



Б.М. Болотовский

ОЛИВЕР ХЕВИСАЙД OLIVER HEAVISIDE

*

Глава тринадцатая

С первых лет XX в. начала присуждаться Нобелевская премия по физике. Довольно быстро эта премия стала показателем высшего международного признания.

В 1902 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Хендрику Антону Лоренцу и Питеру Зеemannу. В своей нобелевской речи, излагая историю развития электродинамики и говоря о своей электронной теории, Лоренц упомянул о Хевисаиде: *"...я взял общепринятые со времени работ Герца и Хевисаида уравнения и добавил некоторые допущения о силе, действующей на электрон"* [101].

Трудно сказать, читал ли Хевисайд нобелевскую лекцию Х.А. Лоренца, и если читал, то какие испытывал при этом чувства. Может быть, он радовался тому, что Лоренц отметил его в качестве предшественника, а может быть и ворчал про себя. Дело в том, что выражение для силы, действующей на электрон в магнитном поле, Хевисайд получил на несколько лет раньше Лоренца.

Хевисайд хорошо знал работы Лоренца (по крайней мере, некоторые) и даже излагал их содержание в своих статьях, имея в виду, что английский читатель мог и не знать этих работ, а если знал, то ему было бы трудно их прочесть, потому что они были опубликованы не на английском языке. Вот характерная для Хевисаида выдержка из работы 1900 г. (эта работа впоследствии вошла в третий том "Электромагнитной теории") [102]:

После глубоких исследований мне посчастливилось открыть работу профессора Х.А. Лоренца «Опыт теории электрических и оптических явлений в движущихся телах» (Лейден, 1895). Это важное приложение максвелловской теории к оптическим явлениям следовало бы сразу выполнить на английском языке, чтобы избежать повторений. Печально, но факт, что лишь немногие британцы имеют талант к изучению языков. Это происходит не от лени, а главным образом от умственной неспособности, которая сочетается с мнением, что одного языка вполне достаточно. Иностранцы, по-видимому, наоборот, имеют от природы способность к языкам до такой степени, что они изобрели большое количество языков и, как правило, владеют сразу несколькими из них. Очень хорошо. Осмелюсь предложить: пусть они принесут нам, бедным островитянам, пользу своими знаниями, издавая все свои лучшие работы на английском языке. И почему бы не сделать английский язык международным языком науки? Для иностранцев это было бы все равно, а для народов Великобритании, Ирландии и для других, говорящих на английском языке, это было бы великим благом."

Дальше Хевисайд пишет, что, поскольку работа Лоренца известна в Англии не так хорошо, как она того заслуживает, он приведет ее краткое изложение. В этом изложении он не входит в детали, ограничиваясь общими выводами, и выражает удовлетворение от этой работы по нескольким причинам: во-первых, работа Лоренца дает формулу Френеля для скорости электромагнитной волны в движущейся среде. Во-вторых, Лоренц применяет векторный, а не кватернионный анализ, это обстоятельство Хевисайд отмечает *"с личной благодарностью"*, в-третьих, Лоренц работает с уравнениями полей, не вводя потенциалов, а также принципа наименьшего действия, про который Хевисайд пишет, что он, вопреки его названию, увеличивает количество работы. Здесь, как и почти всюду у Хевисаида, некоторые замечания очень важны по существу, некоторые отражают его личные пристрастия или неприязнь, а есть и просто шутливые высказывания.

Хевисайд постоянно интересовался электродинамикой движущихся сред, но его работы в этой области представляют теперь лишь исторический интерес, как и его модели эфира.

Лоренц и в дальнейшем подчеркивал роль Хевисаида в развитии теории Максвелла. В своей книге "Теория электронов", изданной в 1906 г., Лоренц писал:

Мы будем использовать эти формулы, но не в той довольно сложной форме, в какой их можно найти в трактате Максвелла, а в более ясной и более простой форме, приданной им Хевисайдом и Герцем [103].

Когда Лоренц это говорил, он имел в виду не только форму записи, а нечто гораздо большее - то понимание, которое было внесено работами Хевисаида и Герца.

