

ФИЗИКА ИОНОСФЕРЫ ¹⁾

Г. Р. Мимно, Кембридж, Массачусетс, США

Содержание

А. Введение. В. Краткий исторический обзор. С. Основные экспериментальные факты. Д. Элементарная теория. Е. Природа ускоряющего поля. F. Другие силы, действующие на электрон. G. Уравнения движения электронов. H. Анализ магнитоионного двойного преломления. I. Трение в результате соударений. J. Полный анализ с помощью конформного изображения. K. „Тонкая структура“ ионосферы. L. Почему существует стратификация? M. Приливные эффекты в ионосфере. N. Солнечные пятна, магнитные индексы и полярные сияния. O. Магнитные бури и метеорные ливни. P. Грозы и барометрические эффекты. Q. Местные облака в ионосфере. R. Рассеяние радиоволн. S. Взаимодействие радиоволн. T. Наблюдения во время затмений. V. Заключение.

A. Введение¹⁾

22 октября 1924 г. один выдающийся британский инженер прочитал перед Радиообществом Великобритании лекцию о „Нерешенных проблемах беспроволочной телеграфии“. В своем обращении Р. Х. Барфилд выдвинул следующие проблемы:

1. Почему вообще возможна передача без проводов на большое расстояние?

2. Почему сигналы ночью оказываются сильнее, чем днем?

3. Почему пеленгаторные станции ночью подвержены большим ошибкам, между тем как днем этими ошибками практически можно пренебречь?

4. Почему происходит явление, известное под названием „фэдинга“?

В течение следующего десятилетия эти вопросы и много других связанных с ними проблем с инженерной точки зрения были полностью разрешены. В ходе исследования возникли, однако, новые инженерные проблемы, которые еще ждут разрешения. Эти последние проблемы будут описаны в соответствующих местах ниже. Однако наиболее интересные результаты, полученные за

¹⁾ Rev. Mod. Phys., 9, No. 1, Jan. 1937. Перевод П. Н. Успенского.

последние двенадцать лет в результате интенсивных экспериментальных исследований, принадлежат собственно к области чистой физики. Перед физиком встают новые интересные экспериментальные и теоретические проблемы. Развитие новых экспериментальных методов и инструментов позволяет производить точные измерения в области атмосферной физики, которая не слишком сложна для ценного теоретического анализа. Теория еще не полна, и экспериментальные методы нуждаются в дальнейшем развитии; однако удовлетворительное начало в этой молодой и живой ветви физического исследования уже сделано. Новые проблемы ионосферы тесным образом связаны с большим числом других геофизических исследований, а также исследований, касающихся луны и солнца, которые привлекали внимание физиков в течение длинного ряда лет. К таким исследованиям принадлежат исследования космических лучей, земного магнетизма, солнечной активности, полярных сияний, распределения озона в атмосфере, грозовой деятельности, температур атмосферы, светящихся облаков, следов метеоров, движений воздушных масс, земных электрических токов, метеорологии стратосферы и исследования упругих деформаций земной коры.

После краткого исторического обзора ранних теорий и экспериментов над явлениями распространения радиоволн я попытаюсь дать общее описание большого числа исследований, произведенного за последние двенадцать лет. Так как, однако, полное собрание всех оригинальных статей за этот активный период заполнило бы несколько больших томов, я вынужден буду исключить из этого обзора многие ценные работы. Цитированные ниже статьи выбраны поэтому из много большего их числа, так как нам представляется, что они иллюстрируют соответствующим образом различные точки зрения. У меня имелось намерение сделать ссылки характерными, но ни в какой степени не полными. Дополнительные ссылки можно найти почти во всех цитированных статьях. В обзоре работ я не придерживался строгой хронологической последовательности и не пытался разрешать бесчисленные проблемы приоритета.

Во всякой деятельной отрасли физики возникают многочисленные, чрезвычайно противоречивые вопросы; много таких вопросов можно найти и в области ионосферы. Я полагаю, что при рассмотрении подобных вопросов обозреватель не должен занимать примирительной позиции, но должен формулировать свое личное беспристрастное мнение всякий раз, когда это позволяют сделать имеющиеся налицо факты. Пытаясь поступать так, я старался избегать произвольных утверждений и включал ссылки, представляющие обе спорящие стороны. Интересующая нас область нова и обширна, и нельзя ожидать, чтобы прогресс в ней имел место без неизбежных случайных ошибок в математической теории, экспериментальной технике и в истолковании результатов. Я буду приветствовать всяческие исправления и замечания.

В. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Когда Маркони 12 декабря 1901 г. впервые передал радиосигналы через Атлантический океан, лорд Рэлей указал на то, что этот результат не может быть объяснен простым образом распространением плоской волны. Рэлей высказал предположение, что для объяснения того, каким образом волна следует за кривизной земной поверхности, следует воспользоваться определенной дифракционной теорией.

Дифракционной теории были посвящены исследования Рэлей^{1, 1)} Мак-Дональда², Пуанкаре³, Ценнека⁴, Зоммерфельда⁵, Никольсона⁶, Марча⁷, Рибчинского⁸, Лява⁹, ван-дер-Поля¹⁰ и многих других. Эти исследования были кратко суммированы Фрэнком Е. Смитом¹¹ в 24-й кельвиновской лекции так: „Многолетняя работа ряда наиболее выдающихся мировых математиков оказалась недостаточной для того, чтобы вывести эту, казалось бы, невинную проблему из такого состояния, при котором Никольсон мог сказать, что она одна во всей области математического анализа, относительно которой держатся наиболее расходящихся точек зрения“. Вообще, впрочем, признано, что Ватсон¹² дал в 1919 г. правильный обзор проблемы и обнаружил ошибки, которые были ответственны за такое значительное расхождение. Дифракционной теории недостает громадного фактора, чтобы объяснить интенсивности, наблюдаемые в точках, лежащих значительно ниже видимого горизонта. Как было указано в 1924 г. Лармором¹³, волна длиной в 100 м на Земле соответствует волне видимого света на сфере радиуса 6 см, и поэтому ожидать заметного загибания луча в результате одной дифракции нет никаких оснований. Тщательный математический анализ лишь подтверждает это соображение. Несколько расходящиеся точки зрения были высказаны сравнительно недавно Мейсснером¹⁴ и Кибитцом¹⁵; однако вычисления Кибитца были с успехом подвергнуты критике Мени¹⁶.

Начиная с 1924 г., интерес к дифракционной проблеме ослабел, так как многочисленные новые экспериментальные проверки убедительно доказали, что распространение волн на большое расстояние зависит главным образом от совершенно иных факторов. Впрочем, несомненно, что дифракция играет важную роль в некоторых типах распространения волн на короткие расстояния, и я еще буду иметь возможность вновь обратиться к этому вопросу в разделе С.

