

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ОПЫТЫ ПО РАДИОЛОКАЦИИ ЛУНЫ

В. С. Вавилов

1. О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛЁТА НА ЛУНУ

Успехи физики за последние годы, и особенно за годы войны, приблизили к реальности решение задач, которые десять-двадцать лет назад, казалось, лежали в области научной фантастики. Развитие техники ракетного полёта, в особенности в связи с реальной возможностью использовать энергию ядерных реакций, с новой силой возродило идею межпланетных путешествий. В связи с этим интересно упомянуть о расчётах Химпана и Рейчела¹, поставивших себе задачу решить вопрос о возможности «простейшего» межпланетного полёта на Луну, исходя из конкретных технических данных. Из их приближённых, но достаточно убедительных выкладок следует, что при очень больших затратах на эксперименты и применении оптимальных материалов и топлива принципиально возможна постройка ракеты с химическим горючим (т. е. использующей энергию химической реакции), которая при полном весе на взлёте в 50 т доставит на Луну полезный груз порядка 10 кг.

Ракета, способная доставить на Луну и обратно человека с минимумом оборудования, должна была бы иметь вес при взлёте около 10^{10} кг. Отсюда следует, что если иметь в виду полёт на Луну человека, то проект ракеты, использующей химическую энергию, повидимому, неосуществим.

Но не только малая энергия молекулярного горючего составляет препятствие при постройке межпланетного летательного аппарата.

Можно представить себе два типа двигателей, использующих энергию ядерной реакции. В первом из них высвобождающаяся ядерная энергия используется для нагрева некоторого рабочего тела (аналогично тепловым двигателям) и перевода этого тела в газообразное состояние. Непосредственной причиной движения ракеты явится истечение газа из сопла Лавали — так же, как в обычных ракетах. Если произвести приближённый количественный расчёт, учитывая допустимую температуру истекающего газа, то для лунной ракеты с полезным

грузом в несколько сот килограммов полный вес будет равен около 10^7 кг. Как видно из этого, двигатель с рабочим телом не даёт решающего преимущества над химическим горючим. В другом типе ядерного двигателя, который можно вообразить, лишь привлекая значительную долю фантазии, продукты ядерной реакции выпускаются в виде потока частиц, сконцентрированного в пределах достаточно малого телесного угла. В этом случае отношение веса ядерного горючего к весу ракеты получается очень благоприятным, так что представляется осуществимой за счёт значительного запаса в весе даже массивная экранировка экипажа от излучения. Основное препятствие в этом случае состоит в необходимости рассеять тепло, выделяемое двигателем ракеты, ибо для получения одинакового толкающего усилия в ядерном двигателе должно высвободиться примерно в 1000—2000 раз больше энергии, чем в двигателе, использующем химическое горючее. Так как в современных образцах ракет рассеяние тепловой энергии почти достигает теоретического предела, приходится считать маловероятным, что удастся в 1000 или более раз превзойти этот предел или что коэффициент полезного действия такого ядерного двигателя будет достаточно высок. Однако полностью отрицательный вывод авторов расчётов в последнем случае далеко не так очевиден, как для ракеты с химическим горючим или с ядерным горючим и промежуточным рабочим телом.

Во всяком случае, с точки зрения названных авторов, если межпланетные полёты и возможны, их осуществление будет делом не нашего поколения.

2. ОТРАЖЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ЛУНЫ

Однако в руках экспериментаторов наших дней есть реальный способ «достать до Луны». Это — узкий пучок электромагнитных волн, которые в определённых условиях способны проникнуть сквозь ионосферу и, отразившись от небесного тела, вернуться на Землю. Вопрос о радиоизлучении, падающем на Землю из окружающего пространства, начал изучаться физиками ещё около 20 лет назад. Однако радиотехнические средства того времени — применение длинных волн и обусловленная этим малая направленность антенн — делали эксперимент в области внезапной радиосвязи невозможным.