Лоренц не преувеличивал. Мы знаем, что работы Хевисайда и Герца во многом способствовали прояснению физических основ теории Максвелла. В книге А.Ф. Иоффе "Основные представления современной физики" есть такие строки, написанные о Лоренце:

Автор электронной теории рассказывал мне, что, познакомившись впервые с уравнениями Максвелла, он не смог понять их физического смысла и обратился к переводчику сочинений Максвелла. Но и этот подтвердил, что никакого физического смысла эти уравнения не имеют, понять их нельзя; их следует рассматривать как чисто математическую абстракцию [104].

В 1926 г. Лоренц прочел в Калифорнийском технологическом институте курс лекций "Проблемы современной физики". Говоря об электродинамике, он отмечал:

То, что нам теперь известно, - это в первую очередь заслуги Максвелла, а после него - Хевисайда и Герца [143].

Это было сказано через год после кончины Хевисайда, и сказано Х.А. Лоренцем, который с полным основанием считается создателем современной классической теории взаимодействия электромагнитного поля с веществом. Это было сказано об основах теории электромагнетизма, которые послужили исходным пунктом для составивших эпоху исследований самого Лоренца.

Интересно здесь отметить, что в собрании научных трудов Лоренца есть статья "Доказательство теоремы, высказанной Хевисайдом" [105]. Лоренц доказывает утверждение Хевисайда, сформулированное во втором томе его "Работ по электричеству". Утверждение это можно в частном виде изложить так: рассматривается некоторый электрический контур, в который входят омические сопротивления, индуктивности и емкости. В этом контуре имеется источник постоянного напряжения. Сначала источник отключен. В некоторый момент включается источник. Тогда в системе возникнет ток, который сначала будет как-то меняться, а через некоторое время примет установившееся значение. При этом в системе появятся постоянные магнитные поля (за счет индуктивностей), постоянные электрические поля (в пространстве между обкладками конденсаторов) и будет выделяться джоулево тепло (на омических сопротивлениях), причем после установления постоянного тока в каждую единицу времени будет выделяться одно и то же количество тепла. До того, как возникло это установившееся состояние, батарея затратила работу на создание в системе стационарных токов и полей.

Теорема Хевисайда дает способ вычисления этой работы внешних сил, затраченной на создание стационарного состояния. Предполагается, что за время установления в каждую единицу времени выделялось такое же джоулево тепло, как и после установления. Определяется количество джоулева тепла, которое выделилось бы в этом случае в системе за время установления. К этой величине добавляется удвоенная полная энергия электрического поля системы в установившемся состоянии, а затем вычитается удвоенная полная энергия магнитного поля системы в установившемся состоянии. Полученное таким образом выражение определяет работу батареи на создание установившегося состояния.

Теорема Хевисайда сформулирована им в более общем виде и относится не только к электрическим цепям, а к любым системам, в которых внешнее поле может совершать работу.

В работе Хевисайда, вышедшей в 1888 г., эта теорема была приведена без доказательства. Через 34 года, в 1922 г., Лоренц заинтересовался этой теоремой и доказал ее.

Почему Лоренц заинтересовался этой теоремой Хевисайда много времени спустя после того, как Хевисайд ее сформулировал? Статья Лоренца, в которой доказывается теорема Хевисайда, была первоначально опубликована в 1922 г. в Трудх Национальной академии наук США. В конце статьи имеется примечание редактора:

Эта общая теорема, высказанная без доказательства Хевисайдом, была использована Чарльзом Мэннебеком в его докторской диссертации «Излучение от линий передачи», защищенной в Массачусетском технологическом институте в июне 1922 г. Поскольку ни в учебниках, ни в периодической литературе доктор Мэннебек не смог найти удовлетворительное доказательство этой теоремы в самом общем виде, он обратился за помощью к профессору Лоренцу, который был настолько любезен, что прислал доказательство. Можно думать, что рассмотрение этой теоремы доктора Лоренца, а также сделанные им замечания могут представлять широкий интерес, в особенности из-за возможных практических приложений; доктор Лоренц согласился на публикацию доказательства."

