

СОВРЕМЕННОЕ РАДИО И НАУКА *)

Н. Д. Папалекси.

Говорить в настоящее время о роли науки в технике совершенно тривиально. В любой из отраслей техники можно проследить, как влияли достижения науки на той или иной стадии развития этой отрасли. Однако это влияние было далеко не одинаково в различных отраслях. Существуют такие отрасли техники, как, например, инженерное искусство, которое зародилось вместе с человеческой культурой и медленно развивалось в течение тысячелетий, опираясь в основном на наблюдения природных явлений и накопленный опыт и используя лишь природные материалы. Хотя при этом оно достигло во многих отношениях высокой степени совершенства (стоит только вспомнить прекрасные образцы архитектурного искусства в древности и средневековье, каменные мосты римлян и т. п.), однако лишь в последние 100—150 лет, и притом только в связи с достижением науки в области теории и получением на основе научных изысканий новых строительных материалов, инженерное искусство стало очень быстро продвигаться вперед. Существуют и другие крупные отрасли техники, которые могли возникнуть и развиваться лишь тогда, когда был накоплен достаточный объем знаний в данной области и развита теория. Самым ярким примером этого рода отраслей техники может служить радио, которое обязано науке не только своим возникновением, но и всем своим бурным развитием, благодаря чему оно за такой короткий для крупной отрасли техники — едва пятидесятилетний — срок существования приобрело исключительное значение в жизни человечества, сделавшись незаменимым в самых разнообразных областях культуры и народного хозяйства. Только после того, как теория электромагнитных волн Максвелла была экспериментально обоснована блестящими опытами Герца, а в работах В. Томсона, Феддерсона, Герца, Бранли и многих других были даны первые способы генерации, излучения и приема электрических волн, могло появиться радио, в создании и развитии которого такую выдающуюся роль сыграли физики: А. С. Попов,

*) Публичная лекция, прочитанная 6 января 1947 г. в московском Доме учёных.

Г. Маркони, Ф. Браун, М. Вин, Л. И. Мандельштам и др. И через всё дальнейшее развитие радио проходит эта тесная и живая связь, или вернее взаимосвязь, с физикой, приведшая, в частности, к возникновению целого раздела физики — радиопизики. Но не только для радио была выгодна эта связь: как мы увидим ниже, эта связь оказалась весьма плодотворной и для науки. Выросши и окрепши на прочной научной основе, радиотехника не только успешно разрешает свои непосредственные задачи: радиотелеграфию, радиотелефонию, передачу изображений, не только выполняет исключительно важные культурные задачи через радиовещание и радиовидение, не только позволяет разрешить самые разнообразные технические задачи в области народного хозяйства и обороны, но и в свою очередь ставит перед наукой новые проблемы, даёт в руки исследователей новые методы и орудия исследования и даже открывает новые области исследования,

Особенно ярко проявилась взаимосвязь радио и науки в последнее время, когда, с одной стороны, стало совершенно очевидно, что дальнейший прогресс радио упирается в успешное разрешение ряда научных проблем, и когда, с другой стороны, развитие радио открыло новые возможности для разрешения научных проблем из других разделов физики и даже других областей знания. Вот об этих научных проблемах, от решения которых зависит дальнейший прогресс радио, а также о тех, решение которых стало возможным благодаря развитию радио, я и хотел сегодня рассказать.

Для того чтобы себе ясно представить пути дальнейшего прогресса радио, а также те научные проблемы, которые связаны с развитием радио, мне кажется, полезно вспомнить основные этапы его. Как всем хорошо известно, для осуществления любого вида радиосвязи необходимо:

1. Прежде всего, иметь источник радиоволн требуемого диапазона и мощности.
2. Передать эти радиоволны через пространство.
3. Принять желаемую радиопередачу в нужном месте.

Таким образом в области собственно радио — будь то радиосвязь, радиовещание, радиовидение, радиолокация или радионавигация, можно чётко различать три основные группы проблем:

1. Проблемы, относящиеся к генерации и излучению радиоволн.
2. Проблемы, связанные с распространением радиоволн в пространстве, и
3. Проблемы, относящиеся к радиоприёму.

Посмотрим теперь, как в процессе развития радио осуществлялась его взаимосвязь с наукой в каждой из этих групп проблем. В развитии радио можно достаточно чётко различать следующие этапы:

Первый этап, это — героическая эпоха радио, ведущая начало от опытов А. С. Попова — эпоха радиотелеграфа, сначала с помощью

трещащей и звучащей искры, а затем высокочастотной машины и дугового генератора Паульсена. Это была эпоха постепенного завоевания пространства: от десятков и сотен метров в первых опытах до многих тысяч километров через материки и океаны.

Уже в эту первую эпоху радио выдвинуло ряд больших научных проблем. Так, в связи с первой передачей Маркони в 1901 г. радиосигналов из Англии в Америку через Атлантический океан возникла и сразу приобрела большую остроту проблема распространения радиоволн вокруг Земли. Эта большая научная проблема, лишь в последнее время благодаря исследованиям многочисленных учёных всего мира, в том числе и наших, значительно приблизилась к своему разрешению. Дело в том, что через Землю, представляющую собой проводник, радиоволны пройти не могут. С другой стороны, представлялось в высшей степени сомнительным, чтобы радиоволны могли обогнуть выпуклость земного шара, отделяющую Англию от Америки. Здесь мы по существу имеем задачу, аналогичную оптической задаче дифракции от источника света, находящегося на поверхности сферы, которая представляет громадные математические трудности и которая в то время ещё не была решена. И вот для объяснения факта передачи радиоволн через Атлантический океан стали выдвигаться различные гипотезы. Так, ещё в 1902 г. Кеннели и одновременно Хевисайдом была высказана гипотеза о существовании верхних проводящих слоёв атмосферы, которые, действуя как отражатель, заставляют радиоволны, излучённые радиопередатчиком вверх, возвратиться обратно к земле и таким образом дают им возможность преодолеть кривизну Земли. Однако эта правильная гипотеза, за отсутствием в то время прямых экспериментальных подтверждений существования таких отражающих слоёв атмосферы, долгое время не встречала общего признания у радиоспециалистов. Этому способствовала также выдвинутая известным радиофизиком И. Ценнеком в 1907 г. «концепция» поверхностных волн, которые распространяются вдоль поверхности Земли подобно тому, как волны телеграфной передачи распространяются на большие расстояния вдоль проводов. Из этого представления о поверхностных волнах, ошибочно нашедшего себе теоретическое подтверждение в неправильных выводах из строгой теории Зоммерфельда, вытекало, что чем больше длина волны, тем лучше и дальше можно передавать радиоволны вдоль поверхности Земли. Так как эти выводы находились также в согласии с наблюдавшимся на опыте увеличением дальнего действия с длиной волны, то это и определило направление развития радио в первую эпоху в сторону длинных волн и связанное с этим стремление к увеличению высоты антенн.

Уже с самого начала антенны для увеличения дальнего действия подымались вверх на большую высоту на воздушных шарах. К концу первой эпохи, т. е. после первой мировой войны — в начале двадцатых годов — длины волн трансконтинентальных радиостанций

измерялись десятками тысяч метров, высоты антенн доходили до полукилометра и больше, а мощности передатчиков как искровых, так и машинных достигали многих сотен и даже тысяч киловатт.



Рис. 1.