Появление достаточно мощных генераторов ультракоротких волн и создание остронаправленных антенн дали возможность осуществить первые опыты посылки импульсных сигналов за пределы ионосферы и приёму сигналов, отражённых от Луны. Опыт такого рода, задача которого состояла в определении расстояния до Луны, был предложен академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси, проделавшими все необходимые расчёты ещё в 1943 г.² Незадолго до опубликования статьи Н. Д. Папалекси были получены³ сведения о том, что в США с помощью видоизменённой радиолокационной аппа-

ратуры удалось получить положительные результаты, т. е. добиться приёма отражённого от Луны импульса ультракоротких радиоволн. Правда, несмотря на прекрасное оборудование и большие возможности экспериментаторов, их результаты имеют ценность скорее как доказательство возможности опыта и не дают ещё точного способа определения расстояния до Луны или исследования её поверхности. К тому же первые сообщения о радиоэхо от Луны, как это часто случается с работами, сделанными в США, носили рекламно-сенсационный характер и излагались в весьма общей, недетализированной форме. Статья, опубликованная в 1949 г.⁴, к которой мы возвратимся ниже, служит существенным дополнением к этим первым сообщениям.

Одновременно с подготовкой опыта в США и совершенно независимо велась работа в Венгрии. Результаты венгерских физиков, также положительные, опубликованы в ноябре 1946 г.⁵. Несмотря на гораздо более скромные технические средства, бывшие в их распоряжении, и неоднократные вынужденные перерывы в работе, венгерским исследователям удалось получить благодаря остроумному методу кумуляции (накопления сигнала), разработанному З. Баем, результаты того же порядка точности, что и американские. Метод Бая, заслуживающий, несомненно, большого внимания, будет описан ниже.

3. УСТАНОВКА И ОПЫТ ГРУППЫ ДЕ ВИТТА

Как показывают расчёты группы де Витта^{4, 6}, при мощности передатчика в $10 \div 100$ *квт* в импульсе при эффективном диаметре антенны в $7 \div 10$ *м* и полосе пропускания приёмника 50 *гц*, для получения достаточной мощности сигнала, отражённого обратно на Землю, необходимо, чтобы в отражении участвовала вся поверхность Луны, видимая с Земли. Импульс должен иметь продолжительность более 0,1 *сек*, т. е. превышать длительность импульсов, применяемых обычно в локационной практике, примерно в 10^5 раз. Коэффициент усиления мощности антенны должен при этом иметь значение около 250. Большие значения при частоте около 100 *Мгц* было бы трудно осуществить.

Как в американском, так и в венгерском опытах значительная угловая ширина пучка (составлявшая около 12° при опыте в США и около 20° у венгерских физиков) и невозможность детального исследования формы отражённого импульса обусловили малую точность результатов, полученных в обоих случаях. Однако нельзя сомневаться, что тенденция к укорочению рабочей волны в радиолокации и новые методы генерации импульсов радиомикроволн достаточной мощности сделают возможными в самом скором времени и более точные опыты как по определению расстояния до небесных тел, так и по непосредственному исследованию их поверхности.

Экспериментальная установка группы де Витта представляла собой специально переделанный опытный образец радиолокатора, работавший на частоте 111,5 *Мгц*. Мы приводим (рис. 1) упрощённую