В то время как дифракционная проблема изучалась математически, различные исследователи рассматривали также несколько других возможных способов распространения радиоволн в земной атмосфере. Стюарт¹⁷ в 1878 г. высказал предположение, что некоторые типы периодических вариаций земного магнетизма могут быть

¹⁾ Литература будет дана в конце статьи.

объяснены существованием проводящих слоев в верхней области атмосферы. Эта гипотеза была развита далее в 1889 г. Шустером¹⁸. В марте 1902 г. Кеннели¹⁹ опубликовал короткую статью, где говорилось следующее: „Является хорошо известным фактом, что волны беспроволочной телеграфии, распространяющиеся через эфир и через атмосферу над поверхностью океана, отражаются этой электрически проводящей поверхностью“. Тремя месяцами позже Хэвисайд²⁰ написал аналогичную короткую заметку, которая была опубликована в декабре: „Возможно, что в атмосфере вверху имеется довольно хорошо проводящий слой. Если это так, то волны будут им более или менее, так сказать, задерживаться. Тогда волны будут с одной стороны направляться морем, а с другой—одним из верхних слоев воздуха“. Оригинальные статьи Кеннели и Хэвисайда были недавно опубликованы вновь^{21, 22}.

В 1912 г. Пирс и Л. де-Форест обсуждали в частной переписке вероятное объяснение „фэдинга“ радиосигнала на основе представления об интерференции поверхностной волны („земного луча“) и пространственной волны („небесного луча“). Очевидно, что природа явления в общих чертах в это время была уже хорошо понята, хотя и было несколько трудно сформулировать мнение о том, каков точный путь непрямого луча.

В своей ранней статье Кеннели не пытался рассматривать механизм атмосферной проводимости, но оправдывал свои допущения ссылкой на измерения проводимости воздуха в разрядных трубках, принадлежащие Томсону²³. Два важных успеха были достигнуты в связи с этим в 1912 г. Икклзом^{24, 25}. Икклз рассмотрел ионизирующий эффект солнечной радиации, а также дал основную теорию ионной рефракции. Эта фаза теории была развита далее Зальпетером²⁶ и ван-дер-Полем²⁷. Следующий большой успех был достигнут в 1924 г., когда Лармор^{13, 28} исследовал всю проблему заново и приписал большую часть ионной рефракции присутствию в ионосфере большого числа свободных электронов.

Возможность рефракции в нижних слоях атмосферы как результата существования барометрического градиента, градиента содержания водяных паров или температурной инверсии также рассматривалась несколькими исследователями. Все эти эффекты были вычислены, и вскоре же стало очевидным, что максимальная величина загибания, какая может быть вызвана нижними слоями атмосферы, недостаточна для объяснения распространения радиоволн на большое расстояние. Эта фаза вопроса была резюмирована Флемингом²⁹ и Лармором²⁸.

Тем временем в качестве основы для инженерных расчетов получило всеобщее признание простое эмпирическое уравнение, известное под названием „формулы Остина-Когена“. Это уравнение явилось результатом анализа серии экспериментов над распространением волн над водой, произведенных под руководством Остина³⁰ в 1909 и 1910 гг. На крейсерах „Бирмингам“ и „Салем“ производились совместно с мощной наземной станцией в Брэнт-Роке, Массачусетс, многочисленные количественные наблюдения интен-

сивности сигналов при различных длинах волн; суда при этом удалялись от неподвижной станции. Наибольшие расстояния были порядка 1200 миль. Большая часть первоначальных измерений была сделана для длин волн от 1000 до 3750 м.

Экспериментальные результаты Остина удалось описать адекватным образом следующим эмпирическим соотношением:

$$I_R = 4,25 I_S \left(\frac{h_1 h_2}{\lambda d} \right) e^{-\alpha d^{\frac{1}{2}}},$$

где I_R — сила тока в 25-омной приемной антенне высотой h_2 километров, I_S — сила тока в передающей антенне высотой h_1 километров, d — расстояние в километрах, λ — длина волны в километрах, $\alpha = 0,015$ для распространения над морской водой.

Флеминг³¹ показал, что первая часть этого уравнения целиком совместима с первоначальными уравнениями Герца и представляет собой простой закон убывания энергии во фронте волны обратно пропорционально квадрату расстояния. Чтобы удовлетворить экспериментальным кривым, Остин добавил экспоненциальный фактор, приписав это „атмосферному поглощению“. Величина $\lambda^{-\frac{1}{2}}$, встречающаяся в показателе, была введена после тщательного анализа данных Остина Когеном.

Теоретическая формула, выведенная из дифракционной теории^{3, 6, 8}, содержала несколько похожий экспоненциальный член. Однако, помимо большого расхождения в численном значении α , дифракционная формула вместо $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ содержала $\lambda^{-\frac{1}{3}}$. Экспериментальные данные казались достаточно точными, чтобы не допустить возможность этой замены. Гипотеза „отражающего слоя“ получила поэтому значительную дополнительную поддержку в 1919 г., когда Ватсон³² вывел формулу Остина-Когена, решая трудную математическую задачу о распространении волн в среде, ограниченной концентрическими проводящими сферами. Позднее Кенрик³³ указал, что результат Ватсона сохраняет силу и в том случае, когда границы проводящих сфер не определены вполне резко.

В течение многих лет все новые эксперименты, заключавшие дополнительные частоты, большие расстояния и различные типы распространения волн над землей, казалось, только давали все большую поддержку формуле Остина-Когена и расширяли область ее применимости.

Громадные суммы тратились на постройку мощных длинноволновых станций с большим числом линий башенных антенн, достигавших 800 футов высоты. Все длины волн ниже 200 м рассматривались как практически не имеющие никакой ценности для передачи на большие расстояния. Вся эта область длин волн была вследствие этого предоставлена любителям.

При этих обстоятельствах неудивительно, что радиолюбители руководились сперва общепринятыми идеями и потому работали

со своими передатчиками очень близко к 200-метровой волне, которая представляла собой их легальную верхнюю границу. Деятельность радиолюбителей во многих странах сурово ограничивалась и была целиком запрещена в других, но в Соединенных штатах Америки ей оказывалось либеральное правительственное содействие Департаментом торговли. Последующий поразительный прогресс любительского радио представляет собой важную и самую необычную главу в истории науки. Американская лига радиосвязи, строго некоммерческая организация, основанная в 1914 г. покойным Максимом, сделалась ядром цветущего международного общества, которое имело в числе своих активных членов людей почти из каждого отдаленного угла Земли. Оно включает в себе мужчин и женщин всех возрастных групп и имеет представителей почти в каждой профессии. Лига содержит компетентный технический персонал, и ее технический журнал (QST) и справочник стали практически незаменимыми в профессиональных инженерных лабораториях.