Конечно, Лоренц доказал теорему Хевисайда для самого общего случая, а не для того частного примера, который мы привели выше. Общая формулировка теоремы Хевисайда, приведенная во втором томе его "Работ по электричеству" (с. 412), такова:

Полная работа, совершаемая сторонними силами после момента включения, превышает ту величину потерь на джоулево тепло, какой она была бы, если бы потери на тепло в единицу времени с самого начала равнялись бы установившемуся значению (если оно есть), на величину, равную удвоенной разности электрической и магнитной энергий в установившемся состоянии."

Эта теорема очень важна для многих приложений, в частности, она позволяет оценить энергию, нужную для приведения передающей линии в рабочее (установившееся) состояние. Понятно, что эта теорема оказалась полезной для работы доктора Мэннебека. Но Мэннебек не знал, что Хевисайд не только высказал эту теорему, но и подробнейшим образом (более подробно, чем это сделал Лоренц) доказал ее и разобрал многие вытекающие из нее следствия.

Мэннебек увидел формулировку этой теоремы в работе Хевисайда "Об электромагнитных волнах" (ч. III), опубликованной в мае 1888 г. Но в этой работе Хевисайд применял уже доказанную им теорему. Доказательство содержится в его работе "Электромагнитная индукция и ее распространение" (ч. VII), вышедшей из печати тремя годами ранее, в апреле 1885 г. Эта часть так и называется: "Работа, совершаемая сторонними силами в переходных состояниях". В книге "Работы по электричеству" она помещена в I томе (с. 462). Мэннебек не знал об этом и обратился за помощью к Лоренцу. Для Лоренца оказалось проще заново доказать теорему, чем искать ее доказательство у Хевисайда. Редактор тоже не знал, что теорема уже доказана (а не только высказана) Хевисайдом. При этом доказательства Лоренца и Хевисайда очень похожи. И непонятно, почему Мэннебек обратился к Лоренцу, а не к Хевисайду, который в 1922 г. был жив, находясь в здравом уме и твердой памяти, и вполне мог ответить на любой вопрос такого рода. По-видимому, Мэннебек полагал, что Хевисайда уже нет в живых. Некоторым основанием для такой точки зрения было то, что Хевисайд к тому времени уже десять лет не посылал в печать своих работ. Естественно было прийти к выводу, что он умер. Некоторые (и их было немало) так и думали.

Хевисайд об этом знал. В его письме к Беренду, написанном примерно в 1918 г., есть такие строки:

Мой друг, работающий теперь на авиационном заводе в Фарнборо, рассказал мне забавную историю о своей поездке в Соединенные Штаты несколько лет назад. Он упомянул обо мне и получил такую поразительную информацию: «Хевисайд? Он еще жив? Я думал, что он был одним из классиков». Вот это настоящая слава, не так ли? И я могу прожить еще 20 лет, если спасусь от ревматизма и холода, этих английских проклятий, и буду иметь удовольствие снова услышать замечания такого рода... Так что, как видите, имеются и компенсации. Осмелюсь сказать, что я лучше известен как классик в Соединенных Штатах, чем в Британии»[6].

Все же, хотя Хевисайд и считался (и с полным основанием) классиком, далеко не все знатоки электромагнитной теории даже в Соединенных Штатах могли похвастаться тем, что хорошо знакомы с его работами. Вот характерный пример.

Через 16 лет после смерти Хевисайда, в 1941 г. в Соединенных Штатах вышла из печати прекрасная книга Дж.А. Стрэттона "Теория электромагнетизма" [141], полностью сохранившая свое значение и в наши дни. В книге девять глав, и почти к каждой из них автор подобрал трудные в решении, но принципиально важные для понимания задачи, которые предлагаются читателю. Среди задач, помещенных после девятой главы, есть задача № 42. Она заключается в том, что читателю предлагается доказать теорему Хевисайда о работе внешней силы на создание установившегося состояния. Задача поставлена для случая сплошной среды, обладающей поляризацией и проводимостью. Сформулировав теорему, Стрэттон сообщает, что она была впервые высказана Хевисайдом в его "Работах по электричеству" (т. 2, с. 412) и доказана Лоренцем [105]. Аналогичная теорема для электрических цепей приведена у Пирса в его книге "Электрические колебания". Такой выдающийся знаток электромагнитной теории, как Джулиус Адамс Стрэттон, не знал, что теорема не только сформулирована, но и доказана Хевисайдом.