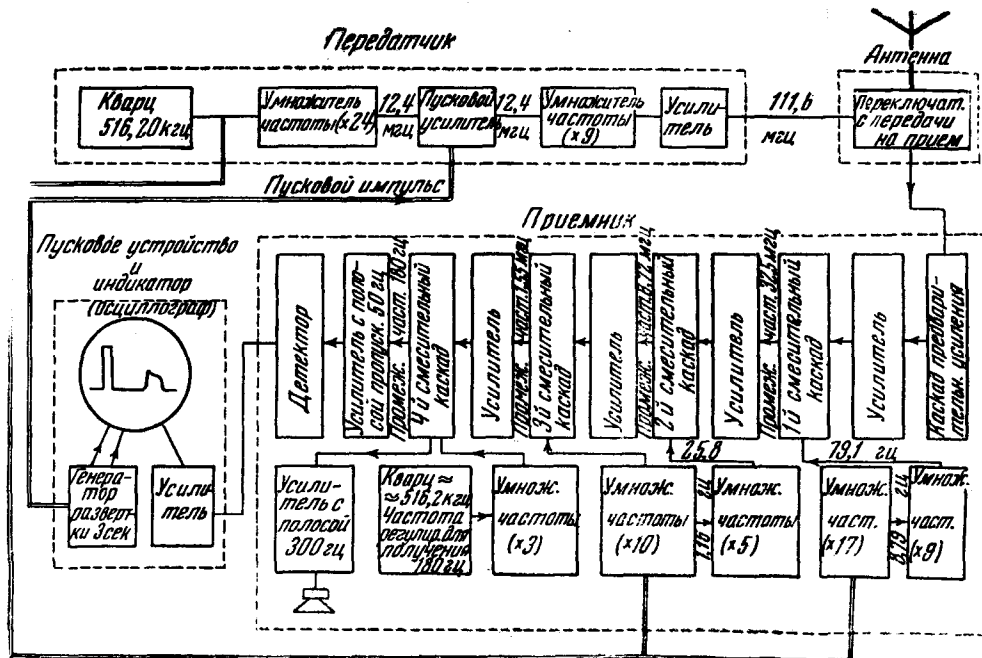


Рис. 1. Упрощенная блок-схема радиолокационной установки для обнаружения отраженных Лунной сигналов.

блок-схему, из которой ясен принцип стабилизации частоты, позволивший осуществить приём сигналов с окончательной полосой пропускания в 50 гц. Как видно, осуществление столь узкой полосы потребовало применения весьма сложной схемы. Для того, чтобы приёмник был всегда настроен на нужную частоту, один и тот же кристалл кварца задавал частоту передатчика и всех гетеродинов приёмника, кроме последнего каскада. С помощью ряда смесителей, гетеродины которых были стабилизированы этим кварцем, частота принимаемого сигнала понижалась до 1,55 Мгц. Попутно осуществлялось и усиление сигнала на всех промежуточных частотах. Частота выходного каскада, равная 180 гц, получалась с помощью гетеродина со вторым кварцем, частоту которого можно было изменять в известных пределах. Частота настройки приёмника должна была отличаться от частоты передатчика на величину доплеровского смещения за счёт движения Луны относительно установки.

Более детальное описание приёмника можно найти в³. Мощность передатчика, составлявшая в начале экспериментов 3 квт и оказавшаяся недостаточной, была впоследствии повышена до 15 квт. Для этого был добавлен каскад, представлявший собой нейтрализованный усилитель мощности на двух триодах. Антенна состояла из системы 64 диполей площадью около 13×13 м и имела коэффициент усиления мощности около 250.

Согласно расчётам авторов при указанных выше данных установки отношение мощности принимаемого отражённого сигнала к мощности излучения передатчика должно было составить около 10^{-2} (затухание около 200 дб). Опыт показал, что вычисления были правильными по порядку величины. Коэффициент отражения поверхности Луны принимался в расчёте равным 0,17, т. е. таким же, как для поверхности Земли (разумеется, имеется в виду среднее значение). Потери мощности при прохождении импульса сквозь атмосферу и за счёт деполяризации колебаний при отражении не учитывались, но не оказали существенного влияния на результаты опыта ввиду некоторого запаса чувствительности приёмника.

Отношение сигнала к шуму для отражённых от Луны импульсов в наиболее благоприятных случаях доходило до трёх. На приводимой осциллограмме (рис. 2) оно несколько меньше.

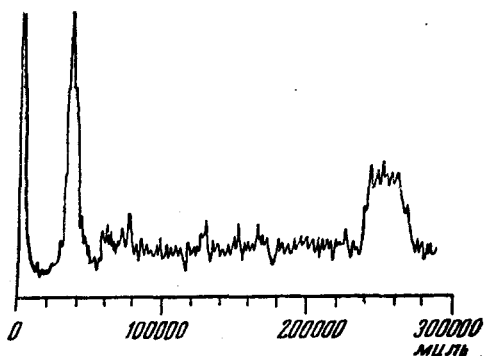


Рис. 2. Осциллограмма отражения радиосигнала от Луны. 22 января 1946 г. Восход Луны.

4. МЕТОД КУМУЛЯЦИИ (НАКОПЛЕНИЯ СИГНАЛА)

Аппаратура, бывшая в распоряжении венгерских физиков, не давала возможности получить на выходе приёмника отношение сигнала к шуму, превышающее 0,1. Для получения достоверных результатов опыта нужно было найти средство повысить это отношение. В качестве такого средства З. Бай предложил метод кумуляции (накопления), который в несколько иной форме применяется в радиолокации.