Этот замечательный прогресс возник из неожиданного развития изучения области коротких волн, первоначально предоставленной в пользование радиолюбителям. При благоприятных условиях мало устойчивое сообщение на волне в 200 м удалось получить на расстояниях, лежащих далеко за пределами, предписываемыми формулой Остина-Когена. В связи с этим были произведены систематические испытания на все большие и большие расстояния. Последние усовершенствования в вакуумной аппаратуре были немедленно использованы в любительских контурах, между тем как коммерческий прогресс часто затруднялся патентными ограничениями и консервативной экономической политикой. Наконец, в 1921 г. американские радиолюбители послали на побережье Шотландии экспедицию, снабженную приемной аппаратурой самого последнего типа, и с успехом произвели односторонние трансатлантические испытания на коротких волнах по заранее намеченному плану. Испытания были повторены в течение следующей зимы; при этом иногда удавалось установить и двухстороннюю связь. Стало совершенно очевидным, что общепризнанная формула не является надежным руководителем в этой области коротких волн. Побуждаемые естественной любознательностью и стесненными условиями вблизи 200 м, некоторые из наиболее отважных радиолюбителей начали исследовать еще более короткие волны. К удивлению всех передача сделалась еще более сильной и менее неустойчивой. Естественно, что движение вниз по шкале волн после этого ускорилося, и предел ему был положен только конструкцией контуров и вакуумных ламп для очень высоких частот.

Ниже 50 м был наблюден и частично объяснен другой совершенно новый эффект исключительной важности. Было найдено, что сила сигнала уменьшалась до нуля в точках, сравнительно близких к передатчику (скажем, около 50 миль), но в то же время при благоприятных условиях можно было поддерживать исключительно хорошую передачу на тысячи миль между станциями неболь-

шой мощности. Внешняя граница „зоны молчания“ или „области скачка“ представлялась очень резкой³⁴.

Аналогичная „зона молчания“ замечалась ранее в связи с обычным распространением путем звуковых волн громких шумов (даваемых артиллерийским огнем или сильными взрывами). Появление таких акустических миражей можно объяснить вполне удовлетворительно с количественной стороны рефракцией, вызываемой температурной инверсией в стратосфере. Однако рефракция электромагнитных волн в этой области недостаточна для объяснения наблюдавшихся радиомиражей. Многочисленные наблюдения „зоны скачка“ были произведены в 1924 г. группой радиолюбителей, возглавлявшейся Рейнартом³⁵, который правильно приписал это новое явление действию ионизированной области. Эти любительские исследования немедленно подверглись научной проверке и были развиты Тэйлором и Хальбертом³⁶. Рупп³⁷ дал интересный обзор ранних экспериментов и указал на то, что исследовательские отделы различных коммерческих организаций располагали соответствующими коротковолновыми передатчиками и приемниками и ранее, но никогда не подозревали о возможности связи на больших расстояниях с такой аппаратурой.

Вскоре после того, как было понято большое значение этих длин волн, которыми долго пренебрегали, путем международного соглашения было осуществлено новое распределение частот, и от постройки новых длинноволновых станций практически отказались. В последующей борьбе между конкурирующими странами и конкурирующими коммерческими интересами любители быстро утратили около 90% своей прежней территории, хотя несколько „каналов“ было для них сохранено дружескими усилиями представителей американского правительства.

С этими новыми открытиями и с теорией электронной рефракции, предложенной в 1924 г. Лармором, долгий период исследований случайного характера пришел к определенному концу, и начала разворачиваться новая область атмосферной физики. В прежние годы физики уделяли результатам, полученным в качестве побочных продуктов радиосвязи, лишь случайное внимание. В течение последующего десятилетия большая часть успехов была сделана с помощью прямых физических измерений, в которых радиоаппараты служили только в качестве случайных исследовательских инструментов. К сожалению, это изменившееся положение не получило никакого признания в монументальной структуре американских правительственных правил. Академические научные институты поставлены в затруднительное положение негибкими правилами, которые устарели уже 12 лет назад. В связи с тем, что это положение составляет главное препятствие для работы и его нельзя сравнить ни с чем в любой другой области экспериментальной физики, вопрос необходимо будет изучить в больших подробностях в разделе Q. Руководящие официальные лица осведомлены о настоящих трудностях и предложили нам свое сотрудничество;

однако действие стеснительного механизма может быть ускорено более широким знанием фактов.

С. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ФАКТЫ

Под этим заголовком я попытаюсь дать простой анализ наиболее существенных черт, которые отличают различные части радиоспектра, оставив для более позднего изложения детальное изучение частных экспериментов, предназначенных для проверки некоторых специальных аспектов теории ионосферы. Набрасывая этот общий задний фон, картину можно сделать яснее, если разделить радиоспектр на определенные участки, которые обнаруживают характерные типы поведения. Простая количественная классификация этого рода может быть полезна для целей иллюстрации, хотя бы в ней необходимо и имело место несколько произвольное определение границ между различными областями спектра. С этой оговоркой относительно численных данных мы можем принять следующую терминологию:

	Длина волны в м	Частота в килогерцах
Длинные волны	30 000 — 600	10 — 500
Радиовещательные волны . .	600 — 200	500 — 1500
Короткие волны {	A	200 — 100
	B	100 — 50
	C	50 — 10
Квазиоптические волны . . .	10 — 1	30 000 — 300 000
Микроволны	1 — 0.1	300 000 — 3 000 000

Нам нужно будет также рассматривать несколько различных концентрических областей или „слоев“ в ионосфере, действующих несколько различно на различные части радиоспектра. Принимая буквенное обозначение Эпплтона и пренебрегая на один момент всякой „тонкой структурой“ ионосферы, мы можем различать в ней три главные области, которые управляют большинством наблюдающихся эффектов: *F*-область — сильно ионизированная, приближительная высота 240 км, *E*-область — умеренно ионизированная, приближительная высота 100 км, *D*-область — слабо ионизированная, приближительная высота 50 км. После захода солнца ионизация в каждой из областей медленно уменьшается; слабо ионизированная область *D* ночью, повидимому, относительно неэффективна. Нормальный суточный цикл ионизации и рекомбинации часто изменяется внезапными и неустойчивыми возрастаниями ионизации, которые могут происходить в любой из областей и в любой час дня и ночи. Такие изменения особенно часты в слое *D* и в слое *E*. Цикл изменений солнечных пятен продолжительностью в 11 лет, повидимому, влияет на среднюю ионизацию во всех частях атмосферы. Указанные выше высоты являются всего лишь характерными значениями, взятыми с целью иллюстрировать существующий порядок величин. Более подробное рассмотрение измеренных „высот“ будет дано в разделе К.

Свободные электроны в F -области, приводимые в движение радиоволнами, обладают сравнительно большой средней свободной длиной пробега и теряют мало энергии в результате соударений („трения“). В D -области трение в результате соударений является, напротив, определяющим фактором.