Так, антенна сверхмощной передающей радиостанции в Малабаре (на острове Ява), предназначенной для связи с Голландией на расстоянии около 11 500 км, была подвешена на тросах, укреплен-

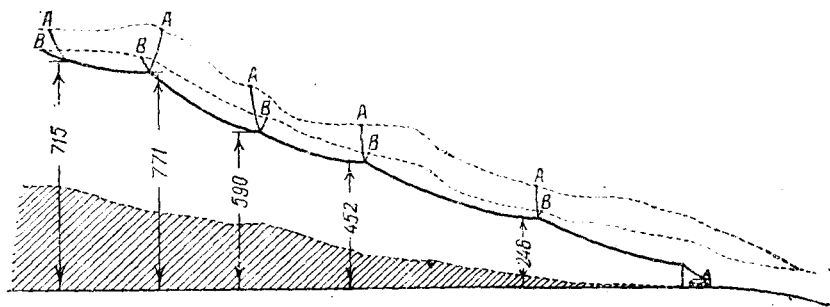


Рис. 2.

ных на вершинах двух гор (рис. 1 и 2), причём высшая точка антенны находилась на высоте 715 м над землёй. Очень показательна в этом отношении и эволюция антенны мощной радиостанции в Науэне (рис. 3). Следует отметить также, что к первому этапу развития радио относятся и первые практические применения электроники:

катодная трубка Брауна (1897), родоначальница столь незаменимого теперь электронного осциллографа, а также первый диод-детектор (вентиль) Флеминга.

Когда развитие радиотелеграфии достигло известного технического завершения и потребность в радиотелеграфной связи была в некоторой степени удовлетворена, техническая мысль естественно направилась в сторону радиотелефонии, и это привело к незатухающим колебаниям. Такие колебания на первом этапе генерировались высокочастотными машинами и электрической дугой, однако техническое решение задачи радиотелефонии стало реальным лишь

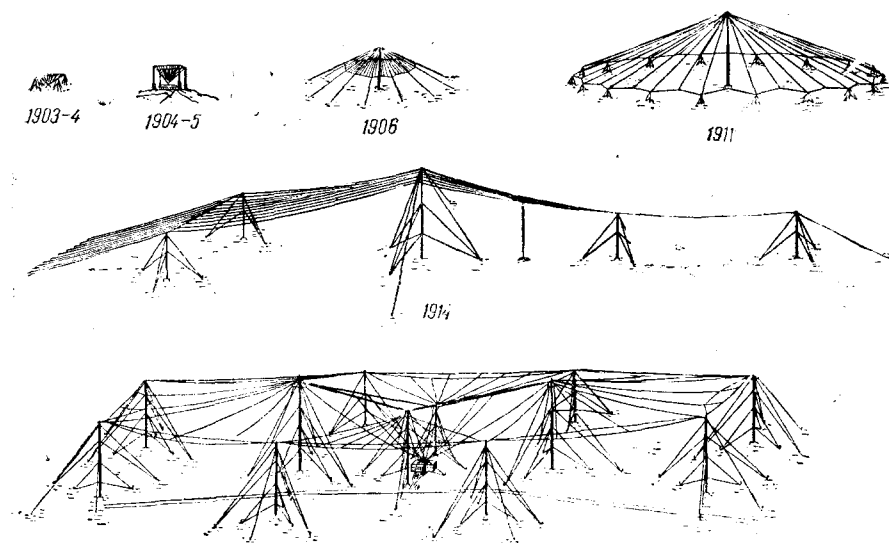


Рис. 3.

с появлением трёхэлектродной электронной лампы, явившейся дальнейшим замечательным выходом научных исследований в области термоэлектронных явлений.

С первых своих шагов электронная лампа, или, как её называют, «радиолампа», завоевала себе господство в области усиления радиосигналов и радиотелефонии и лишь затем, в связи с появлением принципа обратной связи, она скоро сделалась незаменимой как исключительно удобный, гибкий и стабильный источник электрических колебаний самых разнообразных типов — от чисто синусоидальных колебаний (соответствующих монохроматическому свету) до прямоугольных и пилообразных, применяемых в современных развёртках (например в радиолокаторах и в измерительной технике).

Однако первое время в области радиосвязи, особенно на большие расстояния, где продолжали господствовать длинные волны, маломощные ламповые передатчики не могли состязаться с мощными искровыми, дуговыми и машинными передатчиками. Открытие радиолюбителями в 1921 г. дальнего действия коротких волн, обусловленное, как теперь хорошо известно, их отражением от верхних проводящих слоёв атмосферы, привело к победе ламповых передатчиков и ознаменовало собой начало второго этапа в жизни и истории радио, т. е. начало эпохи коротких волн (волн порядка десятков метров) и развития ламповой радиотехники, а также эпохи пространственных волн, т. е. волн, приходящих от передающей станции не вдоль поверхности Земли, а через пространство, либо непосредственно, либо после отражения от верхних слоёв атмосферы. Это сразу же поставило на очередь экспериментальную проверку упомянутой выше гипотезы Кеннели и Хевисайда, которая и была блестяще подтверждена в 1925—1926 гг. Эпплтоном (методом интерференции) и Брайтом и Тювом — методом «радиоэхо». Таким образом возникла новая научная проблема исследования верхних отражающих радиоволны слоёв атмосферы, образующих так называемую «ионосферу» и имеющих очень важное значение не только для дальней радиосвязи, но и для геофизики и физики Солнца. Развитые для этой цели радиометоды исследования свойств ионосферы, в частности для определения её эффективной высоты, с помощью радиопульсов, т. е. коротких групп радиоволн длительностью 10^{-4} секунды и короче, как известно, легли в основу радиолокации.

Необходимость поддерживать постоянно частоты передаваемых радиоволн, особенно коротких, с очень большой точностью, для того чтобы не было помех при приёме от близких по частоте станций, привело к важной проблеме стабилизации частоты. Для решения этой задачи были использованы (Кэди, 1922) пьезоэлектрические свойства кристаллов (кварца и турмалина), открытые и исследованные знаменитым физиком Пьером Кюри.

Вторая эпоха в истории радио, которая являлась также эпохой развития радиовещания и радиотелефонии, после того как эти технические задачи были в основном разрешены в связи с развитием электроники, естественно привела к новой технической задаче — телевидению, для осуществления которой пришлось перейти к ещё более коротким волнам метрового диапазона, получившим название «ультракоротких» волн. Таким образом наметился третий этап развития радио — эпоха ультракоротких волн и телевидения. Однако в эту эпоху, которая и в настоящее время ещё не достигла своего расцвета, в связи с задачами, поставленными второй мировой войной, вторгся четвёртый этап — эпоха освоения микрорадиоволн (т. е. волн дециметрового и сантиметрового диапазона) и импульсной радиотехники. Эта последняя оказалась необходимой для решения задач отражат

ной радиолокации, т. е. определения положения неизлучающих объектов с помощью остро направленных лучков радиолучей.

Из этого беглого обзора видно, что стремление радио разрешить практические задачи обусловило на первых порах его развития тенденцию к удлинению длины волны. В дальнейшем, по мере накопления опытных фактов, касающихся распространения радиоволн через пространство, а также в связи с возникновением новых задач постепенно наметилась тенденция к всё большему укорочению длины волны, приведшая к самым коротким радиоволнам, примыкающим к световым. В связи с этим радиотехника стала заимствовать у оптики разработанные ею методы и средства. Такая «оптизация» радио, несомненно, наложила свой отпечаток на его современное состояние и развитие, знаменуя также и практическое смыкание радио и оптики.