Суть метода, применяемого в радиолокации, заключается в том, что при достаточно частом повторении импульса отношение сигнал/шум увеличивается за счёт послесвечения экрана электроннолучевой трубки, усиливающего след сигнала и выравнивающего шумовые импульсы, приходящие в статистическом беспорядке. Так как в описываемом опыте импульсы следовали через промежуток времени в 3 сек., авторы опыта сочли применение фосфоров невозможным. Это сообщение вполне оправдано в случае применения обычных фосфоров, где электронное возбуждение даёт послесвечение малой длительности. Однако, применяя два слоя соответственно подобранных фосфоров, второй из которых возбуждается уже не электронами луча трубки, а свечением первого, вполне можно было получить послесвечение нужной для опыта продолжительности. Эта возможность, позволяющая обойтись без усложнения аппаратуры, осталась, очевидно, неизвестной авторам. Накопление заряда на конденсаторах также представляло трудности из-за весьма высоких требований к диэлектрикам. Ввиду этого были применены водородные кулонметры (прибор для измерения количества электричества по количеству электролитически выделяемого вещества).

Регистрация сигнала была ступенчатой, т. е. кулонметры включались на выходе приёмника, после демодулятора, один за другим через равные промежутки времени вращающимся коммутатором (рис. 3). Этот же коммутатор, вращаемый синхронным мотором, включал передатчик за некоторое время до начала регистрации.

Таким образом, сигнал, отражённый от Луны, попадал в соответствии с расстоянием до неё на один из кулонметров и последовательно накапливал некоторый объём водорода. Помехи же, выражающиеся в статистических флуктуациях напряжения, в среднем выравнивались.

При случайном распределении шумов квадратичная ошибка в одном кулонметре после n импульсов пропорциональна n , так что собственно ошибка составит величину, пропорциональную $\sqrt{n}$. В то же время сигнал, регистрируемый данным кулонметром, в случае его повторения с одинаковой амплитудой возрастет после n импульсов в n раз. Отношение сигнал/шум вырастет, таким образом, в $\sqrt{n}$ раз по сравнению с отношением на выходе приёмника. Отсюда видно, что при достаточном числе импульсов n сигнал значительно превысит уровень шума, т. е. станет наблюдаемым.

Выражаясь радиотехническим языком, можно сказать, что применение описанного метода эквивалентно сужению полосы пропускания до обратного значения полного интервала времени, на который включён регистрирующий прибор (кулонметр). Например, при числе импульсов $n = 1000$ и времени одного включения в 0,06 сек. мы получим $1000 \cdot 0,06 = 60$ сек., чему соответствует полоса пропускания в $\frac{1}{60}$ гц. Отношение сигнал/шум вырастет при этом в $\sqrt{1000}$ раз,

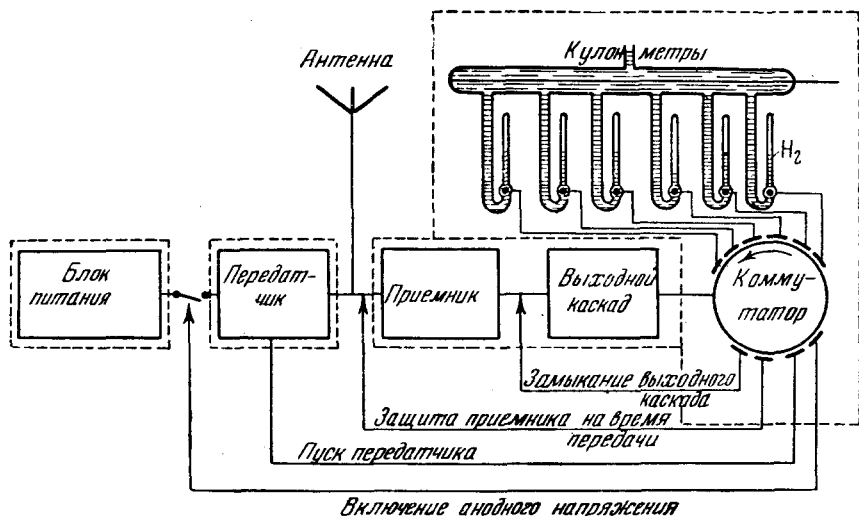


Рис. 3. Блок-схема радиолокационной установки З. Бая с кумулятивной электролитической регистрацией сигнала.