В июне 1902 г. Хевисайд написал статью "Теория электрической телеграфии" для десятого издания "Британской энциклопедии". Сам факт, что эта статья для столь престижного издания была заказана именно Хевисайду, говорит о том, что в теории связи Хевисайд был признанным авторитетом. В этой статье в полной мере проявилось совершенно новое понимание, которое внес Хевисайд в теорию распространения волн вдоль проводников. Это были не волны тока и не волны напряжения, бегущие вдоль проводников, а электромагнитные волны, бегущие вдоль линии в пространстве, окружающем провод. Первый абзац статьи Хевисайда точно отражает то новое, что инее Хевисайд в понимание проблемы:

Теория электрического телеграфа, начатая работами У. Томсона (лорда Кельвина) в 1855 г. и сыгравшая важную роль при прокладке атлантического кабеля и вообще в кабельной телеграфии, теперь вошла в более широкую теорию как ее предельный случай. Эта более широкая теория основана на максвелловской теории электромагнитного излучения и может быть поэтому названа радиационной теорией. Новейший вид электрической телеграфии, обычно называемой «беспроволочной телеграфией», выросший из экспериментальных исследований Герца, также описывается этой более общей теорией. Главная трудность заключается в том, чтобы объяснить, какие задачи выполняют провода. Что касается радиационной части, которая имеет фундаментальное значение, то это - сравнительно легкая часть проблемы»[106].

Дальше в этой не очень большой статье (около 7000 слов) содержится очень ясное качественное изложение теории распространения поля вдоль проводов. Это изложение построено примерно так же, как уже упомянутый выше и помещенный в первом томе "Электромагнитной теории" качественный анализ распространения плоской волны вдоль двух параллельных идеально проводящих цилиндрических тел. В этом случае линии электрического поля волны начинаются на поверхности одного цилиндра и заканчиваются на поверхности другого, при этом линии поля лежат в плоскости, перпендикулярной образующим цилиндров. Линии магнитного поля представляют собой замкнутые

кривые в той же плоскости, перпендикулярной образующим. Каждая замкнутая кривая окружает либо один, либо другой проводник. В каждой точке линии электрического и магнитного полей перпендикулярны. Рассмотренная картина поля распространяется вдоль проводов без искажения и затухания со скоростью света.

Хевисайд рассматривает и другую модель, когда плоская линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется в пустом пространстве между двумя горизонтальными идеально проводящими плоскостями (или достаточно протяженными пластинами).

В пространстве между плоскостями электрическое поле перпендикулярно плоскости и поэтому не наводит на поверхности плоскостей никаких токов. Магнитное поле параллельно поверхности плоскостей. Теперь можно оставить только поле между плоскостями, а поле во внешнем пространстве считать равным нулю. Внутри этого плоского волновода поле будет таким, как будто волна распространяется в неограниченном пространстве.

Эти примеры проясняют, по крайней мере частично, какова роль проводов в телеграфии. Провода ведут волну из одного места в другое без потерь и позволяют это сделать с ограниченной затратой энергии. Без проводов для передачи сигнала нужна была бы полная неограниченная плоская волна во всем пространстве. Иначе возникло бы распыление волны во все стороны, а это сопровождалось бы уменьшением энергии, текущей в нужном направлении.

Хевисайд в этой статье, конечно, рассматривает и математический аппарат теории (хотя и не столь подробно, как в первых томах "Электромагнитной теории"). Но основное место уделяется разбору именно качественных сторон проблемы. Причем этот качественный разбор оказывается таким насыщенным, что читателю ясно: автор излагает без формул, словами, результаты подробнейших математических исследований, сделанных им же самим. Это, в частности, относится к разбору роли неоднородностей в линии.

Рассматривается также и роль индуктивной нагрузки. Хевисайд излагает свое предложение, сделанное девятью годами ранее: включать в линию регулярно расположенные индуктивные катушки. Он говорит, что нужно проводить опыты в этом направлении, и замечает:

В Великобритании ничего не сделано для того, чтобы осуществить изобретение автора; но в Америке доктор Пьюпин добился некоторого успеха. Он сообщил об опытах, подтверждающих пользу от изобретения автора. При включении катушек дальность телефонной связи возросла в пять раз."