Само собой разумеется, что развитие новых направлений в радиотехнике и овладение новыми диапазонами частот, вызванное необходимостью разрешения новых технических задач, отнюдь не означает упразднения и сдачи в архив её прежних достижений и освоенных раньше диапазонов частот. Это не означает также, что многие возникшие раньше вопросы радиосвязи, имеющие важное значение для удовлетворения культурных потребностей, народного хозяйства и обороны, уже полностью разрешены. Такова, например, прежде всего проблема бесперебойной и уверенной дальней радиосвязи, для которой и сейчас роль коротких, а отчасти и длинных волн остаётся пока первенствующей. Необходимо также заметить, что уже давно — примерно с первой мировой войны — радиотехника постепенно стала выходить за пределы собственно радиосвязи. Так, радио постепенно приобрело исключительно большое значение в навигации — морской и аэронавигации. Из возможности определять направление, из которого проходят волны, возникла радиопеленгация, эффективно действовавшая сначала на сравнительно небольшие расстояния, появились и радиомаяки, а в последнее время были разработаны более совершенные методы ближней и дальней радионавигации — интерференционные и импульсные; зародилась также и радиогеодезия. Радио по проводам в известном смысле революционизировало проволочную связь: с одной стороны, благодаря применению ламповых усилителей очень сильно увеличилась дальность действия обычной телефонии и, с другой стороны, радио по проводам сделало возможным многократную передачу телефонии по одному проводу, а также фототелеграфию. В настоящее время уже существует телефонная связь по проводам на ультракоротких волнах, позволяющая вести одновременно по одному кабелю до 400 разговоров. Радиотехника на широком фронте вторглась в другие области народного хозяйства. Индукционный и диэлектрический нагрев с помощью высокочастотных токов получил огромное значение и широкое применение в промышленности: в металлургии и технологии обработки металлов — для плавки, рафинирования, поверх-

ностной закалки, сварки и т. д.; в деревообделочной промышленности, например для сушки и склейки фанеры; в пищевой промышленности — для нагрева и стерилизации; в медицине — диатермия, токи д'Арсонваля и др. Может быть, некоторое представление об объеме и роли высокочастотной техники, выросшей из радиотехники, можно будет себе составить из того, что в настоящее время мощность генераторов высокой частоты, применяемых в промышленности, в несколько раз превышает мощность всех радиостанций для связи и радиовещания.

Необходимо также указать на огромное значение, которое приобрели радиометоды в науке как незаменимое орудие исследования в самых разнообразных её разделах: физике, биологии, астрономии и др. Исключительные возможности для исследований открылись благодаря электронным усилителям, позволяющим усиливать электрические токи и напряжения в десятки миллионов раз. Введение кварцевых стабилизаторов частоты позволило создать высокоточные стандарты частоты и так называемые «кварцевые часы», точность которых доходит до 10^{-9} . Такие часы являются в настоящее время неотъемлемой принадлежностью больших обсерваторий. Регулярная передача по радио стандартных частот и сигналов времени позволяет во всех уголках земного шара проверять частоты местных эталонов, а также получать точное время. Последнее имеет особо важное значение для астрономических, гравиметрических, геодезических и гидрографических измерений, а также для мореплавания.

Велико также значение радиотехники для создания циклотронов и других ускорителей электронов, играющих такую важную роль в ядерной физике. Необходимо подчеркнуть, что не только электроника развилась в значительной мере благодаря радиотехнике, но и многочисленные её достижения, вошедшие в самые разнообразные области науки и техники, как, например, самые разнообразные применения фотоэлементов, не были бы возможны без радиотехники.

Как мы видим, происходящее в настоящее время особенно бурное развитие радиотехники и связанных с ней электроники и других смежных областей оказалось возможным лишь благодаря рациональному использованию достижений физических наук. В свою очередь радио поставило перед физикой ряд проблем, выяснение которых не только способствовало решению технических задач как в радио, так и в других областях техники, но и обогатило соответствующие разделы науки: теорию колебаний, в частности нелинейных; теорию и исследование вопросов излучения электромагнитных волн, а также их распространения и интерференции; электронику — теоретическую и экспериментальную и, в частности, вопросы электронной эмиссии из чистых металлов и сложных катодов (оксидных), а также вопросы вакуума; учение о флуктуационных явлениях, столь важное не только для вопросов радиоприёма, но и статистической физики.

Многие научные проблемы, поставленные радио в процессе его развития, успешно разрешены, другие ещё ждут своего окончательного разрешения. С другой стороны, определились новые проблемы, от разрешения которых зависит дальнейший прогресс радио, а также выяснились новые области науки, в которых радио, по видимому, су-

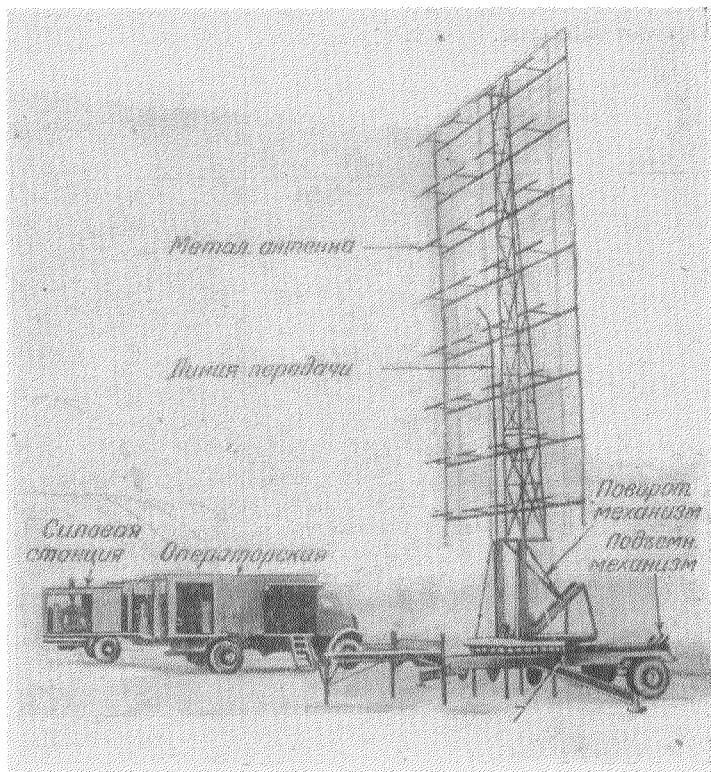


Рис. 4.

ждено сыграть очень важную роль не только в современном его состоянии, но ещё больше при дальнейшем его развитии.

Какие же это проблемы? В соответствии с упомянутыми выше основными сторонами процесса радиопередачи в целом мы начнём с проблем, относящихся к генерации и излучению радиоволн. Как мы видели, на настоящем этапе развития радио наблюдается определённая тенденция к переходу на всё более короткие волны, которая обусловлена в основном двумя обстоятельствами: во-первых, микро-радиоволны (сантиметровые, миллиметровые и короче) можно скон-

центрировать в весьма узкие пучки огромной мощности, например, с помощью параболических зеркал, какими пользуются в оптике, либо специфическими радиотехническими способами, связанными с возможностью осуществления систем когерентных излучателей. Таковы, например, плоские или пространственные излучающие системы (рис. 4), состоящие из правильно расположенных настроенных вибраторов, а также щелевые системы или так называемые «дифракционные» антенны (рис. 5) и т. п.