что соответствует сужению полосы в $\sqrt{1000}$ раз и эквивалентно увеличению мощности передатчика в 1000 раз.

Кулонметры, не принимающие сигнала, дают средний «нулевой уровень» за время опыта. Таким образом, флуктуации тока, возможные смещения рабочих точек ламп приёмника и другие случайные изменения в аппаратуре выравниваются. Можно сказать, что кулонметры, не принимающие сигнала, осуществляют контрольный опыт.

Из вышеизложенного видно, что метод накопления, несмотря на определённые трудности, гарантировал успех опыта при значительно менее совершенной аппаратуре (передатчик имел мощность $3 \div 4$ квт, коэффициент усиления мощности антенны ниже, чем в установке де Витта, полоса пропускания приёмника 200 кгц) и позволил авторам добиться положительного результата. Наиболее неприятным обстоятельством в случае описанного метода является необходимость длительной работы установки, что не всегда легко осуществить практически. Вторым недостатком является ступенчатая регистрация, понижающая точность опыта.

Однако при узкой полосе пропускания (что потребует согласования частот приёмника и передатчика) способ Бая позволяет без увеличения излучаемой мощности сократить длительность импульса. Это создаёт возможность перейти от первоначальных опытов, представляющих по выражению Н. Д. Папалекси «спортивный интерес», к действительной радиолокации в межпланетном пространстве и определению расстояний с большой точностью.

Увеличение же направленности антенны позволит исследовать Луну по частям или, при сохранении значительной длительности импульсов, перейти к опытам по отражению сигналов от более далёких небесных тел.

5. О РЕЗУЛЬТАТАХ ПЕРВЫХ ОПЫТОВ

Было бы слишком смело говорить сейчас о том, что на основании радиоэхо от Луны, приходящего через 2,5—2,6 сек., в соответствии с ожидаемым временем, можно измерять расстояния с той точностью, как это делается в астрономии. Не надо забывать, однако, что подготовка опытов велась в конце войны или в первые послевоенные месяцы. Тем более высоко следует оценить результаты венгерских исследователей.

В опыте группы де Витта весьма неудобным было то, что излучение передающей антенны могло направляться произвольно лишь по азимуту и лежало в горизонтальной плоскости. Это ограничивало время проведения опыта восходом и заходом Луны.

Авторы отмечают, что, как правило, результаты при восходе Луны были лучше, чем при заходе, вероятно, вследствие того, что при восходе излучение отражалось от поверхности моря, что создавало эффект добавочной направленности, более слабый в случае поверхности суши.

Заметной корреляции между интенсивностью отражённого сигнала и временем дня, условиями погоды и положением Луны по азимуту обнаружено не было.

Было замечено, что момент получения первого отражения от Луны отличается от «оптического» восхода её на время, меняющееся от дня ко дню на несколько минут. Очень часто радиоэхо опережало оптический восход Луны. Причиной, несомненно, служит отчасти изменение атмосферной рефракции и прозрачности атмосферы. Другой причиной могут быть особенности диаграммы направленности антенны. Иногда при исправно работавшей аппаратуре и антенне, направленной на Луну, получить отражение сигнала вовсе не удавалось.

Одним из интересных эффектов были сильные и быстрые изменения в амплитуде принимаемых сигналов. Они происходили настолько быстро, что их нельзя приписать влиянию диаграммы направленности антенны. Уровень принимаемых сигналов, следовавших один за дру-

гим через 4 сек., менялся от 2 до 20 дб. Интервалу в 4 сек. соответствует изменение в угловой высоте Луны примерно на $0,016^\circ$, что гораздо меньше ширины пучка (12°). Эти быстрые колебания амплитуды сигнала, возможно, следует приписать изменениям рефракции или поглощения радиоволн атмосферой. Другой вероятной причиной может быть либрация Луны. При восходе и заходе Луны она достигает 3° в сутки. Этому соответствует скорость «наружного края» Луны около 1 м/сек. Таким образом, за 4 сек. один край Луны приближается на 4 м к наблюдателю, другой удаляется на столько же. Если в данном отражённом импульсе значительная часть энергии отражённого сигнала вносится поверхностью близ края Луны, с точки зрения земного наблюдателя, то либрация вполне может обусловить сильные колебания в интенсивности отражения. Правда, это объяснение трудно согласовать с представлением об отражающей поверхности Луны как равномерно шероховатой полусфере. Попытки наблюдать вариации интенсивности сигналов в те дни, когда либрация Луны и по широте, и по долготе минимальна, не привели пока к определённым результатам.