В конце статьи Хевисайд, по сложившейся привычке, упомянул о своих разногласиях с У. Присом, своим главным оппонентом, и, как обычно, сделал это в довольно ядовитой форме. Он мог бы и не делать этого - всем теперь было ясно, что теория Хевисайда верна и плодотворна, а возражения оппонентов неосновательны.

В этой статье, написанной в 1902 г., Хевисайд не только изложил свои известные результаты по теории проводной связи. Он сделал одно короткое замечание, вся важность которого была оценена лишь впоследствии (больше, чем через двадцать лет после опубликования). Хевисайд и здесь обогнал свое время.

Показав, как проводники ведут волну вдоль линии, Хевисайд дальше написал:

Нечто подобное имеет место в «беспроволочной» телеграфии. Морская вода, хотя и прозрачна для света, имеет вполне достаточную проводимость для того, чтобы вести себя как проводник по отношению к волнам Герца, и Земля также имеет проводимость, хотя и меньшую. Поэтому волны Герца приспособляются к поверхности моря точно так же, как они следуют вдоль проводов. Без сомнения, нерегулярности ухудшают распространение, но главные волны следуют кривизне Земли и не уходят от нее. Есть и другое соображение. Возможно, что существует достаточно проводящий слой в верхней атмосфере. Если это так, то волны будут, так сказать, захвачены этим слоем в большей или меньшей степени. Тогда, с одной стороны, волну будет вести море, а с другой - этот верхний слой."

В трех последних фразах из приведенного отрывка содержится возможное объяснение дальней радиосвязи. В то время, когда Хевисайд писал эти строки, уже были проведены первые успешные опыты по радиосвязи через Атлантику. Эти опыты имели огромное значение и повели к быстрому развитию радиосвязи, или, как ее называет Хевисайд, *беспроволочной телеграфии*."

Хевисайд никогда не занимался практической радиосвязью. Но он с большим интересом следил за работой Маркони и инженеров Британского телеграфного ведомства по практическому использованию радиоволн для связи. Сначала расстояния, на которых осуществлялась радиосвязь, были малы. Для теоретического объяснения опытов было достаточно считать Землю (или поверхность моря) плоской, а излучающую антенну - расположенной над плоской границей раздела двух сред. Соответствующие расчеты были сравнительно просты, во всяком случае, математических трудностей здесь не было.

Успехи в передаче радиосигналов на малые расстояния пробуждали надежды на гораздо более важные достижения. Мы уже приводили письмо Фицджеральда к Хевисайду, где говорилось о *возможности телеграфии на свободных волнах в Америке*!" Письмо было написано в 1899 г., а уже в декабре 1901 г. Маркони успешно осуществил радиосвязь между Европой и Америкой. Но вопрос о том, почему такая связь оказалась возможной, в то время не имел еще ответа. Чтобы понять, в чем состояла трудность, рассмотрим сначала связь на малые расстояния. Тогда поверхность Земли

можно считать плоской (рис. 25). Передатчик, помещенный на мачте, посылает во все стороны радиоволны. Очевидно, радио-луч может попасть в любую точку земной поверхности, - каждой точке приема отвечает свой луч.