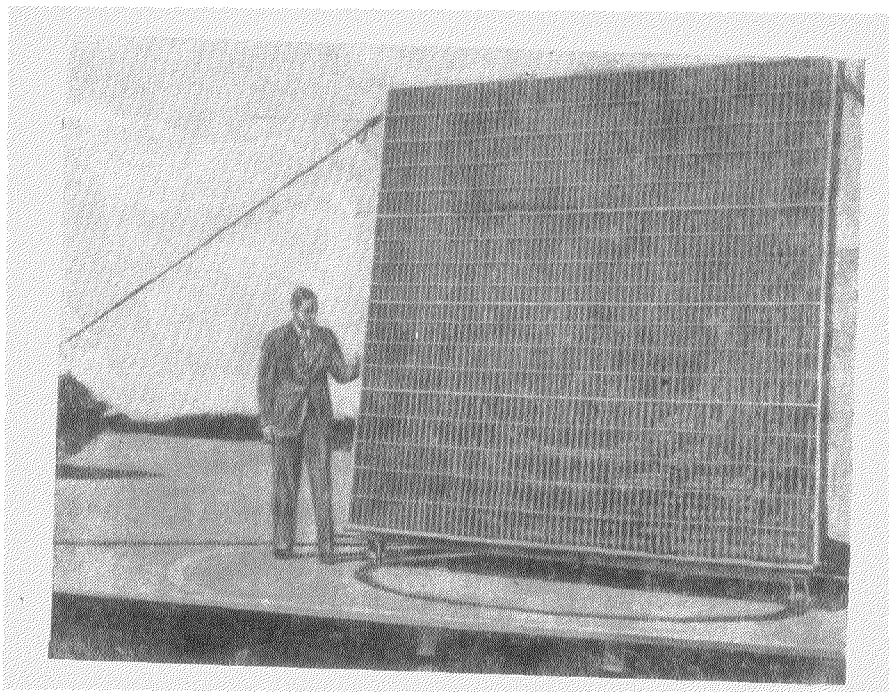


Рис. 5.

С другой стороны, радиоволны этих частот можно, аналогично звуковым волнам, направлять по полым трубам, получившим название «волноводов», либо по концентрическому кабелю. По волноводам можно передавать микрорадиоволны на большие расстояния с очень малыми потерями. Концентрический кабель, как уже упоминалось выше, используется, в частности, для многократной телефонии на микрорадиоволнах.

Возможность концентрировать микрорадиоволны в кратковременные импульсы большой мощности, как известно, обеспечила поразительные успехи радиолокации во вторую мировую войну с помощью так называемых «радаров». Так как дальнейший прогресс в освоении

диапазона микрорадиоволн открывает новые перспективы для различных применений радио не только в вопросах радиосвязи, радиовещания, радиолокации и радиовидения, но и в других областях техники и особенно в науке — физике, астрономии, химии, биологии, о чём мы подробнее скажем ниже, то ясно, что проблема генерации мощных незатухающих колебаний возможно более высоких частот (вплоть до долей миллиметра и короче) является одной из самых актуальных научных и научно-технических проблем.

Задача получения больших мгновенных мощностей на сантиметровых волнах уже в настоящее время значительно продвинулась вперёд. По данным американских журналов в последнее время на этих волнах достигнута мощность в импульсе длительностью 10^{-6} — 10^{-7} секунд до нескольких тысяч киловатт. Значительные результаты получены также и в отношении длительных мощностей. Так на волне 50 см в так называемом резonatроне получены мощности до 100 кв. На более коротких волнах дело пока ещё обстоит значительно хуже.

К проблеме генерации миллиметровых и более коротких волн можно подойти различными путями. С одной стороны, так как радиоволны порядка долей миллиметра уже приближаются к инфракрасным волнам, содержащимся в спектре накаливаемого тела, то мыслимо попытаться получить требуемые микрорадиоволны с помощью теплового излучения. Однако, как показывает расчёт, хотя абсолютно чёрное тело при температуре 6000° К, соответствующей эффективной температуре Солнца, излучает с одного квадратного сантиметра около семи с половиной киловатт лучистой мощности, только 10^{-14} всего излучения, т. е. $7 \cdot 10^{-4}$ эрг приходится на радиацию микрорадиоволн с длиной волны порядка 1 мм или, вернее, на участок спектра в этой области протяжённостью 10^6 гц. С повышением температуры возрастает, конечно, и выход этих волн, однако к. п. д. настолько ничтожен, что вряд ли можно считать способ получения микрорадиоволн путём температурного излучения сколько-нибудь перспективным. В связи с этим интересно отметить, что в последние годы различными исследователями было обнаружено, что Солнце действительно испускает радиоволны, причём в области сантиметровых волн они дают на Земле поток мощности порядка $4 \cdot 10^{-15}$ вт/м² на 1 мц, для $\lambda = 10$ см и для $\lambda = 1$ см $4 \cdot 10^{-13}$ вт/м² на 1 мц.

Кроме температурного излучения абсолютно чёрного тела, дающего сплошной спектр, представляется возможным для получения микрорадиоволн использовать температурное излучение газов, например, ртутной лампы высокого давления, дающее отдельные спектральные линии. Согласно наблюдениям Рубенса в 1921 г. молекулы ртути при этом излучают волны длиной в 0,218 и 0,343 мм, т. е. волны, уже переходящие в микрорадиоволны. В противоположность линиям видимого спектра, которые вызываются, грубо говоря, колебаниями электронов в атоме или атомов в молекуле, инфракрасное излучение обусловлено вращением молекул, почему получающиеся

при этом спектры называются ротационными. Кроме молекул ртути, для получения волн в области микрорадиоволн возможно использовать ротационные спектры молекул других веществ (как мы увидим дальше, такие спектры дают NH_3 , H_2O , O_2 и др.), однако во всех случаях здесь речь идёт об очень малых мощностях. Мыслимы и другие возможности генерации микрорадиоволн, аналогичные известным в оптике случаям нетемпературного излучения: например, возбуждение свечения газов электронным ударом, широко используемое в газосветных лампах; тормозное излучение, используемое в рентгеновских трубках, и т. п. Однако в настоящее время пока ещё не видно никаких реальных путей для получения с помощью всех этих способов скольконбудь заметных мощностей.

Может быть, небезынтересно в связи с этим отметить, что ещё в 1931 г. американским радиоспециалистом Янским было обнаружено радиоизлучение из области Галактики и звёздных туманностей на волне 14,6 м, которое в дальнейшем, особенно в самое последнее время, было обнаружено и исследовано и на других волнах другими учёными (Ребер, Хей и др.). Это излучение, повидимому, обязано своим происхождением тормозному излучению, возникающему при столкновении электронов с молекулами в мировой плазме межзвёздного пространства.

