду с данными о корреляционных связях с другими геофизическими явлениями, представляет наибольший интерес для выяснения сути процессов, является электронная концентрация. После того как в предыдущих параграфах было дано описание основных характеристик явления, естественно вернуться к вопросу (поставленному в начале статьи) о реальных значениях электронной концентрации в ионизированных образованиях, ответственных за УКВ-отражения в авроральных зонах.

Сложный характер преобладающей части отраженных сигналов (диффузные отражения), увеличенная частота федингов при дальнем ионосферном распространении УКВ через зоны полярных сияний, сильная деполяризация отраженных волн, отмечаемая при авроральных эхо,— все это является свидетельством весьма сложной и изменчивой структуры ионосферы в областях авроральных возмущений. Некогерентный характер отражения отчетливо проявляется во многих характеристиках радиоэха от полярных сияний. Рассеяние на флуктуирующих ионосферных неоднородностях нужно считать поэтому важнейшим элементом механизма рассматриваемых радиоотражений. Вместе с тем этот механизм, по-видимому, не исчерпывается рассеянием на случайных неоднородностях или исчерпывается не во всех случаях. Об этом говорит существование слабо искаженных сигналов в виде дискретных эхо, продолжительность которых бывает иногда достаточно велика. Упорядоченность структуры авроральных ионизированных образований отчетливо проявляется в наличии ракурсной чувствительности отражений. Наконец, существуют отдельные наблюдения (например, вышеупомянутые наблюдения Ануина и Гэдсдена<sup>37</sup> с многолепестковой антенной), которые непосредственно свидетельствуют о том, что в определенные моменты времени в отражающей зоне присутствуют протяженные и четко фиксированные слои. Вероятнее

всего, что в формировании отражений участвуют, накладываясь в различных комбинациях друг на друга, все типы отражений, перечисленные в § 1, в отдельных же случаях может преобладать тот или иной механизм. Сочетание когерентных и некогерентных отражений делает задачу вычисления значений электронной концентрации весьма не простой.

Проиллюстрируем некоторыми расчетами те результаты, которые получаются при попытках воспользоваться как представлениями о регулярном отражении, так и представлениями о некогерентном рассеянии.

Как уже было указано (§ 1), Ловелл, Клегг и Эллиett<sup>14</sup>, первыми наблюдавшие «авроральные» радиоотражения на экране радиолокатора, полагали, что имеют дело с полным отражением от ионизированного облака.

Герлофсон<sup>15</sup>, оценивая интенсивность наблюдавшихся отраженных сигналов, показал, что предположение о регулярном отражении можно принять лишь при очень малом коэффициенте отражения порядка  $\varrho = 5 \cdot 10^{-7}$ , что означает, при несущественной роли поглощения, что отражающее образование почти прозрачно для радиоволны частоты 46 Мгц<sup>\*</sup>). Электронную концентрацию нетрудно рассчитать, приняв резкой границу отражающей области (френелевское отражение) и показатель преломления мало отличающимся от единицы. Формула Френеля в «ионосферном» написании имеет вид ( $R$ —амплитудный коэффициент отражения)

$$|R| = \varrho^{1/2} = \frac{e^2 N}{4\pi m^2} \quad (3)$$

( $N$ —электронная концентрация,  $f$ —частота,  $e$ ,  $m$ —заряд и масса электрона). Для электронной концентрации получим при указанном значении  $\varrho$  величину

$$N \cong 7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

Она оказывается в 2—3 раза ниже концентрации в слое  $E$  в дневное время, что, по-видимому, означает полную неприменимость предположения об отражении на резкой границе раздела. Низкое значение коэффициента отражения, согласно Герлофсону, может являться также результатом нерезкости границы. Нетрудно показать, что при размытии границы коэффициент отражения уменьшится пропорционально множителю

$$C = \left| \frac{1}{N_0} \int \frac{dN}{dx} e^{i \frac{4\pi x}{\lambda}} dx \right|, \quad (4)$$

где  $dN/dx$ —градиент концентрации в переходной области,  $N_0$ —электронная концентрация вдали от границы. Если аппроксимировать переходный слой формулой

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{a \sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{a^2}}, \quad (5)$$

<sup>\*</sup>) Мощность сигнала на входе радиолокационного приемника при отражении от плоской поверхности может быть вычислена по формуле

$$P_r = P_t \frac{G_t A Q}{16\pi D^2}, \quad (2)$$

где  $P_r$ —принимаемая мощность,  $P_t$ —излучаемая мощность,  $G_t$ —усиление передающей антенны,  $A = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi}$ —эффективная площадь приемной антенны,  $D$ —расстояние до объекта,  $Q$ —коэффициент отражения. При  $P_t \cong 50 \text{ квт}$ ,  $P_r \cong 1 \cdot 10^{-13} \text{ вт}$ ,  $D \cong 500 \text{ км}$ ,  $\lambda = 6 \text{ м}$  для  $Q$  получается примерно указанная цифра.

то, интегрируя, получим

$$C = e^{-\frac{8\pi^2 a^2}{\lambda^2}}, \quad (6)$$

откуда следует, что толщина переходного слоя должна быть порядка нескольких метров ( $a \approx 3 \text{ м}$ ), если  $C \approx 10^{-6}$ .

Возможность такой структуры поверхности отражающего слоя Герлофсон допускает, хотя и считает, что неоднородность со столь большим градиентом должна довольно быстро ( $< 20 \text{ мкм}$ ) рассасываться в ионосфере.

Как можно видеть, эти оценки носят весьма приближенный характер. Однако флуктуации градиентов электронной плотности в зоне отражений, по-видимому, действительно могут приводить к неустойчивости амплитуд отраженных сигналов и непостоянству формы огибающей на амплитудно-временной развертке, что особенно подчеркивает в ряде работ Я. Г. Бирфельд <sup>8,44</sup>.

Эспинол и Хоукинс <sup>16</sup> результаты своих наблюдений интерпретировали, также основываясь на гипотезе о френелевском отражении. Аналогичная (3) формула для отражения от поверхности двойной кривизны имеет вид

$$P_r^{1/2} = \frac{k_0^{1/2} \lambda}{D_0} \left[ \frac{ab}{(a+D_0)(b+D_0)} \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Здесь  $a$  и  $b$  — радиусы кривизны поверхности ( $a, b \gg \lambda$ ), а  $k$ , в соответствии с (2), равно

$$k = \frac{P_t^{1/2} G}{8\pi}, \quad (8)$$

где  $P_t$  — излучаемая мощность,  $G$  — усиление антенны локатора.