„Длинные волны“ довольно хорошо подчиняются формуле Остина-Когена, и распространение по схеме проводящих концентрических сфер дает приемлемое и адекватное объяснение их поведения. При отсутствии решающих экспериментальных фактов мы можем попробовать принять, что D -область служит внешней проводящей сферой в случае дневной передачи на большие расстояния, при скользящем падении. Представляется вероятным, что сравнительно с длиной волны нижняя граница слоя определена очень резко. Более длинные волны, следовательно, не проникают заметным образом в ионизированный слой и не поглощаются в результате сильного затухания, которым сопровождалось бы их

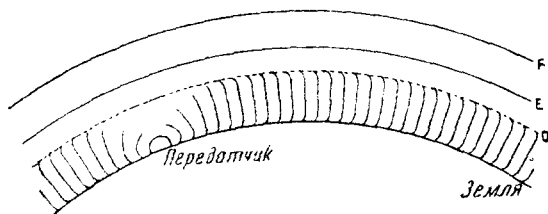


Рис. 1. Распространение длинных волн в дневные часы

распространение в ионизированной области. Проводящий слой действует подобно простому металлическому рефлектору, хотя несомненно, что имеет место и значительное поглощение, являющееся результатом небольшой остаточной ионизации в тропосфере и нижних слоях стратосферы. Некоторое уменьшение ослабления радиоволн замечается в том случае, когда их путь лежит на неосвещенной стороне Земли. При этих условиях естественно предположить, что верхняя граница слоя смещается в сторону E -области.

Рис. 1 показывает непрерывные волновые фронты, простирающиеся от ионизированного слоя к Земле. Это расстояние, если измерять его в длинах волн, сравнительно мало, и здесь нет полного разделения на поверхностную волну („земной луч“) и на пространственную волну („небесный луч“). Так как большая часть энергии переносится к приемнику одним лучом, то длинные волны особенно удобны для пеленгационных целей, будучи сравнительно свободными от искажений, обычно сопутствующих передаче со сложным зигзагообразным путем. Электрический вектор здесь приблизительно вертикален и имеет лишь небольшой уклон вперед, зависящий от величины энергии, поглощенной в пересеченных лучом почве или воде. При этих низких частотах поверхностное ос-

лабление относительно мало. Влияние проводимости земной поверхности было рассмотрено недавно Дином ³⁸. В случае передачи на длинных волнах над морской водой Иокояма и Танимура ³⁹ находят некоторые факты, которые позволяют думать о зигзагообразном луче, последовательно отражаемом ионосферой и морем.

Область „длинных волн“ дает ограниченное число первоклассных телеграфных каналов, свободных от перерывов службы, за исключением тех, которые возникают во время сильных магнитных бурь или ненормально больших „статических“ возмущений. Значение „длинных волн“ для телефонии немало, так как более широкие полосы частот, занятые телефонными каналами, привели бы к чрезмерному теснению. Большая часть телеграфных каналов занята дорогостоящими чрезвычайно мощными станциями, которые непрерывно эксплуатировались в течение многих лет. При планировании новых станций относительная устойчивость и надежность передачи на „длинных волнах“ обычно не перевешивают меньшую стоимость сравнительно „коротковолнового“ контура.

Радиовещательные волны обеспечивают надежную службу высокого качества на ограниченной площади в соседстве с передающей станцией. Размеры и очертание этой площади зависят от конструкции антенны, длины волны, геологических условий и цикла изменения солнечных пятен; в качестве характерного примера можно, впрочем, назвать круг радиусом 50 миль. За пределами этой площади располагается узкая зона, характеризующаяся сильнейшим фэдингом, который особенно отчетлив ночью. Станции средней мощности, расположенные за пределами 150 миль, в течение дневных часов обычно не принимают, ночью же часто покрываются тысячи миль, и не является редкостью трансокеанский прием. Ночная передача на большие расстояния, однако, ненадежна и подвержена большому фэдингу.

В дневные часы почти вся энергия, которая приходит к приемнику на „радиовещательной волне“, переносится „поверхностной волной“. Точная природа этой поверхностной волны была предметом обширных исследований. Согласно точке зрения большинства поверхностная волна („земной луч“) является истинной направляемой волной, аналогичной по своей природе волнам высокой частоты, которые могут распространяться вдоль одной медной проволоки. Зоммерфельд ^{5, 40} на основании уравнений дифракции Цепенка ⁴ получил формулу, описывающую распространение волны вдоль поверхности раздела между атмосферой и полупроводящей землей. Численные и графические расчеты по этой формуле были произведены Гершельманом ⁴¹, Рэтклиффом и Барнетом ⁴², Рольфом ⁴³, ван-дер-Полем ⁴⁴, Визе ⁴⁵, Эккерсли ⁴⁶, Ниссенom ⁴⁷ и Нюнье ⁴⁸. Особое решение Меррея ⁴⁹ было исправлено Ниссенom ⁵⁰; оказалось, что оно совместимо с формулой Зоммерфельда. Эккерсли считает, что формула Зоммерфельда имеет значение для вычисления интенсивности напряженности поля прямого луча, даваемого волнами от 60 до 2000 м на расстояниях до 2000 миль. Барфилд ⁵¹ воспользовался этой формулой для определения геологических раз-

личий; однако примененный им прием был подвергнут критике Энглундом ⁵²; Нэтер ⁵³ принимает, что поверхностные волны, изученные Ценнеком и Зоммерфельдом, теоретически возможны, но утверждает, что существующие методы получить их не позволяют. В связи с этим интересно отметить, что недавно Мускат ⁵⁴, занимаясь сейсмическими волнами, нашел, что в теорию распространения упругих волн вдоль поверхности раздела двух однородных упругих сред необходимо внести известное изменение.

Мы могли бы считать гипотезу ведомой волны доказанной экспериментально, если бы не было известно, что прямая волна, распространяющаяся кратчайшим путем через тропосферу от передающей антенны, будет проникать в долины и огибать препятствия в силу обычной дифракции и может приблизиться к принимающим точкам без помощи проводимости земной поверхности. Этот эффект

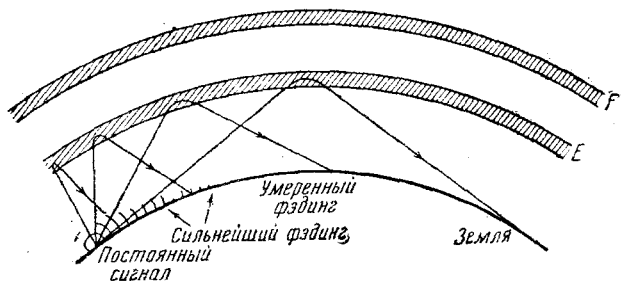


Рис. 2. Распространение радиовещательных волн ночью

должен быть доступен подсчету; однако простая теория дифракции для острого края не является для него достаточно хорошим приближением, и вся проблема, повидимому, еще не была до сих пор решена удовлетворительным образом. Для нашей настоящей цели достаточно описать поверхностную волну как устойчивую надежную волну, которая не обнаруживает заметного суточного изменения. Ее интенсивность уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону. Ее область действия увеличивается с длиной волны и с располагаемой станцией мощностью и может быть увеличена такой конструкцией антенны, при которой испускаемая энергия концентрируется в пределах небольшого телесного угла ⁵⁵.