Другой возможный и более перспективный путь, это — испытанный радиотехнический путь, по которому шло до сих пор развитие методов генерации микрорадиоволн. В отличие от беспорядочного температурного излучения, здесь с помощью управляемого внешне (или авто) электронного потока получается организованное упорядоченное излучение возбуждением волн в полостях объёмных резонаторов, вызываемое пролётом групп или «сгустков» электронов мимо них, подобно тому как сгущение или разрежение струи воздуха возбуждает звук в полом пространстве — акустическом резонаторе. В области сантиметровых волн, как уже было указано выше, с помощью работающих на этом принципе «клистронов» и «магнетронов» были достигнуты весьма значительные результаты, однако при дальнейшем продвижении в сторону всё более коротких волн этот способ встречает всё большие трудности и притом отнюдь не только технического характера, которые можно было бы преодолеть рациональной конструкцией. Дело в том, что с уменьшением длины волны уменьшаются размеры резонаторов, а это приводит не только к механическим трудностям, связанным с возрастающими требованиями в отношении точности изготовления этих резонаторов, но также к увеличению относительных потерь на их поверхности, т. е. к уменьшению так называемой в радиотехнике «добротности» их. С уменьшением размеров резонаторов возрастает также угроза перегрева, которая ставит предел получаемой длительной мощности, а угроза пробоя лимитирует напряжение, а следовательно, и импульсную мощность.

Получение микрорадиоволн трансформацией частоты вверх, например искажением формы кривой тока в нелинейном сопротивлении (детекторе) с последующим выделением соответствующего обертона (детекторе) с последующим выделением соответствующего обертона также встречается те же трудности, поскольку для выделения обертона также необходимо иметь резонаторы. Поэтому в последнее время исследовательская мысль стала естественно искать новых путей решения задачи генерации микрорадиоволн. Я не могу здесь останавливаться на рассмотрении различных таких путей; позволю себе только в качестве примера привести один из принципиально возможных новых способов, который был недавно указан нашим молодым физиком-теоретиком В. Л. Гинзбургом. Этот способ основан на использовании получаемых в электронных ускорителях (бетатронах, синхротронах и т. п.) электронов, скорости которых близки к скорости света так называемых «релятивистских» электронов. Принцип метода заключается в следующем (рис. 6): если источник электромагнитных волн часто-

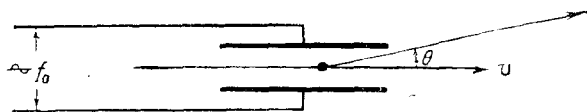


Рис. 6.

ты f_0 , например, колеблющийся с частотой f_0 электрон, движется прямолинейно в направлении, перпендикулярном к направлению его колебаний со скоростью v , то, как известно, в направлении, образующем угол θ с направлением движения, частота приходящих волн будет, согласно принципу Доплера, равняться:

$$f = \frac{f_0}{1 - \beta \cos \theta},$$

где $\beta = \frac{v}{c}$ и c — скорость света. В случае релятивистского электрона т. е. при β , близком к единице, и очень малом θ , знаменатель будет очень мал, и следовательно, мы будем иметь внутри телесного угла с очень малым θ излучение с преобразованием частоты вверх в очень много раз. Такой излучатель можно осуществить, заставляя релятивистский электрон колебаться в направлении, перпендикулярном к его движению с частотой f_0 , а именно, пропуская его между пластинками конденсатора, к которым приложено переменное напряжение частоты f_0 . Принципиально здесь возможно осуществить очень большие коэффициенты трансформации частоты вверх. Так, например, при скорости электрона в 5 MeV, т. е. той скорости, которую он приобретает при пробеге разности потенциала в 5 миллионов вольт, вполне осуществимой в современных электронных ускорителях, частота в направлении движения повышается в 200 раз, что даст при исходной длине волны, равной 20 см, излучение с длиной волны в 1 м. Га-

зумеется, что энергия излучения одного электрона ничтожно мала, однако, если иметь «сгусток» электронов, т. е. группу из большого числа N электронов (10^9 — 10^{10}), сосредоточенных в объёме, размеры которого меньше излучаемой длины волны, и совершающих одно и то же колебательное движение, т. е. когерентных между собой, то общая их мощность будет больше мощности одного электрона в N раз, т. е. может быть уже значительной. В создании таких мощных «сгустков» электронов заключается, повидимому, главная практическая трудность осуществления этого и аналогичных способов получения мощных микрорадиоволн. Приведённый пример показывает, какие возможности имеются ещё в резерве в современной физике в связи с развитием электроники и квантовой физики.

С проблемой генерации микрорадиоволн тесно связана проблема стабилизации их частоты. Если в области метровых и даже дециметровых волн выделением высокой гармоники генератора более низкой частоты, стабилизированного кварцем или турмалином, можно осуществить постоянство частоты с точностью 10^{-7} — 10^{-8} , то для волн миллиметровых и ещё более коротких такую стабильность этим способом осуществить пока ещё было невозможно (ввиду трудности выделения очень высоких гармоник и происходящей при этом дестабилизации). Постепенное смыкание радио с оптикой по мере укорочения волны естественно приводит к мысли использовать для решения этой важной задачи получения стабильного по частоте синусоидального радиок колебания (или, выражаясь «оптически», монохроматического излучения) приёмы, известные из оптики. Как было указано В. Л. Гинзбургом, представляется возможным использовать для этой цели линии поглощения ротационных спектров молекул, например, аммиака — NH_3 и др.

Я не буду сейчас останавливаться на ряде вопросов, связанных с канализацией, концентрацией и излучением микрорадиоволн, важных для их практического освоения. Укажу только, что развивается своеобразная «радиооптика», основанная, с одной стороны, на квазиоптических свойствах микрорадиоволн и, с другой стороны, на особенностях их распространения в полых трубах — «волноводах» и в диэлектрических стержнях.

Перехожу теперь ко второй группе проблем, а именно к проблеме распространения радиоволн в атмосфере и других средах. Эта проблема, являющаяся, как мы видели, одной из самых старых научных проблем радио, продолжает сохранять своё важное значение, так как по мере развития радио возникают всё новые задачи. Несмотря на то, что в результате многочисленных работ крупных физиков, математиков и радиоспециалистов — Пуанкаре, Зоммерфельда, Ватсона, Ван дер Поля, Вейля, Эпплтона, Эккерслея и др., — среди которых видное место занимают работы наших учёных В. А. Фока, Л. И. Мандельштама, М. А. Леонтовича, Б. А. Введенского, Е. Л. Фейнберга, были выяснены основные факты в физике процесса рас-

распространения радиоволн вдоль земной поверхности, ещё и сейчас нельзя считать, что все относящиеся сюда вопросы получили достаточное научное освещение. Так, в частности, хотя и можно считать вопрос о распространении радиоволн вокруг земного шара, принимаемого за шар конечной проводимости, окружённый нормальной атмосферой, давление которой изменяется по барометрической формуле, окончательно решёнными последними работами академика В. А. Фока и академика М. А. Леонтовича, всё-таки задача, как она представляется в действительности, полностью ещё далеко не разрешена. Дело в том, что переменная ионизация верхних слоёв атмосферы и наличие магнитного поля земли делают задачу распространения длинных и коротких волн чрезвычайно запутанной и трудной. Что же касается задачи распространения ультракоротких и микрорadiоволн, особенно за пределами прямой видимости, то она очень усложняется и затрудняется как вследствие значительных колебаний содержания паров воды в воздухе, так и инверсий температуры.

Являющаяся частью общей проблемы распространения, проблема ионосферы, экспериментальные исследования которой уже много лет ведутся непрерывно и регулярно во многих странах, требует в настоящее время особо большого внимания ввиду того, что мы приближаемся к максимуму солнечной деятельности, которая обещает в ближайшие годы быть особенно интенсивной. Не исключено, что, наряду с испытанными радиотехническими методами зондирования ионосферы, для задачи радиопрогнозов существенными окажутся наблюдения за радиоизлучением Солнца, о чём мы будем ниже говорить подробнее.