В случае плоской поверхности раздела Эспинол и Хоукинс получили, как и Герлофсон, электронную концентрацию порядка  $N \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Но френелевское отражение от цилиндра с радиусами кривизны  $a = \infty$  и  $b = 1 \text{ км}$  приводит уже к концентрации  $N = 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Существование таких цилиндров или столбов ионизации допустимо с точки зрения оптических наблюдений: поперечник порядка 1 км имеют длинные вертикальные лучи полярных сияний. Эспинол и Хоукинс не рассматривают случай отражения от объединения многих подобных образований (лучи в драпри или лучистой полосе), хотя такой случай должен быть более типичен, если исходить из вероятнейших условий корреляции радиоотражений с визуальной картиной сияний. Но расчет отражения от перегулярной решетки такого типа, очевидно, содержал бы в себе слишком много произвола, если вообще мог бы принести какую-то пользу.

Хельгрен и Меос <sup>18</sup> в аналогичном расчете отражения от цилиндрической поверхности при частоте 30 МГц получили для электронной плотности значение  $2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Дополнительно ими было измерено среднее время флуктуаций сигнала. Если эффективный коэффициент рекомбинации в слое  $E$  во время полярного сияния имеет обычное значение около  $1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ , то время релаксации ( $\tau = 1/\alpha N$ , где  $\alpha$  — коэффициент рекомбинации,  $N$  — электронная плотность) оказывается равным примерно 45 сек. Таков же, по Хельгрену и Меосу, и средний период флуктуаций отраженного сигнала, что подтверждает, по мнению авторов, правильность их оценки  $N$ .

Вычисление среднего коэффициента отражения от некоторой регулярно отражающей поверхности и соответствующего среднего значения

электронной концентрации производил Сид<sup>71</sup> (радиообсерватория в Новой Зеландии). Путем относительной калибровки интенсивности сигналов, соответствующих разным дальностям, автор пытался выяснить общий характер формы отражающей поверхности. Ослабление, приблизительно соответствующее закону  $D^{-2}$ , позволило автору считать, что отражения возникают от некоторой плоскости или совокупности дискретных излучателей, распределенных по плоскости. Формулы, уже приведенные выше, дают при этом для коэффициента отражения значение порядка

$$q \approx 2 \cdot 10^{-7},$$

а средняя электронная концентрация оказывается находящейся в пределах

$$2,4 \cdot 10^4 < N < 7,5 \cdot 10^4 \text{ (см}^{-3}\text{).} \quad (9)$$

Автор не предполагает, что такая концентрация однородно распределена по большому объему, а считает рассеивающую поверхность состоящей из дискретных когерентно рассеивающих излучателей. Наблюдаемому азимутальному распределению сигналов лучше всего удовлетворяет совокупность цилиндрических излучателей. О размерах и пространственном распределении их автор никаких заключений не делает, так же как и об истинной электронной концентрации в них (не исключается и критическая).

Рассмотрению условий некогерентного отражения (рассеяния) и выяснению параметров рассеивающих неоднородностей посвящен ряд работ, в основном опубликованных в более позднее время. Возможности оценки значений электронной концентрации на основании непосредственных данных радиоотражений кажутся в этом случае довольно неясными. Кэйзер<sup>41</sup> высказывает в пользу гипотезы о полном (критическом) отражении от неоднородностей, связанных с полярными сияниями, основываясь, например, на следующих соображениях. Во-первых, при гипотезе о частичном отражении значения концентраций, близкие к критическим (ср.<sup>16, 18</sup>), должны сильно флуктуировать ввиду изменчивости полярных сияний. Разумно было бы ожидать в отдельные моменты резких выбросов интенсивности отражений, чего нет на самом деле. Во-вторых, учет конечного градиента концентрации на границе раздела приводит (при  $\lambda$  порядка немногих метров) к эффективной толщине пограничного слоя порядка вряд ли более нескольких дециметров. Допустить сколько-нибудь устойчивое существование таких переходных слоев на высоте 100–120 км в атмосфере невозможно, ибо такова же и средняя величина свободного пробега молекул на этом уровне.

Трудности получения правильной картины «авроральной» ионизации, по-видимому, тесным образом связаны с близостью характерных пространственных параметров авроральных ионосферных неоднородностей к длинам волн, применяемым для зондирования. Методическим приемом, способным в какой-то мере преодолеть возникающие затруднения и разрешить неопределенность в оценке характера отражений, является параллельное применение нескольких частот. Форсит и Воугэн<sup>63</sup>, а затем Коллинз и Форсит<sup>64</sup> сделали попытку воспользоваться этим методом для экспериментальной оценки электронных концентраций в отражающих объемах.

Форсит с сотрудниками использовали три одновременно работавших локатора с частотами 32, 22; 39, 22 и 48, 82 Мгц и идентичными антенными устройствами. Метод работы был двухпозиционный; приемник и передатчик были разнесены на расстояние около 1000 км. Область отражения считалась расположенной вблизи середины траектории луча, на высоте слоя  $E$ . Передача велась немодулированным излучением.

Если через  $A$  обозначить амплитуду сигнала на входе приемника, то улавливаемая антенной приемника мощность может быть выражена как

$$A^2 P'_r = \frac{P_t G_t C_r \lambda^2}{64\pi^3 D_1^2 D_2^2} S, \quad (10)$$

где  $P'_r$  — мощность на выходе при  $A=1$ ,  $S$  — радиолокационное эффективное сечение цели\*),  $D_1$  и  $D_2$  — расстояния от передатчика и от приемника до цели.

При подстановке сюда аппаратурных параметров\*\*) для  $S$  получается рабочая формула:

$$S = 2,5 \cdot 10^6 \frac{A^2}{\lambda^2} \text{ (м}^2\text{).} \quad (11)$$

Наблюдавшиеся авторами амплитуды соответствовали значениям эффективных сечений от  $2 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^7 \text{ м}^2$ . При отражении от плоскости это означало бы, что коэффициент отражения имеет величину от  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $10^{-5}$ . В том случае, если размеры отражателя много меньше зоны Френеля и могут характеризоваться некоторым определенным поперечным сечением ( $S=\text{const}$ ), амплитуда сигнала  $A$  будет пропорциональна  $\lambda$ . Замечая, что «подобное соотношение часто имеет место, даже когда процесс отражения не может быть отнесен к определенному физическому поперечному сечению», авторы исследуют характер действительной зависимости «приведенной амплитуды»  $A' = \frac{A}{\lambda}$ , наблюдавшейся при их измерениях, от длины волны. Теоретическая зависимость  $A'$  от  $\lambda$  для некоторых типов ионосферного отражения и рассеяния известна из оценок, имеющихся в ряде работ:

1. Частичное (френелевское) отражение от плоского слоя, электронная концентрация в котором много меньше критической; граница раздела — резкая (Герлофсон<sup>15</sup>). Согласно уравнению (3), коэффициент отражения  $q \sim \lambda^4$ , т. е.  $A^2 \sim q \lambda^2 \sim \lambda^6$  и, следовательно,

$$A' = \frac{A}{\lambda} \sim \lambda^2. \quad (12)$$

2. Рассеяние на изотропных неоднородностях с малой электронной плотностью (Бейли и др.<sup>7</sup>). Коэффициент рассеяния  $\sigma$  пропорционален  $\left(1 + \frac{k}{\lambda^2}\right)^{-1}$ , где  $k$  — множитель, зависящий, помимо прочих условий, от угла рассеяния. Так как  $A^2 \sim \lambda^2 \sigma$ , то при малых углах рассеяния

$$A' \sim \sigma \sim \left(1 + \frac{k}{\lambda^2}\right)^{-1}; \quad (13)$$

при рассеянии под большими углами или же при размерах неоднородностей, много больших длины волны,  $k \gg \lambda$ , и зависимость (13) переходит в (12).

3. Рассеяние на неизотропных, вытянутых неоднородностях с малой электронной плотностью (Букер<sup>74</sup>). При рассеянии назад (отражение

\* ) Радиолокационное эффективное сечение определяется соотношением<sup>76</sup>:

$$S = \lim_{\theta \rightarrow 0} 4\pi D^2 \left| \frac{W_r}{W_i} \right|,$$

где  $W_r$  — плотность потока рассеянной в направлении к приемнику энергии на расстоянии  $D$  от рассеивателя,  $W_i$  — плотность потока энергии, падающей на рассеиватель.

\*\*)  $G_t = G_r = 10$ ,  $D_1 = D_2 = 500 \text{ км}$ ,  $P_t = 0,1 \text{ квт}$ ; за единичную амплитуду на входе принимается величина  $10^{-7}$ .

радиолокационного типа) коэффициент рассеяния  $\sigma$  оказывается пропорциональным  $e^{-\frac{k_1}{\lambda^2}}$ , следовательно

$$A' \sim e^{-\frac{k_1}{\lambda^2}}, \quad (14)$$

где  $k_1$  — некоторый множитель.

4. Для очень тонких и длинных слабо ионизированных колонн эта зависимость переходит (см. <sup>16</sup>) в

$$A' \sim \frac{1}{\lambda^2}. \quad (15)$$

При ионизации, большей критической, должна иметь место совершенно другая картина. Если размеры сильно ионизированных неоднородностей достаточно велики, приведенная амплитуда не будет зависеть от длины волны и определяется только отношением размеров неоднородности к величине первой фрепелевской зоны. Различие двух типов отражений, как отмечают Форсит, Воугэн и Коллинз <sup>63, 64</sup> и как ранее подчеркивал Кэйзер <sup>41</sup>, будет означать наличие неустойчивости отражений, если длина отражаемой волны близка к критической.

Исходя из этих соображений, Форсит с соавторами измеряли отношение приведенных амплитуд отраженных сигналов при одновременной работе трех локаторов. Обозначив соответственно длинам волн локаторов приведенные амплитуды через  $A'_6$ ,  $A'_8$  и  $A'_9$ , а отношения их как

$$X = \frac{A'_8}{A'_6}, \quad Y = \frac{A'_9}{A'_8}, \quad (16)$$

авторы размещают результаты измерений на диаграмме  $X - Y$  которой  $X > 1$  и  $Y > 1$ , разделен

Рис. 25.  $X - Y$  диаграмма с нанесенными данными наблюдений (по Коллинзу и Форситу <sup>64</sup>).

Точка A, прилегающий отрезок сплошной кривой и пунктирная кривая отвечают соответственно зависимостям (15), (13) и (14). Смещенные кривые B и C соответствуют учету поглощения (10 и 20% при  $\lambda = 9 \text{ м}$ ).

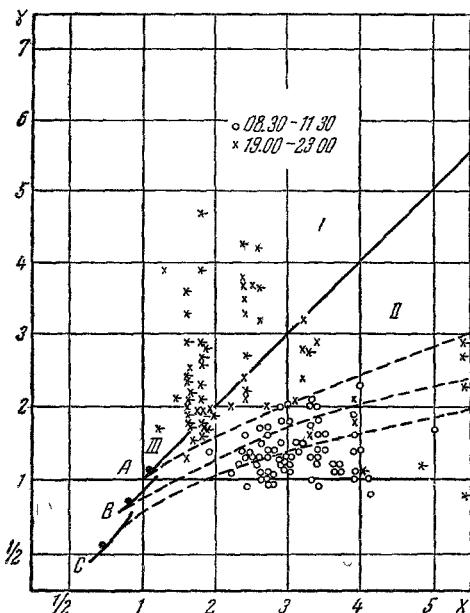
(рис. 25). Площадь диаграммы, для которой  $X > 1$  и  $Y > 1$ , разделена на три области согласно условиям:

область I:  $Y > 2$ ,  $X < Y$ ;

область II:  $X > 2$ ,  $Y < X$ ;

область III:  $X < 2$ ,  $Y < 2$ .

Если все отражения происходят при плотности ниже критической (частичное отражение), наблюдаемые значения  $X$  и  $Y$  должны в основном размещаться в области III. Если же имеет место и механизм полного отражения, то экспериментальные точки могут, по-видимому, распространяться



по всей диаграмме  $X - Y$ . В этом случае возможны следующие три варианта:

1) средняя электронная плотность в ионизированных отражающих объемах  $\bar{N}$  больше критической плотности  $N_9$  для  $\lambda = 9 \text{ м}$ , но меньше  $N_8$  для  $\lambda = 8 \text{ м}$ ; тогда

$$A'_9 > A'_8 \cong A'_6$$

и, следовательно,  $Y \gg X \cong 1$ ; экспериментальные точки будут располагаться в области I;

2) аналогично этому, если  $N_6 > \bar{N} > N_8$ , то  $A'_9 \cong A'_8 > A'_6$  и, следовательно,  $X \gg Y \cong 1$ ; точки будут располагаться в области II;

3)  $\bar{N} > N_6$ , т. е. электронная концентрация превосходит критическую для всех трех длин волн. В этом случае  $A'_9 \cong A'_8 \cong A'_6$  и, следовательно,  $X \cong Y \cong 1$ ; можно ожидать, что все экспериментальные точки будут лежать в области III.