Днем практически все излучение от радиовещательных антенн для больших углов поглощается ионосферой. Частота достаточно велика для того, чтобы позволить волне проникнуть в *D*-область, где она быстро затухает благодаря трению, возникающему в результате соударений электронов.

После наступления ночи ионизация *D*-области уменьшается, и радиовещательные волны сильно „отражаются“ от слоя *E*, как это показано на рис 2. Уменьшенное затухание является результатом более длинного среднего свободного пробега электро-

нов на бóльшей высоте (эффекты рефракции и поляризации будут рассмотрены позднее). В точках, близких к передатчику, энергия пространственной волны („небесного луча“) много меньше энергии поверхностной волны („земного луча“), но доля энергии пространственной волны не уменьшается быстро с расстоянием. В результате уменьшения интенсивности в поверхностной волне по экспоненциальному закону мы скоро приходим в такую зону, где обе волны создают приблизительно одинаковые поля. Малейшее изменение атмосферных условий вызовет сильнейший фэдинг, так как соотношение между фазами двух волн при этом изменяется. Часто наблюдаемый периодический фэдинг указывает на прогрессивное изменение в эквивалентном пути пространственной волны.

В удаленных точках поверхностная волна совершенно неэффективна, пространственная же волна при благоприятных условиях обнаруживается на больших расстояниях. Намба и Хирага ⁵⁶ наблю-

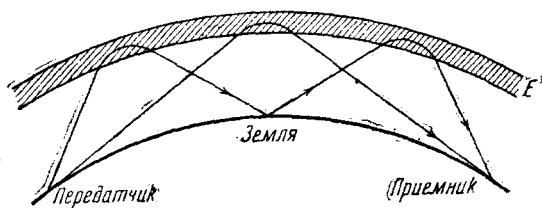


Рис. 3. Радиопередача при помощи многократного отражения небесного луча

дали улучшение передачи через Тихий океан в годы, близкие к минимуму солнечных пятен. Такая передача лучше осенью, чем в середине зимы, и всего хуже в середине лета. Беркнер ⁵⁷ сообщал о приеме многочисленных американских радиовещательных станций в южной полярной области, на расстояниях, превосходящих 12 000 км. За пределами зоны поверхностной волны сигнал часто бывает сравнительно устойчивым, хотя и недостаточно надежным. Медленные изменения интенсивности поля происходят в результате изменений в поглощении. В других случаях периодический фэдинг является результатом того, что распространение пространственной волны происходит по зигзагообразному пути типа, показанного на рис. 3.

Ионизированная область не является целиком линейной передающей средой. Как показано на рис. 4, распространение волны от точки А до точки С может быть заметно искажено перекрестной модуляцией мощной посторонней станции, расположенной вблизи средней точки на дуге большого круга, связывающего передатчик и приемник. Эти эффекты взаимодействия будут рассмотрены в разделе S. Возмущение это всюду незначительно, за исключением нижней границы частот волн радиовещательного диапазона.

Для удобства описания области коротких волн я разделил ее на три части. Длины волн от 100 до 200 м, как известно, неустойчивы и неудовлетворительны для дальней связи. Поверхностная

волна затухает настолько быстро, что обслуживаемая ею местная площадь слишком мала для эффективного использования в радиовещательных целях. Пространственная волна также испытывает очень сильное затухание, и поэтому данную часть спектра можно рассматривать как подлинную атмосферную полосу поглощения. Позднее мы упомянем и о других теориях, но можно все же считать почти определенным, что эти аномальные атмосферные эффекты обязаны резонансной частоте свободных электронов, приводимых в движение волной. Электроны перемещаются по круговым орбитам около силовых линий земного магнитного поля и обладают в этой области собственной частотой.

Неустойчивые свойства 100—200-метровых волн возникают частично за счет одного дополнительного усложнения. Это — переходная область частот, и здесь можно ожидать отражений от слоя E , или от слоя F , или одновременно от обоих слоев. Более корот-

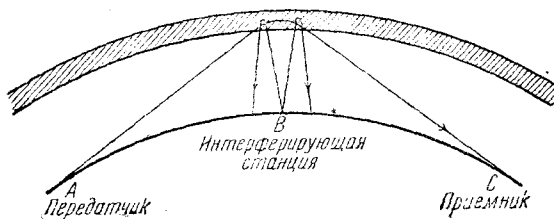


Рис. 4. Взаимодействие

кие волны в этой полосе частот способны проникать в область E , но их частоты недостаточно высоки, чтобы предотвратить заметное частичное отражение, затухание, поляризацию и понижение групповой скорости.

В группу B коротких волн мы можем включить область, простирающуюся от 50 до 100 м. Эти волны особенно ценны для передачи над землей в пределах одного континента, и ими широко пользуются авиация и военное ведомство. За исключением точек, находящихся в радиусе 30 миль от передатчика, где поверхностная волна дает заметный эффект, прием определяется распространением пространственной волны. Вообще надежная пространственная волна приходит от F -слоя, хотя нередки и сильные отражения от E -слоя. Можно, повидимому, думать, что эти непостоянные отражения вызваны относительно малыми плотными ионными облаками, заходящими случайно в E -область. В других случаях имеется общее увеличение ионизации, которое перемещает путь волны на несколько часов из F -области в E -область. Так как это перемещение протекает нередко очень быстро, то переходы этого типа происходят часто без сильного фэдинга или перерыва связи. Хотя группой B иногда пользуются в трансокеанской службе, поглощение при скользящем падении здесь несколько больше, чем в группе C .

Группа C , простирающаяся от 10 до 50 м, характеризуется, главным образом, замечательным действием при передаче на боль-

шие расстояния между различными континентами и заметным эффектом „расстояния скачка“, о котором мы упоминали ранее в историческом обзоре.

Чтобы понять это явление „расстояния скачка“ остановим наше внимание сперва на ночной пространственной волне, отражающейся от слоя F , или, иначе, на эхо, которое возвращается к земле в точке вблизи передатчика после отражения при почти нормальном падении. Так как плотность ионизации в течение ночи медленно уменьшается, то пространственная волна („небесный луч“) постепенно проникает в ионизированную область на все большую и большую высоту. Соответствующее время опоздания сигнала — эхо при этом постепенно увеличивается. Аналогичный эффект можно получить искусственно путем увеличения частоты передатчика, в то время как плотность ионизации остается в существенном постоянной. И в том и в другом случаях может быть достигнуто критическое состояние, в котором медленное увеличение „эффективной высоты“ (измеренной по времени опоздания радиозэхо) нарушается внезапным скачком ее вверх. В этот же самый момент сила отраженного сигнала быстро уменьшается, и внезапно он исчезает совсем.