В области ультракоротких и микрорadiоволн большое значение имеет исследование вопросов рефракции, рассеяния и поглощения их в тропосфере в зависимости от метеорологических условий. Эта проблема, как мы увидим ниже, имеет важное значение и для метеорологии.

Специфические требования к проблеме распространения радиоволн предьявляют в настоящее время бурно развившиеся за последние годы радионавигация, радиолокация и особенно радиогодезия, в основе которых лежит знание точной величины скорости (групповой или фазовой) распространения радиоволн в действительных условиях. Достаточно, может быть, указать, что для определения с помощью радиоволн расстояния в 150 км с точностью в 5 м необходимо знать величину скорости распространения в данных условиях с точностью в $1/30\,000$, т. е. в 8—10 раз точнее, чем в настоящее время. Для оценки трудности удовлетворения этого требования нужно иметь в виду, что хотя скорость света в вакууме, по наиболее точным измерениям Майкельсона, и известна с точностью около 10^{-5} , однако поправка на воздух и его влажность составляет около $4 \cdot 10^{-4}$ величины скорости, т. е. в 12 раз превышает допустимую ошибку в измерении расстояния. Это означает, что при очень точных измерениях расстояний с помощью радиоволн необходимо

учитывать изменение влажности и барометрического давления на пути волны даже при распространении в свободном пространстве, когда можно пренебречь влиянием земной поверхности. Применение в геодезии для измерения расстояний радиоинтерференционных методов, аналогичных оптическим, например, классическому методу Майкельсона для точного измерения длин, которые в области микрорадиоволн могут принципиально дать очень высокие точности, требует ещё более тонких исследований и ещё более точного учёта влияния различных природных факторов на условия и величину скорости распространения этих радиоволн.

Среди проблем, относящихся к третьей группе, наиболее неясной, быть может, в смысле возможных путей разрешения, является проблема усиления микрорадиоволн. Если в области длинных, коротких и даже ультракоротких (метрового диапазона) волн применением электронных усилительных ламп и принципа резонансного усиления удаётся полностью решить задачу прямого (высокочастотного) усиления, то в области микрорадиоволн (от немногих сантиметров и короче) мы встречаемся с теми же трудностями, что и при генерации микрорадиоволн; картина здесь очень неясна, и пока не видно определённых возможных путей решения этой важной задачи. Возможно, что здесь могут привести к цели некоторые приёмы из области электронной оптики, аналогичные известным оптическим методам.

Необходимо также подчеркнуть, что в области микрорадиоволн не могут быть использованы: ни наиболее чувствительный оптический метод обнаружения и измерения электромагнитного излучения, а именно субъективный (зрение) — по вполне понятным причинам, ни фотоэлектрический — за отсутствием пока фотоэлементов, реагирующих на такие малые кванты. (Следует заметить однако, что в настоящее время уже имеются фотоэлементы, реагирующие на инфракрасное излучение с длиной волны в $1,4 \cdot 10^{-3}$ м.м.) Не может быть применён и столь чувствительный и универсальный фотографический метод. Не могут быть также использованы для приёма быстропеременных сигналов, ввиду их инерционности, и чувствительные тепловые методы, применяемые в оптике для обнаружения теплового излучения, например, с помощью болометра или термоэлемента.

Весьма большое значение для приёма микрорадиоволн имеют также и вопросы стабилизации частоты. Дело в том, что наиболее широко распространённым и, собственно говоря, единственным достаточно чувствительным методом приёма микрорадиоволн в настоящее время является метод гетеродинирования, т. е. одновременное наложение на кристаллический детектор как входящих микрорадиоволн, так и колебаний от местного источника микрорадиоволн приблизительно той же частоты. В результате такого гетеродинирования получается пониженная по сравнению с принимаемой разностная частота порядка частот ультракоротких или коротких волн, которая

затем усиливается обычными способами. Таким образом здесь особое значение приобретает стабильность частоты как принимаемых микро-радиоволн, так и местного гетеродина. В самом деле, при приёме, например, волн длиной в 3 мм, т. е. с частотой 10^{11} гц, и стабильности её порядка 10^{-5} , которую вряд ли можно превзойти в настоящее время для этих волн, колебания разностной частоты могут доходить до $2 \cdot 10^{-6}$ гц, а это потребует от приёмного устройства полосы пропускания частот такой ширины, которая допускала бы колебания не меньше $2 \cdot 10^{-6}$ гц. Такие колебания ширины полосы пропускания ещё не являются большим злом при приёме очень коротких импульсов длительностью порядка нескольких 10^{-7} секунд, как это имеет место в радиолокации, где ширина полосы достигает $5 \cdot 10^{-6}$, но для высокоселективного приёма непрерывных колебаний или радиотелефонии она весьма нежелательна. Дело в том, что с расширением полосы пропускаемых частот приёмника в нём, как известно, повышается уровень помех. Хотя в области микрорадиоволн практически отсутствуют как атмосферные помехи, столь вредные для приёма длинных и коротких волн, так и промышленные помехи, мешающие приёму и ультракоротких волн, однако здесь в полной мере дают себя чувствовать помехи от теплового излучения. Они-то в основном, наряду с флуктуационными помехами самого приёмника, и лимитируют чувствительность приёмника микрорадиоволн.

Для того чтобы составить себе представление, о каких величинах здесь может идти речь, приведём следующие цифры: если для $\lambda = 3$ м при достижимой стабильности в 10^{-7} , можно сузить полосу пропускания приёмника до 100 гц, вследствие чего можно довести мощность помех до $4 \cdot 10^{-18}$ вт, то для $\lambda = 3$ мм и стабильности в 10^{-5} полосу пропускания придётся взять порядка 10^7 гц, что, считая $n = 50$ (n — фактор шумов), даст для мощности помех $2 \cdot 10^{-12}$ вт. Для сравнения укажем, что чувствительность отдохнувшего глаза для $\lambda = 510$ мμ равна $4 \cdot 4 \cdot 10^{-17}$ вт, а чувствительность фотоэлементов доходит до $3 \cdot 10^{-14}$ вт.

Таким образом одной из актуальных и немаловажных проблем приёма микрорадиоволн является проблема борьбы с собственными шумами приёмной аппаратуры.

Необходимо также заметить, что экспериментальные исследования в области микрорадиоволн, особенно по мере их укорочения, в высшей степени затрудняются отсутствием точных и чувствительных методов измерений в этой области, лежащей на стыке между радио и оптикой. Как известно, в радиотехнике непосредственными объектами измерений являются силы тока и напряжения. Напряжённость электромагнитного поля радиоволн измеряется не непосредственно, а через электродвижущую силу, наведённую этим полем либо в прямолинейном проводнике, либо в рамке определённых размеров (радиокомпаратор). Остальные энергетические величины, как-то: поток мощности радиоволн, имеющие важное значение для характеристики

процесса, вычисляются по этим измерениям. С уменьшением длины волны постепенно теряет смысл понятие силы тока или напряжения в данном месте проводника и практически становится невозможным измерять эти величины, не изменяя существенным образом измеряемого объекта процесса. Поэтому в качестве объектов непосредственных измерений постепенно выступают на первый план, как и в оптике, величины, характеризующие поле излучения, как-то: лучистый поток мощности, интенсивность излучения, напряжённость электрического и магнитного полей волны, характер поляризации волны, коэффициенты поглощения и отражения. Для этого рода измерений в области микрорадиоволн с успехом применяются тепловые приборы: болометры и термоэлементы, которые ввиду своей инерционности, как было указано выше, не годятся для приёма этих волн. Совершенно очевидно, что разработка точных и чувствительных методов измерений в области микрорадиоволн является чрезвычайно важной научно-технической задачей настоящего времени.