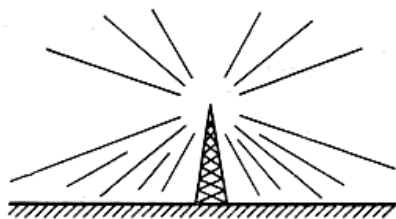


Рис. 25

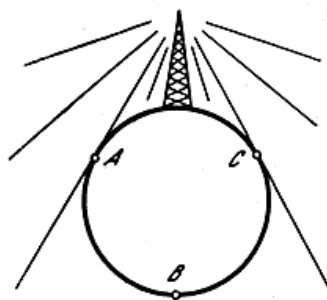


Рис. 26

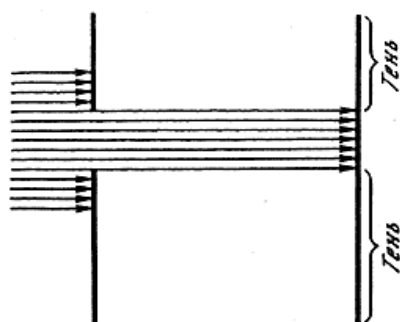


Рис. 27

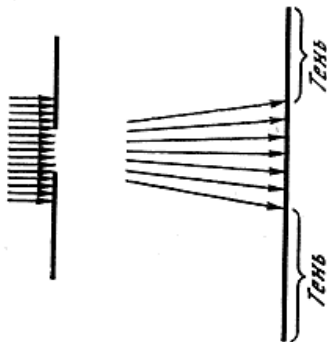


Рис. 28

Рассмотрим теперь радиосвязь на большие расстояния. Тогда Землю уже нельзя считать плоской (рис. 26). Видно, что радиолучи, прямолинейно распространяясь, не могут попасть на ту часть поверхности Земли, которая соответствует дуге ABC. Там, следовательно, приема быть не может. Но опыт показал, что и на дуге ABC, т.е., как говорят, в области радиотени, прием все же происходит. При определенных условиях сигнал может быть принят в любой точке земной поверхности.

Почему же это происходит? Одной из возможных причин является дифракция радиоволн. Явление дифракции заключается в следующем. Возьмем параллельный пучок световых волн, и пусть этот пучок падает на непрозрачный экран с отверстием (рис. 27). Позади этого экрана поместим другой плоский экран. Тогда мы можем ожидать, что на втором экране будет светлое пятно, форма которого точно воспроизводит форму отверстия, а во всех остальных точках экрана будет темнота - они попадут в область тени.

Однако опыт показывает, что этого не происходит. Луч, проходящий вблизи от края отверстия, отклоняется, и картина прохождения волн через отверстие выглядит примерно так, как показано на рис. 28. Это означает, в частности, что волны могут попасть в область геометрической тени. Такое отклонение волн от первоначального направления называется дифракцией.

При радиосвязи дифракция приводит к тому, что радиоволны могут огибать Землю, как показано на рис. 29. Большая часть энергии, излученной передатчиком, уходит от Земли, но некоторая часть излученной энергии распространяется вдоль поверхности Земли, следуя ее кривизне. К этому приводит эффект дифракции.

Фицджеральд как раз и думал, что именно дифракция радиоволн на сферическом теле, каким является земной шар, может обеспечить радиосвязь через Атлантику.

Хевисайд предложил другой механизм (рис. 30). Те лучи, которые уходят от Земли, падают на отражающий слой, расположенный на большой высоте, и попадают обратно на Землю. Они могут снова отразиться от Земли и снова попасть на отражающий слой, а затем снова вернуться на Землю. Таким образом, если действительно, как предположил Хевисайд, над Землей существует слой, отражающий радиоволны, становится возможной радиосвязь между двумя любыми точками земной поверхности.

Отметим здесь, что одновременно с Хевисайдом предположение о существовании проводящего слоя, расположенного на большой высоте, сделал американский ученый Кеннелли. Были и более ранние предположения о существовании высоко в атмосфере области с электрической проводимостью (Бальфур Стюарт, 1882 г. и Шустер, 1887 г.).

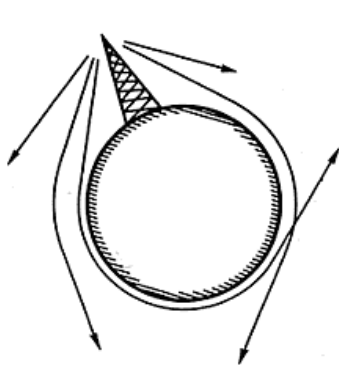


Рис. 29

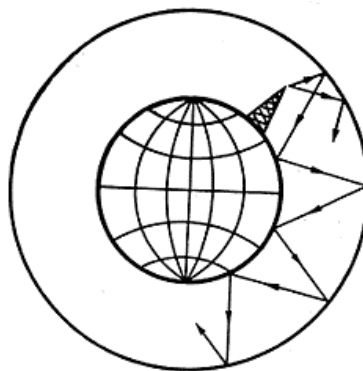
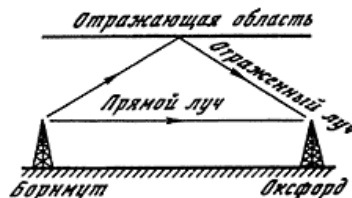