Внезапное возрастание времени опоздания эхо нетрудно распознать как свидетельство соответствующего уменьшения групповой скорости волны, когда она входит в ионизированный F -слой и проходит через значительную его толщину. Аналогичные эффекты часто дает E -область, когда плотность ионизации близка к критическому значению, которое будет как раз достаточным для того, чтобы дать отражение при данной частоте. Такие явления предсказываются математической теорией; при этом естественно ожидать соответствующего уменьшения силы сигнала, обаянного затуханию.

По аналогии с поведением, наблюдаемым при подобных же обстоятельствах в E -области, можно предположить, что полное исчезновение сигнала соответствует полному проникновению сигнала через F -слой и происходящей в результате этого потере сигнала в межзвездном пространстве. Это — обычная гипотеза; многими авторами она рассматривалась как самоочевидный факт. Эккерсли, однако, склоняется к противоположной идее о полном поглощении волны в пределах F -слоя. Мы вернемся к этому вопросу в разделе К.

В согласии и с той и с другой гипотезами сигнал, который был потерян этим путем, может быть восстановлен увеличением угла падения сверх определенного критического значения. Мы должны, следовательно, ожидать картины хода луча, представленной на рис. 5.

В точках, лежащих на небольшом расстоянии (скажем, до 15 миль) от передатчика, сигнал поверхностной волны заметен, но он совершенно неощутим в удаленных точках вследствие очень сильного ослабления. В точках, находящихся за пределами этой малой зоны поверхностной волны, никакого надежного сигнала не наблюдается до тех пор, пока мы не достигнем резко очерченной пограничной кривой, где обнаруживается обычная идущая вниз про-

странственная волна („небесный луч“). Главная зона приема лежит за этой границей.

Тщательным исследованием эти явления расстояния скачка могут быть обнаружены ночью в области длин волн от 50 до 100 м, но вообще такие расстояния скачка коротки, и эффект сильно маскируется распространением поверхностной волны. Однако в полосе длин волн 10—50 м расстояния скачка могут измеряться тысячами миль. Здесь эффект становится определяющим фактором при выборе наилучшей частоты для применения в контуре, рассчитанном на определенное большое расстояние, в какой-либо час суток, сезон и год.

„Зона молчания“ не является совершенно мертвой. Сильные сигналы дают своеобразное ревербирующее эхо, легко обнаруживае-

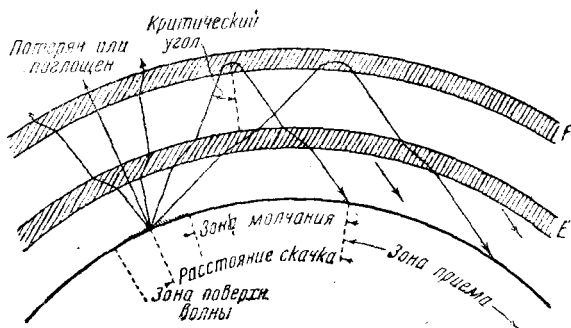


Рис. 5. Расстояние скачка

мое опытным слухом в передаче речи или в телеграфной передаче. Эти рассеянные сигналы до сих пор полностью еще не объяснены; за большими подробностями по этому вопросу мы отсылаем к разделу R.

Когда частота волны увеличивается, граница зоны скачка перемещается наружу, пока, наконец, зона молчания не охватит всю Землю и передача посредством отражения от ионосферы не станет более невозможной. При обычных условиях этот предел достигается вблизи 10 м. Следовательно, длины волн, несколько большие 10 м, представляют большую ценность при передаче днем на большие расстояния, между тем как длины волн, немного меньшие критического значения, в этом отношении совершенно бесполезны. Плотность ионизации F-слоя, однако, значительно меняется от дня ко дню. Отклонения от среднего значения нередко позволяют получить необычную передачу на такой длине волны, как 8,5 м; вполне определенно установлено также, что когда ионизация исключительно высока, на больших расстояниях могут быть получены 5-метровые сигналы.

Вообще же, однако, в квазиоптической области, простирающейся от 1 до 10 м, абсолютно нельзя полагаться на передачу с помощью

ионосферы и передачу посредством ведомой поверхностной волны. Эта область, кажущаяся узкой, если измерять ее в длинах волн, покрывает громадную область частот и поэтому особенно привлекательна для будущих телевизионных применений. Эти волны особенно удобны также для двухсторонней связи с патрулирующими полицейскими машинами, так как короткий вертикальный стержень, который легко может нести движущаяся машина, хорошо служит в качестве несомненно эффективной передающей антенны в четверть волны. Надежно обслуживаемая площадь при этом практически ограничивается территорией, заключающейся в пределах оптического горизонта, и эти волны полезны, главным образом, для связи в пределах одного района столицы.

К сожалению, площадь, где сказываются помехи для квазиоптической передачи, много больше по своему протяжению, чем надежно обслуживаемая площадь. Даже при сравнительно низкой мощности, применяемой в современных экспериментальных установках, очень сильные 5-метровые сигналы часто принимаются значительно ниже видимого горизонта в точках, расположенных больше чем в 100 милях от передатчика. Этот эффект определенно связан с метеорологическими условиями в нижних слоях тропосферы и является, повидимому, простым явлением миража, вызываемым температурными инверсиями, которые часто имеются в атмосфере на высоте нескольких тысяч футов. Этот тип передачи представляется возможным использовать в качестве нового метеорологического инструмента при изучении распределения и движения воздушных масс. Предварительные опыты, проведенные Американской лигой радиосвязи совместно с Гарвардским университетом, обнаружили поразительно тесную связь между квазиоптической передачей на пути Бостон—Гартфорд и соответствующими метеорологическими градиентами температуры („скоростями падения“), измеренными в бостонском аэропорте и в Митчелл-Филде, вблизи Нью-Йорка. Посредством одновременных полевых экспериментов на длинах волн в 1,25, 2,50 и 5,00 м мы исследуем в настоящее время возможный эффект дифракции на вершинах холмов на квазиоптическую передачу. Представляется, что простая ведомая волна, следующая поверхности земли, вследствие исключительно сильного затухания при таких высоких частотах совершенно не эффективна. Мамфорд считает, что большой дипольный момент молекул водяного пара может значительно содействовать загиганию квазиоптических волн. Градиенты содержания водяного пара обычно сопровождают температурные инверсии.