Перехожу теперь к последней части своего затянувшегося доклада. В нашем беглом историческом обзоре основных этапов развития радио мы неоднократно имели возможность убедиться в том, что радио не только часто ставило перед физикой новые научные проблемы и со своей стороны давало науке новые методы и орудия исследований, но и приводило к новым открытиям в различных областях науки. Так, стремление объяснить самый факт приёма впервые в Америке радиосигналов из Англии привело Кеннели и Хевисайда к научной геофизической гипотезе о существовании верхних проводящих слоёв атмосферы, отражающих радиосигналы и образующих так называемую «ионосферу», а развитие ламповой и коротковолновой радиотехники позволило экспериментально доказать существование этих отражающих слоёв, а затем развить прекрасную методику исследования свойств непосредственно для нас недоступных верхних слоёв атмосферы.

Метод радиозондирования ионосферы, как известно, помог выявить процесс распространения радиоволн на большие расстояния вокруг земного шара и дал возможность сообщаться с антиподами. Он стал также исключительно гибким орудием исследования физических свойств ионосферы. С помощью этого метода была установлена роль ультрафиолетовой радиации Солнца в ионизации верхних слоёв атмосферы, а наблюдения во время солнечных затмений, особенно полных, позволяют получить ценные указания о распределении активных центров излучения на самом Солнце. Таким образом, радиометоды исследования ионосферы являются также и весьма ценным орудием исследования природы процессов на Солнце и их характера.

Значение радиометодов для геофизики не ограничивается только вопросами свойств ионосферы. Радио оказывает также большую помощь метеорологии в исследовании тропосферы. Не говоря уже о практически чрезвычайно важном и в настоящее время

широком применении радиозондов, где ценная роль радио заключается в автоматической передаче показаний приборов, регистрирующих температуру, давление, влажность и другие метеорологические элементы на различных высотах при подъёме на воздушном шаре, существенную роль в метеорологии, повидимому, суждено сыграть микро-радиоволнам.

Дело в том, что уже в самом начале применения радиоволн метрового диапазона было установлено, что часто дальность действия их простирается далеко за пределы прямой видимости. Тщательное теоретическое и экспериментальное исследование этого явления, проведённое за последние годы, выяснило, что оно существенно связано с метеорологическими условиями. Оказалось, что в облачную и сильно ветреную погоду дальность действия метровых и сантиметровых волн лишь очень немного превышает расстояние прямой видимости, в то время как при других метеорологических условиях дальность действия их иногда во много раз превосходит это расстояние, причём этот эффект тем сильнее, чем короче волна. Так, по наблюдениям, производившимся в Англии в июле 1941 г., дальность действия 10-сантиметровых волн простиралась на 270 км, тогда как геометрическое расстояние прямой видимости было меньше 64 км. Ещё более разительное дальное действие радиолокационной установки на волне 1,5 м наблюдалось возле Бомбея: во время муссонов она простиралась лишь на 32 км, в то время как в жаркое время года радиус действия доходил до 320 км; один раз он достиг 1000 км, и нередко бывали случаи, когда сигналы достигали берегов Аравии на расстоянии 1600—2000 км. Как показывает теория, такие аномальные явления распространения связаны с инверсией температуры, вызывающей аномальное искривление радиолучей, которое усиливается ещё больше уменьшением давления водяных паров при нагревании. Мы здесь имеем явление, аналогичное так называемому «оптическому миражу», хорошо известному путешественникам в пустыне. Однако зависимость распространения микрорадиоволн от метеорологических факторов этим не ограничивается. По опубликованным недавно результатам наблюдений английских исследователей наличие в атмосфере взвешенных капелек воды, кристалликов льда и даже частичек пыли оказывает заметное влияние на ослабление и рассеяние волн сантиметрового диапазона. Так, согласно наблюдениям, ослабление радиоволн в 3 см при прохождении через дождевые тучи и падающий дождь умеренной силы достигало в Британии 1 дб на км, а в тропиках в сильные ливни доходило до 6 дб на км. Установлено также заметное отражение этих волн от дождевых туч: в одном случае на волне $\lambda = 10$ см отражение от дождевой тучи, из которой шёл умеренный дождь (выпадение осадков составляло 7 мм/час), было того же порядка, что от небольшого самолёта, а на волне $\lambda = 3$ см — в 100 раз сильнее. Кроме того, было также обнаружено селективное поглощение миллиметровых волн в парах воды и кислороде. Такая многооб-

разная зависимость условий распространения микрорадиоволн от метеорологических факторов, несомненно, открывает новые пути для метеорологических исследований.

Явление селективного поглощения микрорадиоволн в парах воды и кислороде не является исключительным. Как уже было отмечено выше, в область микрорадиоволн как раз попадают линии поглощения или излучения, соответствующие ротационным спектрам молекул, из которых лучше всего изучен пока спектр аммиака NH_3 , лежащий в области $\lambda = 1,25 \text{ см}$. Как видно из рис. 7, этот спектр состоит

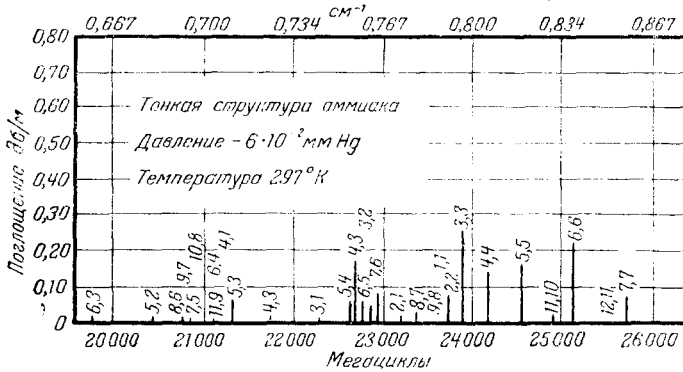


Рис. 7.

из очень тонких линий, которые могут быть использованы в качестве точных эталонов частоты. С другой стороны, выявление этих спектров и их изучение имеют очень важное значение для понимания структуры молекул, а также для установления состава данного вещества. Таким образом микрорадиоволны открывают новую, очень многообещающую область исследования — радиоспектроскопию молекул.

Микрорадиоспектроскопия может быть также использована и для изучения свойств диэлектриков, для большого числа которых максимум поглощения приходится как раз на область микрорадиоволн. Такое изучение спектров поглощения диэлектриков должно оказаться существенным для понимания их структуры. Это особенно важно для изучения структуры синтетических резин и каучуков. В связи с этим, мне кажется, важно иметь в виду, что исследование с помощью микрорадиоспектроскопии живых тканей, возможно, позволит эффективно использовать микрорадиоволны также и для диатермии, а при применении импульсной техники, может быть, для просвечивания и других лечебных целей.