На диаграмме рис. 25 кружки и крестики соответствуют двум различным периодам наблюдения (08 ч. 30 м.—11 ч. 30 м. и 19 ч. 00 м.—23 ч. 00 м. по Гринвичу, 3 марта 1956 г.). Точки первого периода концентрируются преимущественно в области II ( $Y$  близко к 1,  $X$  разбросаны), точки второго периода — в области I ( $X$  близко к 1,  $Y$  разбросаны). В соответствии с авторской интерпретацией мы должны заключить, что электронная плотность в первый период, т. е. в послеполуночные часы местного времени, была больше чем  $N_8 = 1,9 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ , но не превосходила  $N_6 = 3,0 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ ; в послеполуденные часы местного времени (второй период) электронная плотность была, по-видимому, меньше  $N_8$ , но превышала значение  $N_9 = 1,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ .

Работа Коллинза и Форсита<sup>64</sup> интересна тем, что в ней впервые делается попытка экспериментальной оценки реальных электронных плотностей в ионизированных образованиях полярных сияний. Вместе с тем пример этой работы наглядно демонстрирует сложность проблемы.

В связи с работами Форсита и др.<sup>63, 64</sup> следует упомянуть, что вопросу о статистических свойствах авроральных ионизированных отражающих образований посвящена опубликованная недавно работа Мак-Намара<sup>75</sup>. Не задаваясь целью исследовать механизм отражения, но интересуясь в основном эффективным размером неоднородностей, Мак-Намара нашел, что статистическому распределению интенсивностей «авроральных» сигналов хорошо соответствуют степенной или экспоненциальный законы распределения вероятности радиолокационных эффективных сечений  $p(S)$ , а именно:

$$p(S) = \frac{k}{S^m},$$

или

$$p(S) = \frac{1}{S_{\max}} e^{-\frac{S}{S_{\max}}}.$$

Картина ионосферы, состоящей из большого числа отдельных флюкутирующих неоднородностей, конечно, не является новой. Рассмотрению свойств «мутной», некогерентно рассеивающей ионосферы посвящены, например, работы Я. Л. Альперта<sup>76-78</sup>, Я. Л. Альперта и А. А. Айберга<sup>79</sup> и др. В некоторых из этих работ (см., например,<sup>77</sup>) получены числовые значения для ряда статистических параметров невозмущенной ионосферы, таких, как хаотическая скорость движения неоднородностей, угловой и линейный размер неоднородностей, флюктуации электронной

плотности и др. К возмущенному состоянию полярной ионосфера и объяснению «авроральных» радиоотражений эти расчеты пока приложены не были. Ряд интересных точек зрения по вопросу о физической природе ионосферных неоднородностей в слое  $E$  и параметрах, которым они должны удовлетворять, чтобы служить эффективными центрами рассеяния для волн УКВ-диапазона, содержат работы Я. Л. Альперта<sup>77</sup> и Букера<sup>74</sup>. Так как Букер свое исследование специально посвящает вопросу интерпретации авроральных радиоотражений, с учетом анизотропии неоднородностей, мы остановимся на этой работе подробнее.

УКВ-радиоотражения от полярных сияний в общем плане изучения ионосферных неоднородностей представляют специальный интерес. С одной стороны, «авроральные» неоднородности обладают целым рядом особенностей, не свойственных ионосфере других широт; они очевидным образом связаны с геомагнитными возмущениями и корпускулярными вторжениями. Их природа, по всей вероятности, неотделима от природы последних. Вместе с тем обнаружение аналогии с некоторыми средне- и низкоширотными эффектами заставляет думать, что в определенные периоды времени и в этих широтах существенную роль в жизни ионосферы может играть вторжение корпускулярных потоков в верхнюю атмосферу. В настоящее время весьма очевидно, что наряду с учетом воздействия мощных непостоянных корпускулярных потоков, генерирующих на Земле интенсивные геомагнитные возмущения и другие резко выраженные геофизические эффекты, нельзя пренебречь существованием непрерывно бомбардирующего Землю корпускулярного «фона»<sup>40, 55</sup>. С ним могут быть связаны, например, ионизация в  $E$ - и  $F$ -областях во время полярной ночи, свечение ночного неба и т. д. Механизм взаимодействия корпускулярных потоков с магнитным полем Земли и процессы, сопровождающие проникновение корпускул в атмосферу, ясны далеко не полностью. В прежних теориях в первую очередь учитывалась возможность попадания в верхнюю атмосферу Земли корпускул, непосредственно приходящих от Солнца. В результате расширения наших знаний об окружающем Землю космическом пространстве, вопрос может, по-видимому, приобрести иную трактовку. В виде «радиационных поясов» Земля обладает постоянным резервом корпускул, который может во время возмущений становиться очагом корпускулярной бомбардировки верхней атмосферы. Не исключено, что в основные положения теории полярных сияний и магнитных бур потребуется внесение существенных поправок и изменений;щеизвестно, что в старых теориях противоречий было довольно много. Так, например, серьезные трудности возникали при оценках абсолютных значений и распределения скоростей «авроральных» протонов из наблюдений спектров полярных сияний, по вопросу о глубине проникновения корпускул, их составе и т. д. До сих пор энергия частиц корпускулярных потоков остается довольно неопределенной; согласно различным предположениям, она может заключаться в пределах от  $10^3$  до  $10^6$  эв. Поэтому точка зрения на образование авроральных ионосферных неоднородностей, сводящаяся к тому, что они представляют собой совокупность ионизированных треков вторгающихся корпускул (§ 4), не является наиболее очевидной. Попытка объяснения анизотропии авроральной ионизации как результата влияния турбулентности предпринята Букером, впервые указавшим (совместно с Гордоном<sup>80</sup>) на возможную роль турбулентности в возникновении ионосферных неоднородностей на уровне слоя  $E$  и выше.