Осциллографическая запись отражённого импульса, применённая де Виттом, удобна для исследования формы импульса, по которой можно было бы судить о законе отражения. Вопрос о форме отражённого импульса и её зависимости от закона отражения и длительности импульса с исчерпывающей полнотой разобран Н. Д. Папалекси в его статье².

Однако американские исследователи, применившие очень длинные импульсы — до 0,5 сек., — находились в неблагоприятном положении. Решение вопроса может последовать в результате применения кумулятивной регистрации и коротких импульсов. Применение двойных слоёв фосфоров с длительным послесвечением было бы в этом случае несравненно удобнее электролитической регистрации по Баю.

Источники внешних шумов — местные и космические — являлись бо́льшей помехой опытам. Для подавления близких помех бо́льшей интенсивности в установке де Витта был применён узкополосный (около 100 кГц, с применением полых резонаторов) усилительный каскад на 111,5 МГц.

Это значительно снижало влияние помех на частотах, лежащих вне полосы пропускания приёмника. Помехи внутри полосы в 100 кГц, конечно, при этом не устранялись.

«Шум» радиоизлучения Солнца наблюдался в дневное время как значительное повышение уровня помех на выходе приёмника, на который накладывались толчки меньшей длительности. При восходе и заходе Солнца можно было по изменению уровня шумов различать максимумы и минимумы диаграммы направленности антенны. Получить отражение сигналов от Луны в момент, когда Солнце отстоит от неё на не-большой угол, обычно не удавалось.

6. О ВОЗМОЖНОСТИ ЛИНИИ СВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЛУНУ КАК ПАССИВНЫЙ РЕФЛЕКТОР

Одной из целей исследования Луны как мишени радиолокатора было выяснение возможности устойчивой радиосвязи между двумя точками земной поверхности по пути Земля — Луна — Земля. Однако в силу приводимых ниже очевидных соображений применение такого пути связи ограничено специальными случаями и вряд ли сможет конкурировать с обычной радиосвязью.

1) Даже в случае антенн, дающих весьма остро направленное излучение, затрата мощности передатчиков будет очень большой.

2) Надо учитывать возможность многократного отражения сигнала Луной, что ввиду необходимости иметь для связи достаточно широкую полосу пропускания приведёт к усложнению аппаратуры.

3) Для антенн остро направленного излучения необходимо осуществлять непрерывное перемещение луча, для чего нужны сложные механические устройства, аналогичные астрономическим механизмам.

4) Линия связи через Луну сможет действовать только в периоды, когда Луна видна как из точки передачи, так и из точки приёма.

5) Очень большое время прохождения сигнала может быть источником неудобств.

6) Интенсивность отражённого сигнала, по крайней мере в диапазоне 100 Мгц, быстро меняется со временем, по всей вероятности, по причинам, уже указанным выше. Если причина изменений состоит в рефракции атмосферы, то применение чрезвычайно остро направленного излучения ещё больше затруднится.

7) В случае, когда прямое радиоизлучение Солнца принимается одновременно с отражённым сигналом, уровень помех сильно повышается. Однако та часть излучения Солнца, которая отражается Луной, очевидно, не служит источником заметных помех.

Таким образом, хотя опыты 1946 г. и могут служить доказательством возможности радиосвязи с использованием Луны в качестве пассивного рефлектора, техническое осуществление такой линии связи достаточно трудно.

7. ОДНОСТОРОННЯЯ РАДИОСВЯЗЬ С ПЛАНЕТАМИ

Представляет интерес обсуждение возможности односторонней связи с Луной или другими планетами на достаточно коротких радиоволнах. На расстоянии R от передающей антенны поток энергии излучения, приходящийся на единицу площади, равен

$$S_1 = \frac{P_{\text{прд}} G_A}{4\pi R^2}, \quad (I)$$

где $P_{\text{прд}}$ — мощность излучения передатчика, G_A — коэффициент усиления мощности антенны (по сравнению с ненаправленным излучателем), R — расстояние.