Рис. 30

Рис. 31



Когда в "Британской энциклопедии" появилась статья Хевисайда о телеграфии, его замечание о возможном существовании проводящего слоя на большой высоте не привлекло внимания. Главной причиной, объясняющей успешную радиосвязь Европы с Америкой, считали дифракцию радиоволн вокруг Земли. Сразу после 1902 г. появилось большое число математических работ, в которых исследовалась проблема, поставленная Фицджеральдом перед Хевисайдом, - проблема дифракции радиоволн вокруг проводящей Земли. Эти исследования были очень сложны, потому что решение любой или почти любой задачи о дифракции наталкивается на большие математические трудности. До настоящего времени точные решения задач дифракции можно сосчитать по пальцам. Хевисайд писал в одном из писем, имея в виду работы, посвященные дифракции радиоволн: *"Эти ужасные дифракционные вычисления."*

Но *"ужасные дифракционные вычисления"* все же были проделаны. Сравнение их с опытом показало, что одна только дифракция волн вокруг Земли не может объяснить дальние радиопередачи. Наиболее полные сравнения результатов, которые давала теория дифракции, с опытом были проведены известным голландским радиофизиком Б. Ван-дер-Полем. Он пришел к выводу, что для объяснения наблюдаемой связи нужно учитывать и другие факторы и главным образом фактор, отмеченный Хевисайдом, - отражение волн от проводящего слоя, расположенного высоко над Землей.

Этот слой еще не был обнаружен на опыте, но в ряде исследований уже к началу первой мировой войны стали изучать свойства этого предполагаемого слоя и его влияние на распространение радиоволн. В 1912 г. У.Х. Экклз развил гипотезу Хевисайда более подробно. Он предположил, что на большой высоте над Землей имеется область, где газ ионизован, т.е. атомы газов, входящих в состав воздуха, разделяются на электроны и положительно заряженные ионы. И электроны и ионы под действием электрического поля перемещаются, ионы - по полю, а электроны - против поля. В такой ионизованной области под действием электрического поля возникает ток, т.е. эта область обладает проводимостью, а это означает, что электромагнитные волны, падающие снизу на границу этой области, частично отражаются к Земле, причем амплитуда отраженной волны тем больше, чем больше проводимость ионизованного слоя. Экклз, в частности, считал, что коэффициент преломления такого слоя меньше единицы и меняется с высотой. Это приводило к тому, что радиолуч, приходящий от Земли в такую проводящую область, постепенно менял свое направление, отклоняясь книзу, и в конце концов уходил опять к Земле. Еще позднее было учтено, что на свойства этой ионизованной области заметно влияет земное магнитное поле [107].

К началу 20-х годов существование отражающей области в верхней атмосфере уже признавалось многими исследователями и делались попытки косвенно определить свойства этой области. Прямой эксперимент, подтверждающий существование отражающей области, был проведен в 1924 г., через 22 года после того, как Хевисайд высказал предположение о существовании отражающего слоя. Эксперимент был проведен Эпплтоном и Барнетом [108].

Схема опыта Эпплтона и Барнета изображена на рис. 31. В Оксфорде находилась приемная станция, принимавшая сигналы передатчика, расположенного в Борнмуте. Очевидно, если существует отражающая область, то в Оксфорд из Борнмута приходят два луча: прямой, идущий параллельно земной поверхности, и луч, отраженный от проводящего слоя. Видно, что пути, проходимые этими лучами, различны. Если пути отличаются на целое число волн, то прямой и отраженный пучки будут усиливать друг друга в месте приема. Если же разница путей равна нечетному числу полуволн, то пучки будут взаимно гаситься. Меняя длину волны, посылаемой из Борнмута в Оксфорд, и измеряя возникающую при этом последовательность максимумов и минимумов сигнала, принятого в Оксфорде, можно определить пути прямого и отраженного лучей, а затем из простых геометрических соображений - и высоту точки, где произошло отражение луча. Таким путем Эпплтон и Барнет в декабре 1924 г. получили прямое подтверждение того факта, что существует отражающая область на высоте примерно 90 км над Землей. Эта отражающая область получила название "слой Хевисайда-Кеннелли".