В магнитном поле ионизованная плазма приобретает свойства анизотропности вследствие ограничения эффективного пробега электронов в поперечном по отношению к магнитному полю направлении. В результате турбулентность также становится анизотропной. Условие для того, чтобы

контроль магнитного поля за движением электронов (и ионов) приобрел значение существенного фактора, состоит, согласно Букеру<sup>81</sup>, в том, что частота соударений последних с нейтральными частицами должна быть существенно меньше их гиромагнитной частоты. Для электронов в атмосфере это имеет место приблизительно выше уровня 75 км. На рис. 26, взятом из работы Букера<sup>81</sup>, изображена зависимость от высоты отношения средних скоростей дрейфа электронов и ионов в двух взаимно перпендикулярных направлениях (поперек и вдоль поля). Отношение горизонтальных и вертикальных размеров электронных неоднородностей определяется двумя процессами. Во-первых, непосредственно столкновениями электронов с молекулами; отношение горизонтального и вертикального размеров неоднородностей, пропорциональное отношению скоростей дрейфа, характеризуется при этом кривой для электронов на рис. 26. Во-вторых, столкновениями положительных ионов с молекулами, поскольку необходимо учитывать кулоновское притяжение между ионами и электронами. В области слоя  $E$  отношение скоростей поперечного и продольного дрейфов для ионов близко к единице, поэтому кулоновское взаимодействие ионов и электронов будет способствовать уменьшению анизотропии электронных неоднородностей. Предельное значение анизотропии дает ионная кривая на рис. 26. Результирующий график для вероятных поперечных размеров электронных неоднородностей приведен на рис. 27. Можно видеть, что учет только столкновений электронов с молекулами должен привести для высот, больших 160 км, к размерам неоднородностей, не совместимым с величиной свободного пробега молекул (которым определяется минимальный возможный масштаб турбулентности). Вертикальный размер электронных неоднородностей определяется масштабом изотропной (в первом приближении) турбулентности нейтрального газа. Для изотропной турбулентности Букер находит предельные характерные размеры вихрей. Верхний предел  $L_1$  определяется максимальной энергией вихря на данном уровне

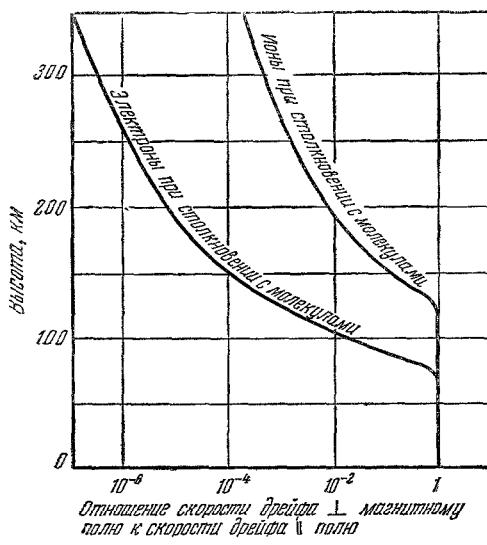


Рис. 26. Влияние соударений с нейтральными молекулами на скорость дрейфа в магнитном поле электронов и ионов (по Букеру<sup>81</sup>).

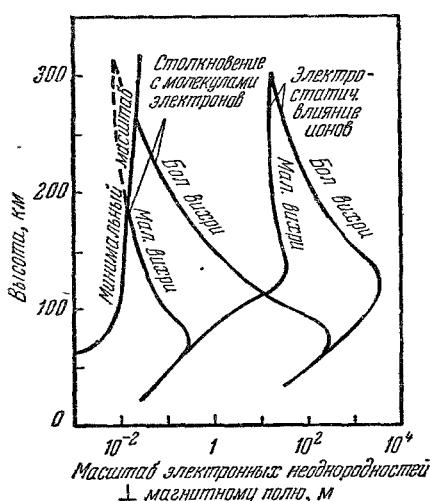


Рис. 27. Размеры электронных неоднородностей в зависимости от высоты и размера вихрей, в случае наличия или отсутствия электростатического влияния ионов (по Букеру<sup>81</sup>).

жении) турбулентности нейтрального газа. Для изотропной турбулентности Букер находит предельные характерные размеры вихрей. Верхний предел  $L_1$  определяется максимальной энергией вихря на данном уровне

в атмосфере, нижний предел  $L_2$  — из условия, что масштаб турбулентности, меньший  $L_2$ , уже невозможен вследствие наличия вязкости и перехода кинетической энергии вихря в теплоту.

Для уровня около 110 км характерные размеры вихрей по вычислениям Букера заключены между значениями  $L_1 \approx 500$  м и  $L_2 \approx 30$  м (рис. 28). Вопрос о спектре турбулентности автор не рассматривает.

При радиолокационных отражениях имеется в виду рассеяние энергии падающей волны назад (обратное рассеяние). Основную роль в обратном рассеянии, как показали Букер и Гордон (а также Я. Л. Альперт<sup>77</sup>) в работах по изотропной турбулентности, должны играть малые неоднородности, в частности, с характерным размером  $L \approx \frac{\lambda}{4\pi}$ . Для рассеяния вперед на углы, меньшие  $\lambda/2\pi L_1$ , важен учет крупных неоднородностей размером  $L \approx L_1$ . В случае анизотропии эти условия относятся как к продольным ( $L$ ), так и к поперечным ( $T$ ) размерам неоднородностей.

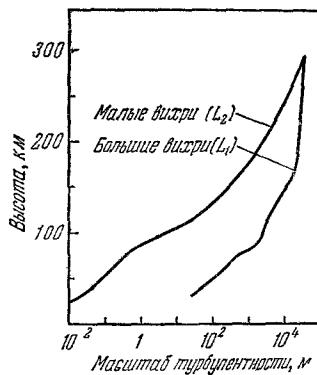


Рис. 28. Характерные размеры вихрей (масштаб турбулентности) (по Букеру<sup>82</sup>)

трапции, что должно приводить к усилению интенсивности образования электронных неоднородностей;

б) создание, наряду с геомагнитными эффектами, необычно сильных электрических полей, могущих быть причиной дрейфа электронных неоднородностей с такими скоростями, которые необходимы для объяснения фединговых и допплеровских явлений, присущих радиоотражениям от полярных сияний. С этими двумя обстоятельствами может быть и связана, как полагает Букер, роль корпускулярного агента.

Отсылая за деталями расчетов к оригинальным статьям<sup>74,81</sup> мы приводим окончательную формулу Букера для среднего коэффициента обратного рассеяния в случае поля неоднородностей с характерными размерами  $L$  и  $T$ ,

$$\sigma = (2\pi)^{3/2} \pi^2 \frac{1}{\lambda_N^4} \left( \frac{\Delta N}{N} \right)^2 T^2 L \exp \left( -\frac{8\pi^2 T^2}{\lambda^2} \right) \exp \left( -\frac{8\pi^2 L^2}{\lambda^2} \sin^2 \psi \right), \quad (17)$$

где  $\sigma$  — коэффициент обратного рассеяния, т. е. рассеяния в пределах углов, близких к  $180^\circ$ ,  $\lambda_N$  — критическая длина волны при электронной плотности  $N$ ,  $\left( \frac{\Delta N}{N} \right)^2$  — средний квадрат флюктуаций электронной плотности в неоднородностях,  $T$  — поперечный размер неоднородностей,  $L$  — продольный размер неоднородностей,  $\psi$  — угол между направлением радиолуча и продольной осью рассеивающей неоднородности,  $\lambda$  — длина волны

локатора. Формулу, по своему виду очень близкую к (17), получил независимо и Я. Л. Альперт<sup>77</sup>.