Микроволны, простирающиеся от 0,1 до 1,0 м, обнаружат, вероятно, черты, напоминающие квазиоптические волны. Для исследований в этой области необходимо построить радиолампы специальных типов. Выход мощности и эффективность, полученные до сих пор, очень низки, и о самой передаче имеется еще мало сведений. Впрочем, на волнах длиной 17 см была с успехом установлена двухсторонняя связь через Английский канал; развиваются также другие эксперименты.

D. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ

Детальное изучение действия ионосферы требует сложной математической формулировки, но основные факты могут быть объяснены очень простым путем.

Рассмотрим действие одного электрона, помещенного между пластинами конденсатора. Если частота переменной разности потенциалов, приложенной к пластинам конденсатора, низка и если движение электрона стесняется упругими силами, то смещение электрона по фазе в основном совпадает с приложенной разностью потенциалов; колеблющийся заряд образует переменный ток в фазе с максвелловским током смещения через пустое, в остальном, пространство. Другими словами (отрицательный), электрон приближается к положительной пластине конденсатора на пике положительной половины цикла. Он нейтрализует поэтому часть заряда на пластинах конденсатора и позволяет имеющейся налицо разности потенциалов прогонять через внешний контур больший зарядный ток. В таких случаях мы обычно говорим, что присутствие связанного электрона повышает диэлектрическую постоянную области, пронизываемой электрическим полем.

С другой стороны, если упругая связь, действующая на электрон, равна нулю или если частота настолько высока, что сила инерции преобладает, соотношение фаз будет обратным, и колеблющийся заряд может понизить эффективную диэлектрическую постоянную среды до значения, меньшего единицы. Этот эффект нам хорошо знаком в оптике, так как он дает общепринятое элементарное „резонансное“ объяснение аномальной дисперсии, наблюдаемой на стороне высоких частот линии поглощения оптического спектра. Трение, возникающее в результате столкновений, если оно имеется, вводит член сопротивления, который уменьшает величину изменения диэлектрической постоянной, но не может изменить его знак.

Совершенно такие же явления определяют основные условия, управляющие распространением радиоволны в ионосфере. В результате действия свободных электронов, приводимых в движение электромагнитным полем волны, диэлектрическая постоянная и соответственный показатель преломления ионизированной области оказываются меньше единицы. Ионизированный слой является, следовательно, средой, менее плотной в оптическом отношении, чем неионизированные слои воздуха, лежащие ниже. Если граница между средами достаточно резкая (сравнительно с длиной волны электромагнитного излучения), то на ней имеет место полное внутреннее отражение: лучи, встречающие слой под углами, превосходящими критический угол, будут сильно отражаться обратно к земле.

Если же граница между двумя средами не резкая, то падающий луч постепенно преломляется, уклоняясь все дальше и дальше от нормали и описывая кривую, которая зависит от скорости увеличения плотности свободных электронов. Если полное увеличение плотности свободных электронов оказывается достаточным, то луч

в конце концов примет горизонтальное направление, а затем будет следовать по идущему вниз симметричному пути, который приведет его обратно на землю. Если максимальная плотность недостаточна, то луч проникнет через слой. Очевидно, что для слоя с данной максимальной плотностью (и для волны данной частоты) имеется определенный критический угол начального падения, который и определяет, возвратится или не возвратится данный луч на землю. Изучение этого типа рефракции может рассматриваться как детальное исследование механизма, который ответственен за отражение электромагнитной волны от проводящей поверхности. Когда граница проводящего слоя определена не резко, то иногда представляет преимущество рассматривать действительный кривой путь луча. Для многих целей достаточно, впрочем, заменить кривой

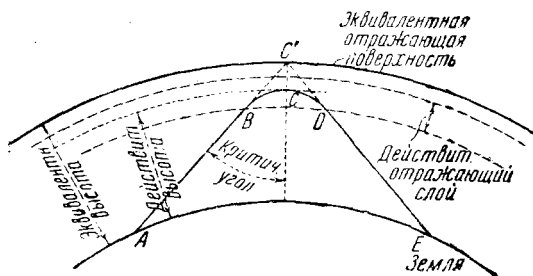


Рис. 6. Соотношение между действительным и эквивалентным путем луча

путь $ABCDE$ ломаным эквивалентным путем $ABC'DE$, представленным на рис. 6, и говорить об „эквивалентной высоте“ некоторого воображаемого рефрактора. Мы можем пользоваться выражением „действительная высота“, относя его к высоте, на которой встречается максимум плотности свободных электронов. В частном случае луча, который встречает слой под критическим углом, эта высота совпадает с максимальной высотой искривленного луча. Все остальные полностью отраженные лучи будут располагаться ниже этой высоты.

Брейт и Тьюв⁵⁸ привлекли внимание к тому факту, что время, требующееся определенному радиосигналу для того, чтобы пройти путь $ABCDE$ через действительную ионизированную среду, в точности равно времени, требующемуся ему для того, чтобы пройти путь $ABC'DE$ в пустом пространстве. Следовательно, эквивалентная высота, определенная геометрически рис. 6, измеряется вполне правильно путем прямых наблюдений временами опоздания эхо, без поправок на понижение групповой скорости, которое замедляет сигнал в ионизированном слое. Эквивалентные высоты, измеренные этим приемом, совпадают поэтому с эквивалентными высотами, определенными геометрически измерением угла прихода обратного луча.

Действительная высота слоя и его градиент ионизации, очевидно, не могут быть определены непосредственно на основании какого-либо одного единственного наблюдения. Делать заключение об этих величинах необходимо косвенным путем из ряда наблюдений эквивалентной высоты, в которых применяют различные частоты или различные пути, или же и то и другое. Есть основания думать, что нижняя граница E -слоя выражена относительно резко и что измеренная эквивалентная высота превосходит действительную высоту всего лишь на несколько процентов. Граница области более размыта, и действительные высоты для нее до сих пор хорошо еще не известны. Предварительные данные свидетельствуют, как кажется, о том, что эквивалентные высоты могут превосходить действительные высоты по меньшей мере на 25%. В литературе в тех случаях, когда это явно не указано, данные для высоты слоя почти всегда относятся к эквивалентным высотам, определенным из прямых экспериментальных наблюдений.

Пренебрегая на момент изменениями, вносимыми земным магнитным полем и трением, являющимся результатом соударений электронов, мы легко можем вывести простую формулу для показателя преломления ионизированной среды. Более детальный анализ будет дан в разделе Н.

Педерсен⁵⁹ предложил следующее упрощенное изложение, основывающееся на элементарных соображениях и дающее известное уравнение Икклза²⁴ и Лармора¹³.

Рассмотрим конденсатор с пластинами площади единица, разделенными в вакууме расстоянием в 1 см. Единичный конденсатор, снабженный соответствующими охранными кольцами, имеет емкость в $\frac{1}{4\pi}$ абсолютных единиц.