Если бы на Луне находилась приёмная антенна эффективной площадью в $A_{\text{пр}}$, то мощность, принимаемая ею, выразилась бы как

$$P_{\text{пр}} = S_1 A_{\text{пр}}. \quad (2)$$

Если $G_{A'}$ — коэффициент усиления мощности приёмной антенны, то

$$A_{\text{пр}} = \frac{7160 G_{A'}}{F^2} (м^2), \quad (3)$$

где F — частота в $Мгц$.

Отношение мощности, принятой на Луне, к мощности передатчика на Земле:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{прд}}} = \frac{571 G_{A'} G_A}{R^2 F^2}. \quad (4)$$

Чтобы оценить приведённые формулы, рассмотрим ненаправленную передающую антенну ($G_A = 1$) и простую приёмную антенну с коэффициентом усиления $G_{A'} = 10$ при частоте $100 Мгц$. В этом случае при $R = 4,07 \cdot 10^8 м^2$ $\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{прд}}} = 3,45 \cdot 10^{-17}$, чему соответствует затухание в $164,6 дб$. Отсюда видно, что обыкновенная станция в $50 квт$, работающая при частотной модуляции на волне в $3 м$, была бы легко принята на Луне, если бы там находился приёмник с чувствительностью, не превышающей обычную, и с полосой пропускания около $200 Мгц$.

Если бы на обоих концах линии связи были расположены антенны типа, применённого группой де Витта ($G = 250$), то соотношение мощностей понизилось бы до $127 дб$. Даже на расстоянии около $80\,000\,000 км$ сигнал был бы принят. Таким образом, Марс и Венера иногда также находятся в зоне действия обычной современной станции мощностью в $50 квт$, работающей на волне $3 м$ и имеющей хорошую направленную антенну.

Конечно, в приведённом примере не учтены все те причины, так сильно влиявшие на опыты с отражением сигналов от Луны, которые могут сделать приём земных сигналов на планетах достаточно трудным делом.

Если бы удалось установить на Луне хотя бы автоматическую ретрансляционную станцию, перспективы линии связи, рассмотренной выше, стали бы гораздо привлекательнее. К сожалению, как видно из материала, приводимого в¹, осуществление этого в наши дни ещё не представляется возможным.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Независимо от ближайших технических применений дальнейшие опыты по отражению радиоволн от «внеземных» объектов, несомненно, представляют большой интерес и будут продолжаться. Стоит указать, что описанные выше опыты впервые вполне строго доказали

что радиомикроволны при интенсивностях, даваемых передатчиками нашего времени, проходят сквозь ионосферу. До осуществления этих опытов было известно, что, начиная с некоторого угла к горизонту, луч направленной антенны перестаёт отражаться. Однако не было доказано, проходят ли волны ионосферу насквозь или поглощаются в вышележащих, малоисследованных слоях её, хотя теоретически этот вопрос и был в основном решён. С другой стороны, о радиоизлучении Солнца, приходящем на Землю «с той стороны» ионосферы, мы можем судить только по его интенсивности в точке приёма. Вполне вероятно, что сведения об ионосфере будут одними из наиболее интересных результатов дальнейших опытов по отражению радиосигналов от Луны.

Для получения отражений сигнала от Луны в дальнейшем в первую очередь следует ожидать применения импульсов короче 0,116 сек., т. е. короче того времени, за которое сигнал проходит «вдоль Луны» и обратно. Важно было бы также иметь результаты опытов за более продолжительные периоды, испробовать другие длины волн и применить более узкие пучки. Ценные данные, возможно, удалось бы получить путём применения развивающегося в самое последнее время способа радиолокации с использованием доплер-эффекта для определения лучевой скорости «мишени».

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Himpan and R. Reichel, *Am. J. of Phys.* 17, 251 (1949).
 2. Н. Д. Папалекси, *УФН* 29, 250 (1946); «Электричество», № 5, 1946, стр. 9.
 3. J. Mofenson, «*Electronics*», April 1946, стр. 92.
 4. De Witt and Stodola, *PIRE* 37, 229 (1949).
 5. Z. Bay, *Hungarica Acta Physica*, 1, 1 - 22 (Nov. 1946).
 6. Norton and Omberg, *PIRE* 35, 4 (1947).
-