Через два года Эпплтон впервые обнаружил вторую отражающую область на высоте 200 км над земной поверхностью. Он вел измерения, используя радиоволны с меньшей длиной волны, чем в первый раз. Эти волны прошли ("пробили") нижний отражающий слой и отразились от более высоко расположенного слоя.

Неизвестно, дошла ли до Хевисайда весть о первых опытах Эпплтона и Барнета, проведенных в декабре 1924 г. В это время Хевисайд был уже тяжело болен. 2 января 1925 г. он был помещен в больницу, а 3 февраля того же года умер. Во всяком случае, слой Хевисайда был обнаружен на опыте еще при его жизни, хотя и через 22 года после сделанного им предсказания.

Скажем здесь несколько слов о дальнейшей судьбе этого открытия.

Мы знаем, что воздух не проводит электрического тока. Однако под влиянием внешних воздействий воздух может быть проводником. Например, достаточно быстрые заряженные частицы ионизуют атомы газов, составляющих воздух, т.е. выбивают из этих атомов электроны. В результате процесса ионизации нейтральный атом превращается в две частицы: отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный ион, который гораздо тяжелее электрона. Так в воздухе появляются свободные носители заряда, которые могут перемещаться в электрическом поле и обуславливают проводимость. Ионизация воздуха может происходить не только под действием быстрых частиц, но и под влиянием некоторых других воздействий. В частности, ультрафиолетовое излучение также может, проходя через воздух, приводить к ионизации атомов и создавать таким путем проводимость.

Верхние слои атмосферы все время испытывают целый ряд воздействий, приводящих к ионизации атомов. Это жесткая часть солнечного излучения (ультрафиолетовые и более короткие волны), поглощаемая в верхней атмосфере и вызывающая ионизацию. Это и потоки частиц, идущих на Землю от Солнца. Они также производят ионизацию в атмосфере. Это и космическое излучение, приходящее на Землю из далеких областей, находящихся за пределами нашей Галактики. Все эти и некоторые другие факторы и приводят к тому, что атмосфера на большой высоте представляет собой ионизованный газ, способный проводить электрический ток. Проводящая среда поглощает и отражает электромагнитные волны. Этим и обусловлено отражение радиоволн от слоя Хевисайда-Кеннелли. Теория распространения радиоволн в проводящей атмосфере очень сложна, потому что плотность и проводимость атмосферы меняется с высотой, кроме того, ионизованный газ в верхней атмосфере находится под воздействием магнитного поля Земли, и это обстоятельство необходимо учитывать - ионизованный газ в магнитном поле приобретает такие оптические свойства, как двоякопреломление, т.е. в каждом данном направлении в такой среде могут распространяться две волны одной частоты, но с разными фазовыми скоростями, причем вектор поляризации у одной из этих двух волн вращается вправо, а у другой - влево.

Постепенно название "слой Хевисайда" вышло из обихода и теперь область, занятую ионизованным газом, называют "ионосфера". Хевисайду и тут не повезло.

Свойства ионосферы сейчас довольно хорошо изучены. Если можно так сказать, ионосфера - живой организм, чутко реагирующий на время суток (ночью степень ионизации меньше, чем днем), на состояние солнечной активности, на процессы в атмосфере и еще на многие факторы. Нам здесь в первую очередь важно, что все эти факторы сильно влияют на радиосвязь, но следует иметь в виду, что ионосфера существенно определяет не только радиосвязь, но и целый ряд геофизических и геомагнитных явлений.

Отметим еще, что отражающие свойства ионосферы неодинаковы для волн разных частот. Волны с достаточно высокой частотой (грубо говоря, волны, длина которых меньше нескольких метров), пробивают ионосферу и уходят от Земли. Связь на таких волнах возможна в пределах прямой видимости, а если передатчик и приемник отделены друг от друга изгибом земной поверхности, связь резко ухудшается.

Здесь нет места для подробного разбора явлений в ионосфере и их влияния на радиосвязь. Это теперь - большая область радиофизики и не только радиофизики