Интегрирование выражения (17) по предполагаемому объему рассеяния дает возможность Букеру получить оценку значения отраженной энергии. При этом оказывается возможным отдельно судить о продольных размерах неоднородностей, так как вычисления можно провести таким образом, чтобы интегральное выражение содержало множитель, зависящий от  $L$  и от угла отражения, который определяет «ракурсную чувствительность». Согласно расчетам Букера<sup>74</sup>, характерный продольный размер авроральных неоднородностей оказывается порядка 7 м. Поперечный размер неоднородностей, оцениваемый в работе более грубо (на основании предельно наблюдаемой частоты авроральных радиоотражений), оказывается порядка 0,16 м. Отношение  $(0,16 : 7 \approx 2 \cdot 10^{-2})$  укладывается в предсказываемые теорией Букера (см. рис. 26) значения для высот порядка 110—120 км. Можно было бы считать, что неопределенность как в исходных экспериментальных данных, так и в основах теории настолько велика, что придавать большое значение этому совпадению не следует. Однако оценки порядка величины неоднородностей более простыми средствами, делаемые некоторыми авторами (Коллинз и Форсит<sup>64</sup>—по исследованию федингов при разнесенных приемниках, Мак-Намара<sup>75</sup> и Кайзер<sup>41</sup>—на основе учета отклонений от угла зеркального отражения), хотя и отличаются от значений, даваемых Букером, но остаются в пределах того же порядка величин. Я. Л. Альперт<sup>77</sup>, анализируя результаты Бейли и др., также оценивает размеры неоднородностей в нижней ионосфере примерно в 5—8 м. По-видимому, вертикальная протяженность авроральных неоднородностей действительно не должна быть больше одного десятка метров, и, в соответствии с этим, средние поперечные размеры неоднородностей оказываются в пределах метра.

Схема Букера остается во многих отношениях открытой для критики. Так, например, Букер в известной мере произвольно принимает электронную концентрацию в неоднородностях порядка  $N \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Учитывая силу отраженного сигнала и вероятные размеры рассеивающей области, он получает для среднего квадрата флуктуаций значение  $\left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 = 10^{-7} \div 10^{-6}$ . Расчеты Альперта<sup>77</sup> условий существенно менее возмущенной ионосферы приводят к значениям, на 2—3 порядка большим. В качестве пространственной характеристики турбулентности Букер использует автокорреляционную функцию вида

$$Q = \exp\left(-\frac{r^2}{L^2}\right), \quad (18)$$

где  $L$  — масштаб турбулентности,  $r$  — расстояние между двумя точками. Причины выбора именно этой функции специально не оговариваются в статье Букера (см. <sup>77, 83</sup>). При всем этом большой заслугой автора в деле интерпретации наблюдений за радиоотражениями от полярных сияний остается попытка перейти от качественных, физически расплывчатых оценок к количественному истолкованию результатов наблюдений. Не исключено, что исходные положения Букера окажутся не вполне верными; возможно, что анизотропию ионизации в полярных областях окажется трудно объяснить только анизотропной турбулентностью. Но существование хотя бы предварительной рабочей гипотезы полезно для стимулирования исследований и выработки в дальнейшем более правильных представлений о специфике явления.

В заключение раздела, посвященного попыткам интерпретации радиолокационных наблюдений полярных сияний, полезно остановиться на

сопоставлении результатов с некоторыми оптическими данными. Эти последние, давая богатый материал, касающийся процессов возбуждения в полярных сияниях, позволяют в некоторых случаях получить и определенные сведения об ионизации. Надежность и однозначность этих данных находится, конечно, в прямой зависимости от степени корреляции обоих явлений. Как мы уже отмечали, такая корреляция в больших пространственно-временных масштабах несомненна, в деталях — очень ненадежна.

Укажем на две оптические работы, которые относятся к интересующему нас вопросу.

Фотометрирование эмиссии ионизированной молекулы азота в полярных сияниях (первая отрицательная система  $N_2^+$ , переход  $B^2\Pi \rightarrow X^2\Sigma$ ) приводит к довольно уверенным оценкам как средней ее интенсивности, так и предельно достижимых значений, соответствующих очень ярким сияниям. На основании спектроскопических данных Вегарда и Квифта<sup>84</sup> Ситон<sup>85</sup> принимает среднее значение эмиссии фотонов нулевой полосы ( $\lambda 3914\text{\AA}$ ) этой системы равным  $5 \cdot 10^{11}$  фотонов в 1 сек в столбе атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$ . Тогда полная эмиссия фотонов при возбуждении всех полос отрицательной системы  $N_2^+$  должна быть оценена примерно в два раза выше, чем эмиссия  $\lambda 3914$ , и в пять раз выше, чем эмиссия  $\lambda 4278$ . Если справедливо, что возбуждение молекул  $N_2^+$  в полярных сияниях происходит непосредственно, в одном акте вместе с ионизацией молекулы  $N_2$ , то число излучаемых фотонов должно быть не меньше числа возникающих электронов.

#### Уравнение

$$\frac{dN}{dt} = a\eta(N_2^+) - \alpha_{\text{рек}} N^2 \quad (19)$$

может быть использовано для оценки  $N$  — электронной концентрации (здесь  $\eta(N_2^+)$  означает число фотонов системы  $B^2\Pi - X^2\Sigma$ , эмитируемых в  $1 \text{ см}^3$  светящегося объема сияния, пропорциональное числу образующихся там же электронов;  $a$  — коэффициент пропорциональности,  $\alpha_{\text{рек}}$  — коэффициент рекомбинации). Положив  $dN/dt=0$  и  $\alpha_{\text{рек}} \approx 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ , можно найти  $N$ , для чего нужно знать еще  $a$  и  $\eta(N_2^+)$ . Если  $\Pi(N_2^+)$  есть полная эмиссия фотонов системы  $B^2\Pi - X^2\Sigma$  в столбе сечением  $1 \text{ см}^2$  в 1 сек, то

$$\eta(N_2^+) = \frac{\Pi(N_2^+)}{l}, \quad (20)$$

где  $l$  — вертикальная протяженность области свечения. Приняв разумные значения для  $a$  и  $l$  ( $a \approx 1$ ,  $l = 1 \text{ км}$ ), Ситон получает для электронной плотности значение  $N \approx 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ . Результат согласуется с оценками электронной плотности, основанными на предположении о критическом (полном) отражении радарных сигналов.