Введем теперь в пространство объемом в 1 см³, заключенное между пластинами конденсатора, N электронов, каждый с зарядом e и массой m и приложим к конденсатору переменную разность потенциалов с мгновенным значением v , с угловой частотой ω и амплитудой V . Электроны будут приведены в движение электрическим полем; их скорость будет отставать по фазе на четверть периода от приложенной разности потенциалов; ее максимальное значение будет

$$U = \frac{e}{\omega m} V.$$

Но N зарядов, каждый величиной e , движущихся с общей всем им скоростью u , эквивалентны элементу тока в 1 см длины с силой

$$i_e = Ne \cdot u.$$

Амплитуда этого запаздывающего переменного тока есть поэтому

$$I_e = NeU = \frac{Ne^2}{\omega m} V = \frac{V}{\omega \frac{m}{Ne^2}},$$

и колеблющиеся электроны дают такой же эффект, как и эквивалентная самоиндукция в $\frac{m}{Ne^2}$ абсолютных единиц, шунтирующая конденсатор.

Что же касается полного тока во внешнем контуре, то эта комбинация эквивалентна конденсатору с емкостью

$$C' = \frac{1}{4\pi} - \frac{Ne^2}{\omega^2 m},$$

или, следовательно, единичному конденсатору с диэлектрической постоянной

$$\epsilon = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{\omega^2 m}.$$

В этом уравнении ω и N могут рассматриваться как независимые переменные, хотя в экспериментальной обстановке можно изменять только ω .

Очевидно, что теория предсказывает также дополнительное уменьшение диэлектрической постоянной в результате присутствия более тяжелых ионов того или другого знака, и мы легко могли бы ввести дополнительные члены аналогичной формы, чтобы учесть этот эффект. Так как, однако, масса иона встречается в знаменателе того члена, который вычитается, то один электрон более эффективен, чем громадное число тяжелых ионов. Тем не менее, некоторые физики полагают, что ионы водорода могут давать заметный эффект в ионосфере. Эта возможность будет рассмотрена в одном из дальнейших разделов. Очевидно также, что увеличение диэлектрической постоянной, которое происходит в течение ночи, может быть результатом, главным образом, нейтрализации электронов положительными ионами или же, главным образом, результатом простого захвата электронов более тяжелыми нейтральными атомами или молекулами.

Так как число N может сделаться очень большим, то очевидно, что диэлектрическая постоянная может уменьшиться до нуля и даже изменить свой знак на обратный. Такое явление часто происходит в ионосфере в областях частот, применяемых в практике радиосвязи. Представляет поэтому интерес исследовать влияние этой перемены знака диэлектрической постоянной на показатель преломления.

Педерсен указывает на то, что обычное приближенное выражение $n = \sqrt{\epsilon}$ справедливо только для положительных значений ϵ . Это очень серьезное ограничение, поскольку многие авторы принимали, что отрицательная диэлектрическая постоянная necessarily предполагает мнимый показатель преломления. В немагнитной проводящей среде правильным соотношением является следующее:

$$n = \left[\frac{\epsilon}{2} + \left\{ \frac{\epsilon^2}{4} + \left(2\pi \frac{c^2 \sigma}{\omega} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Там, где проводимостью можно пренебречь, это выражение сводится к такому:

$$n = \left[\frac{\varepsilon}{2} + \left(\frac{\varepsilon^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

что дает

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\varepsilon} & \text{для } \varepsilon \geq 0, \\ n &= 0 & \text{„ } \varepsilon \leq 0. \end{aligned}$$

Мы можем также отметить, что фазовая скорость V_p волны в ионосфере дается выражением

$$V_p = \frac{c}{\left(1 - \frac{4\pi Ne^2}{\omega^2 m} \right)^{\frac{1}{2}}},$$

где c — скорость света

Скорость V_p (превосходящая скорость света) есть величина, которую нельзя измерить непосредственно. Быстрота распространения наблюдаемого радиосигнала измеряется групповой скоростью V_g причем

$$V_g = \frac{V_p}{\left(1 - \frac{\omega}{V_p} \cdot \frac{dV_p}{d\omega} \right)} = c \left(1 - \frac{4\pi Ne^2}{\omega^2 m} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Присутствие в среде свободных ионов замедляет, следовательно, сигнал.

В случае ионосферы эти соображения имеют прямое применение к наиболее важным экспериментальным фактам, встречающимся в обычной радиосвязи; позднее мы, впрочем, должны рассмотреть изменения, вызываемые магнитным полем Земли и трением, возникающим в результате соударений.

Когда показатель преломления ионизированного слоя приближается к нулю, то это же самое имеет место и для критического угла. Мы можем ожидать, что в пределе полное внутреннее отражение произойдет даже и при нормальном падении. Мы можем выразить это предсказание на другом языке, сказав, что зона скачка для достаточно высокой плотности электронов в слое или при достаточно низкой частоте передатчика сжимается до нуля. Эти ожидания хорошо подтверждаются экспериментом.

Обычно принято поэтому говорить, что радиосигнал, направленный вертикально вверх, проникает в область возрастающей плотности свободных электронов и распространяется со все меньшей и меньшей групповой скоростью, пока, наконец, не достигает такой высоты, где плотность электронов как раз достаточна для того, чтобы понизить показатель преломления луча до нуля. В этой точке направление луча в силу полного внутреннего отражения изменяется на обратное, и сигнал распространяется вниз с возрастающей скоростью, достигающей скорости света, когда луч выхо-

дит из ионизированного слоя. Если концентрация свободных электронов в наиболее плотной части слоя не вполне достаточна для того, чтобы понизить показатель преломления до нуля, то вертикальный луч проходит через всю ионизированную область, и сигнал выходит выше ее со скоростью света. На несколько большей высоте он может затем встретить более плотный слой, который возвратит его обратно на Землю; при этом луч проходит по пути к приемной антенне через нижний слой вторично. Когда максимальная плотность электронов в нижнем слое лишь незначительно меньше критического значения, то сигнал сильно задерживается этим круговым путешествием через нижний слой; эквивалентная высота верхнего слоя может в силу этого оказаться ненормально увеличенной по меньшей мере на 100%. Подобные эффекты, однако, легко обнаруживаются и поддаются истолкованию, когда они встречаются в целой серии экспериментальных наблюдений.

Хотя такое элементарное объяснение отражения при вертикальном падении в диффузной среде представляется весьма естественным и хорошо согласуется с экспериментальными наблюдениями, оно не может рассматриваться как строгая и полная теория данного явления. У нас нет очевидного права обобщать простые законы полного внутреннего отражения и так уверенно применять их в области, которая обладает непрерывно изменяющимися оптическими свойствами. Различные попытки разрешить эту трудность будут рассмотрены в разделе G; однако вся эта теоретическая проблема в целом является трудной и до сих пор еще не решена таким методом, который был бы удовлетворительным во всех отношениях.

(Окончание в следующем выпуске)