За краткостью времени я не имею возможности останавливаться на других областях физики, обогатившихся благодаря применению ра-

диометодов исследования, например области магнитных явлений или упомянутых выше ускорителей заряженных частиц и др. Я перехожу к тем перспективам, которые открываются в геодезии и гидрографии благодаря радио. Всем хорошо известно, что в настоящее время в гидрографии для измерения глубин широко применяются так называемые «эхо-лоты», основанные на отражении ультразвука от морского дна. Метод эхо-лота, обаянный своим существованием радио, произвёл настоящую революцию в гидрографии, так как он позволяет быстро и точно определять отдельные глубины, а также вести непрерывную запись глубин и таким образом давать рельеф дна. Гидрографические промеры, как известно, состоят из измерения глубины в данной точке и одновременном определении координат этой точки. Если до появления эхо-лота главная трудность заключалась в невозможности быстро и точно производить замер больших глубин, то в настоящее время центр тяжести переместился в сторону определения координат, которое становится особенно затруднительным при удалении судна от берега за пределы прямой видимости. Кроме того, для обычных геодезических (оптических) методов определения координат требуется хорошая видимость, что сильно ограничивает время производства измерений. Задачи точного и быстрого определения положения судна за пределами прямой видимости, и притом в любую погоду, успешно разрешаются применением разработанных у нас в Союзе радиоинтерференционных методов измерения расстояния. Эти методы могут быть также с успехом применены и для определения координат при аэрофотосъёмке. Дальнейшая разработка радиоинтерференционных методов с переходом на более короткие волны и получением более точного значения скорости распространения радиоволн открывает также новые возможности для решения некоторых задач высшей геодезии. Я имею в виду задачу смыкания различных систем триангуляции через большие водные пространства, не позволяющие пользоваться обычными оптическими методами определения расстояний, как например: через Берингов пролив или Средиземное море. Кроме того, переход к дециметровым и сантиметровым волнам даёт возможность использовать радиоинтерференционные методы для непосредственного определения с большой точностью исходных базисов триангуляционных сетей, что особенно важно для геодезических съёмок необжитых пространств.

Исключительно широкие перспективы открывает применение радиометодов в астрономии и астрофизике. Мы уже упоминали об очень важной для астрономии передаче по радио точных сигналов времени и о кварцевых часах. Развитие техники коротких и сверхкоротких волн, в частности радиолокации, дало новые, в высшей степени мощные средства исследования и привело к ряду чрезвычайно интересных и важных открытий в области астрофизики. Я начну с применением методов радиолокации для наблюдений за метеорами, которое позволяет не только чрезвычайно легко и просто отмечать появление метеоров, но и определять высоту, на которой

они производят заметные ионизационные эффекты. Как Вы знаете из сообщений печати, такие наблюдения, проводившиеся во время метеорного дождя в утренние часы 10 ноября 1946 г., дали очень интересные результаты. Я подчеркнул «утренние часы» потому, что с помощью оптических методов наблюдения за метеорами можно производить только в ясную ночь, в то время как радиометодами можно пользоваться как ночью, так и днём, независимо от состояния атмосферы.

Исключительно большой интерес для теории Луны и её движения, а также для исследования её поверхности представляет, осуществлённое примерно год тому назад, в январе 1946 г., отражение радиоимпульсов от Луны. Оставляя в стороне спортивное значение самого факта радиопередачи до Луны и обратно, т. е. на расстояние около $3/4$ миллиона км, достаточно красноречиво характеризующее прогресс радио за последние годы, трудно переоценить научное значение его. Дело в том, что достигаемая в настоящее время высокая астрономическая точность определения расстояния до Луны получается в результате многочисленных наблюдений, требующих благоприятных атмосферных условий и связанных с измерениями из двух пунктов, расположенных примерно на одном меридиане на огромном расстоянии друг от друга, а также со сложными вычислениями и учётом многочисленных поправок. Применение для этой цели метода радиолокации позволяет измерять непосредственно расстояние до Луны из одного пункта, причём точность единичного измерения на порядок величины превышает среднюю астрономическую точность. Кроме того, этот метод принципиально даёт возможность следить непрерывно за изменением расстояния до Луны во времени, что имеет особую ценность для теории Луны. Следует также заметить, что зависимость интенсивности и формы отражённого радиоимпульса от свойств отражающей поверхности может быть использована для исследования структуры поверхности Луны. В настоящее время ещё очень трудно сказать, какие новые перспективы для исследования Луны откроются при дальнейшем углублении метода радиолокации в применении к измерениям расстояния до Луны.

Исследованием Луны и наблюдениями за метеорами не ограничивается применение радиометодов в астрономии и астрофизике. Дело в том, что ряд процессов на Солнце и в мировом пространстве сопровождается явлениями, которые по своей природе могли быть обнаружены лишь радиометодами. 15 лет тому назад Янский, занимаясь исследованием атмосферных радиопомех, обнаружил на волне 14,6 м, наряду с радиопомехами земного происхождения — природными и индустриальными, — также и радиопомехи внеземного происхождения, приходившие из источников, расположенных далеко за пределами земной атмосферы. При этом по его измерениям максимум этих помех, получивших название «космических помех», приходил из направления на созвездие «Стрелец», т. е. примерно из центра Галактики. Эти

результаты подтвердились наблюдениями Робера в 1940 и 1944 гг. на волне 1,87 m . Им, кроме главного максимума из направления на созвездие «Стрелец», наблюдались ещё менее интенсивные максимумы из областей Лебеда, Кассиопеи, Большого Пса, Кормы и др. Эти наблюдения, которые стали возможны исключительно благодаря огромным достижениям ультракоротковолновой радиотехники, вызвали чрезвычайно большой интерес со стороны астрофизики, как как они открывают новые перспективы для исследования процессов в мировом пространстве.

Наряду с радиоизлучением из области Галактики, Ребер обнаружил также на волне 1,87 m и радиоизлучение Солнца. Дальнейшие наблюдения Саутворта на волнах от 1 до 10 cm , а также наблюдения на радиолокационных установках, производившиеся во время войны в Англии и Австралии, в диапазоне 4—6 m , обнаружили излучение Солнца и на этих волнах. Было также замечено, что радиоизлучение Солнца необыкновенно — в сотни тысяч раз — возрастает во время прохождения солнечных пятен, и при этом было установлено, что именно пятна являются очагами этого мощного радиоизлучения (Рилей и Вонберг). Анализ характера этого излучения показал, что оно в значительной мере поляризовано по кругу (Мартин, Эпилтон). Из опубликованных в последнее время многочисленных работ, посвящённых наблюдениям за радиоизлучением Солнца, с несомненностью вытекает их огромное значение для изучения процессов на Солнце и природы солнечной короны. Эта новая область исследований, которая сейчас ещё находится в младенческом возрасте, безусловно представляет чрезвычайный интерес для физики Солнца. Есть все основания думать, что с применением радиометодов для астрономии откроется новая эра, которую по её значимости можно сравнить с открытием фраунгоферовых линий и применением спектроскопии в астрофизике и которая поможет ещё глубже проникнуть в тайны мироздания.

Само собой разумеется, что упомянутыми мной научными дисциплинами далеко не ограничиваются те перспективы, которые открывает перед наукой современное радио. Не подлежит сомнению, что при дальнейшем развитии радио откроются ещё новые и, может быть, более широкие возможности для научных исследований. Но мне кажется, что из того немногого, что я здесь изложил, со всей очевидностью выявляется, к каким изумительным результатам приводит тесная связь науки и техники вообще и особенно радио и науки.