К прямо противоположному выводу приходит Омхольт<sup>86</sup>. Он использует следующие (не сильно отличающиеся от данных Ситона) фотометрические данные для эмиссии  $\lambda 4278 \text{ \AA}$  первой отрицательной системы азота:  $(2 \div 10) \cdot 10^{10}$  фотонов в столбе атмосферы сечением  $1 \text{ см}^2$  в 1 сек для сияний умеренных и сильных, около  $4 \cdot 10^{11}$  фотонов — для сияний наивысшей силы. При одновременных наблюдениях за критической частотой отражений от «аврорального» спорадического слоя  $E_a$  и за интенсивностью эмиссии  $\lambda 4278 \text{ \AA}$   $N_2^+$ , Омхольт получил довольно хорошую корреляцию между ними. Так как интервал критических частот при вертикальном отражении лежал в этих измерениях между 4 и  $9 \text{ M}\mu$ , Омхольт принимает для «авроральной» ионизации вероятные значения от  $2 \cdot 10^5$  до  $10 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и на этом основании отдает предпочтение механизму частичного отражения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели экспериментальные данные, получаемые при наблюдениях за радиоотражениями от полярных сияний на частотах УКВ-диапазона, и попытки интерпретации этих данных. Большая часть полученного до настоящего времени наблюдательного материала обеспечивалась применением сравнительно простой радиолокационной техники и методики. С помощью этих средств были выяснены некоторые основные закономерности явления, место и роль его среди других геофизических процессов в высоких широтах. Установление более точных характеристик и физических параметров наталкивается при существующих (вернее, при применяемых) технических средствах на значительные трудности. Очевидная необходимость в получении более точных и более детализированных сведений заставляет в настоящее время стремиться к применению в этих исследованиях более специализированной методики и более совершенной техники, к увеличению направленности антенн, повышению чувствительности приемников, варьированию размещения передающих и приемных пунктов и т. д.

Как и во всякой другой области физического эксперимента, наблюдения приобретают наибольшую ценность, когда они освещаются достаточно ясной теорией или подходящей рабочей гипотезой. В радиоисследованиях полярных сияний на первых порах при выявлении общих закономерностей роль руководящей теории играла геометрическая схема отражений Чэпмена. В настоящее время при обработке увеличивающегося числа данных ощущается нужда в теории, которая физически истолковывала бы картину отражения радиоволн от областей аномальной, повышенной ионизации в полярных районах. После окончания МГГ круг станций, проводящих исследования радиоотражений от полярных сияний, несколько сократился. Но это может быть скомпенсировано применением на оставшихся станциях новой аппаратуры и более гибкой специализированной методики. Как геофизика, так и практика ионосферной службы в высоких широтах уже извлекли для себя довольно много пользы из этих наблюдений. Их развитие и усовершенствование, вместе с приведением в систему уже накопленных данных, очевидно, должны привести к лучшему пониманию разнообразных и взаимосвязанных процессов, которыми богаты верхние слои атмосферы высоких широт.

*Примечание при корректуре.* Публикация материалов по радионаблюдениям полярных сияний, и в частности результатов, полученных во время МГГ, идет в настоящее время весьма интенсивно. Не имея возможности включить в перечень литературы большинство новых работ, появившихся в печати уже после написания данного обзора, считаем полезным указать на номера журналов J. Geophys. Res. 65, № 8, Aug. 1960 и J. Atmos. Terr. Phys. 19, № 1, Sept. 1960, где опубликованы в общей сложности пять оригинальных работ, относящихся к данному вопросу. Имеется возможность также познакомиться с обзорной статьей Букера в книге Physics of the Upper Atmosphere, под редакцией Дж. А. Ратклифа (Лондон, 1960). В этой статье заслуживает внимания замечание Букера об изменении характера обратного рассеяния с высотой, вытекающим из некоторых новых наблюдений. Как полагает Букер, возможно, это придется учесть в теории путем дальнейшего уточнения вида автокорреляционной функции. Следует указать, кстати, что в первоначальной теории Букера—Гордона была использована автокорреляционная функция, отличающаяся от гауссовой, которую позже применил Букер. На ошибки, связанные с использованием негауссовой функции, указывает Я. Л. Альперт в статье, ссылки на которую имеются в нашем обзоре.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. Harang, W. Stoffregen, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 55, 405 (1940).
2. R. K. Moore, J. Geophys. Res. 56, 97 (1951).
3. A. M. Peterson, R. L. Leadabrand, J. Geophys. Res. 59, 306 (1954); A. M. Peterson, O. G. Villard, R. L. Leadabrand, P. B. Gallacher, J. Geophys. Res. 60, 492 (1955).
4. S. Stein, J. Geophys. Res. 63, 391 (1958).
5. R. B. Dyce, L. T. Dolphin, R. L. Leadabrand, R. A. Long, J. Geophys. Res. 64, 1815 (1959).
6. J. Nakata, Repts. Ionosph. Res. in Japan 12, 1 (1958).
7. D. R. Bailey, R. Battaman, R. C. Kirby, Proc. IRE 43, 1181 (1955).
8. Я. Г. Бирфельд, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 12, 1871 (1960).
9. С. К. Митра, Верхняя атмосфера, М., ИЛ, 1956.
10. Я. Л. Альперт, Ф. Ф. Добрякова, Э. Ф. Чудесенко, Б. С. Шапиро, УФН 65, 161 (1958).
11. Я. Л. Альперт, УФН 71, 369 (1960).
12. «Ракетные исследования верхней атмосферы», М., ИЛ, 1957.
13. К. И. Грингауз, ДАН СССР 120, 1934 (1958); 132, 4341 (1960).
14. A. C. B. Lovell, J. A. Clegg, C. D. Elluyett, Nature 160, 372 (1947).
15. N. Herlofson, Nature 160, 867 (1947).
16. A. Aspinol, G. S. Hawkins, J. Brit. Astron. Assoc. 60, 130 (1950).
17. P. A. Forsyth, W. Petrie, F. Vawter, B. W. Currie, Nature 165, 561 (1950).
18. G. Hellgren, J. Meos, Tellus. 4, 249 (1952).
19. B. W. Currie, P. A. Forsyth, F. Vawter, J. Geophys. Res. 58, 179 (1953).
20. A. G. McNamara, B. Currie, J. Geophys. Res. 59, 279 (1954).
21. V. Bullough, T. R. Kaiser, J. Atmos. and Terr. Phys. 5, 189 (1954); 6, 98 (1955).
22. L. Harang, B. Landmark, J. Atmos. and Terr. Phys. 4, 322 (1954).
23. R. B. Dyce, J. Geophys. Res. 60, 317 (1955).
24. Я. Г. Бирфельд, Изв. АН СССР, серия геофиз., № 4, 543 (1957).
25. D. W. R. McKinley, P. M. Millman, Canad. J. Phys. 31, 171 (1953).
26. R. S. Unwin, Ann. Geophys. 15, 378 (1959).
27. R. S. Unwin, J. Geophys. Res. 63, 501 (1958).
28. M. Gadsden, Ann. Geophys. 15, 404 (1959).
29. G. F. Lyon, Canad. J. Phys. 38, 385 (1960).
30. В. И. Погорелов, Изв. АН СССР, серия геофиз., № 8, 1049 (1958).
31. Е. Е. Брюнелли, С. М. Сандуленко, Информационный бюллетень Советской Антарктической экспедиции, № 13, 29 (1959).
32. H. G. Booker, C. W. Gartlein, B. Nickols, J. Geophys. Res. 60 (1955).
33. P. A. Forsyth, Canad. J. Phys. 38, 593 (1960).
34. P. I. Presnell, R. L. Leadabrand, A. M. Peterson, R. B. Dyce, J. C. Schlobohm, M. R. Berg, J. Geophys. Res. 64, 1179 (1959).
35. C. Störmer, The polar aurora, Pergamon Press, 1955.
36. В. И. Довгер, Проблемы Арктики и Антарктики, № 2, 119 (1960).
37. R. S. Unwin, M. Gadsden, Nature 180, 1469 (1957).
38. S. Chapman, J. Atmos. and Terr. Phys. 3, 1 (1953); см. также J. Chain, J. Geophys. Res. 58, 377 (1953).
39. А. П. Никольский, Магнитные возмущения в Арктике, Труды АНИИ, 36, 1951.
40. М. С. Бобров, Астрон. ж. 36, 1029 (1959).
41. T. R. Kaiser, The airglow and the aurora, N. Y., Pergamon Press, 1955.
42. А. И. Грачев, Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба, М., изд. АН СССР, сб. № 2—3, 49 (1960).
43. S. J. Fricker, R. P. Ingalls, M. L. Stone, S. C. Wang, J. Geophys. Res. 62, 527 (1957).
44. Я. Г. Бирфельд, Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба, М., изд. АН СССР, сб. № 2—3, 15 (1960).
45. J. H. Meek, A. G. McNamara, Canad. J. Phys. 32, 326 (1954).
46. K. Bullough, T. W. Davidson, T. R. Kaiser, C. D. Watkins, J. Atmos. and Terr. Phys. 11, 137 (1957).
47. В. И. Погорелов, Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба, М., изд. АН СССР, сб. № 2—3, 28 (1960).

48. В. И. Яринин, Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба, М., изд. АН СССР, сб. № 2—3, 37 (1960).
49. N. Gadsden, Ann. Geophys. 15, 396 (1959).
50. B. K. Bhattacharya, Canad. J. Phys. 38, 624 (1960).
51. D. R. Harrison, C. D. Watkins, Nature 182, 43 (1958).
52. Б. И. Погорелов, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 7, 1082 (1960).
53. J. N. Abbott, Canad. J. Phys. 36, 643 (1958).
54. Р. А. Зевакина, З. Ц. Рапопорт, Труды Всесоюзного межвузовского совещания по радиофизическим методам исследования ионосферы, Труды Сиб. ФТИ, № 37 (1959).
55. В. М. Дриацкий, А. С. Беспрованная, Геофизические исследования в Советской Арктике, № 3, 98 (1960).
56. R. Pendorf, S. C. Coroniti, J. Geophys. Res. 63, 789 (1958).
57. Я. И. Фельдштейн, Исследования полярных сияний, М., изд. АН СССР, сб. № 4 61 (1960).
58. E. K. Smith, J. W. Tinney, J. Geophys. Res. 65, 885 (1960).
59. R. W. Knecht, J. Geophys. Res. 61, 59 (1956).
60. Ф. Я. Заборщикова, Н. И. Федякина, Проблемы Арктики, № 2, 149 (1957).
61. J. C. James, L. E. Bird, R. P. Ingalls, M. G. Stone, J. W. B. Day, G. E. K. Lockwood, R. I. Presnell, Nature 185, 510 (1960).
62. C. G. Little, W. M. Rayton, R. R. Roof, Proc. IRE 44, 992 (1956).
63. P. A. Forsyth, E. L. Vogan, J. Atmos. and Terr. Phys. 10, 245 (1957).
64. C. Collins, P. A. Forsyth, J. Atmos. and Terr. Phys. 13, 315 (1959).
65. P. A. Forsyth, F. D. Green, W. Mah, Canad. J. Phys. 38, 6 (1960).
66. J. Paton, J. Brit. Astron. Assoc. 64, 376 (1954).
67. M. A. Ellison, J. Paton, Observatory 74, 246 (1954).
68. A. Egeland, B. Hultquist, J. Ortneter, Nature 185, 519 (1960).
69. P. Glöde, Radio und Fernsehen 8, 415 (1959).
70. S. Chapman, C. G. Little, J. Atmos. and Terr. Phys. 10, 20 (1957).
71. T. J. Seed, J. Geophys. Res. 63, 517 (1958).
72. T. R. Kaiser, J. Geophys. Res. 62, 297 (1957).
73. Дж. Р. Менцер, Дифракция и рассеяние радиоволн, М., изд. «Сов. радио», 1958.
74. H. G. Booker, J. Atmos. and Terr. Phys. 8, 204 (1956).
75. A. G. Mc Namara, Canad. J. Phys. 38, 424 (1960).
76. Я. Л. Альперт, УФН 34, 262 (1948); 38, 30 (1949); 49, 49 (1953).
77. Я. Л. Альперт, УФН 61, 424 (1957).
78. Я. Л. Альперт, Исследования ионосферы и метеоров, М., изд. АН СССР, сб. № 2, 7 (1960).
79. Я. Л. Альперт, А. А. Айнберг, ЖЭТФ 21, 389 (1951).
80. H. G. Booker, W. Gordon, Proc. IRE, 38, 401 (1950).
81. H. G. Booker, J. Geophys. Res. 61, 673 (1956).
82. D. K. Bayley, R. Bateman, L. V. Berkner, H. G. Booker, F. Montgomery, E. M. Purcell, W. W. Salisbury, J. W. Wiesner, Phys. Rev. 86, 141 (1952).
83. В. И. Татарский, Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере, М., изд. АН СССР, 1959.
84. L. Vegard, G. Kvifte, Geofys. Publ., Oslo, 16, 7 (1945).
85. M. J. Seaton, J. Atmos. and Terr. Phys. 4, 285 (1954).
86. A. Omholt, J. Atmos. and Terr. Phys. 7, 73 (1955).

