

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ОПТИКА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН И РАДИОАСТРОНОМИЯ*)

А. Е. Саломонович

С именем Петра Николаевича Лебедева в истории физики неразрывно связано экспериментальное открытие пондеромоторного действия света — лебедевского светового давления. Не менее известна роль П. Н. Лебедева в развитии оптики миллиметровых радиоволн. Вслед за знаменитым опытным открытием Генриха Герца «появилась потребность делать его опыты в небольшом масштабе», как говорит в своем труде «О двойном преломлении лучей электрической силы»¹ П. Н. Лебедев. Фактически речь шла о продвижении от открытых Герцем дециметровых (по современной терминологии) радиоволн в сторону тепловых, т. е. инфракрасных волн. П. Н. Лебедеву в 1895 г. впервые в мире удалось создать комплекс экспериментальных устройств, необходимых для генерирования и приема волн короче 1 см, т. е. по современной терминологии — миллиметровых волн. Более того, им были реализованы все приборы, с помощью которых можно было направлять, собирать и анализировать «лучи электрической силы» — выяснять их волновую природу и исследовать взаимодействие этих лучей с веществом. В возможности этого исследования П. Н. Лебедев видел основное преимущество перехода к столь коротким волнам. Впервые им были осуществлены опыты двойного лучепреломления радиоволн в кристаллах. Потребовалось изумительное мастерство гениального экспериментатора, каким был П. Н. Лебедев, чтобы осуществить намеченную им программу исследований. В Физическом институте им. П. Н. Лебедева хранятся подлинные приборы, изготовленные П. Н. Лебедевым для проведения опытов Герца на волне 6 мм. Они представлены на рис. 1.

Краткое перечисление этих приборов должно напомнить о виртуозности П. Н. Лебедева. Разумеется, в то время генерировались лишь затухающие электромагнитные колебания, возбуждаемые с помощью искрового разряда. Для создания колебаний с длиной волны в несколько миллиметров были применены вибраторы размером немногим более миллиметра, расположенные в керосиновой ванне в фокусе цилиндрического зеркала с отверстием 12 мм и фокусным расстоянием 6 мм. В качестве приемника служил вибратор, настроенный на волну 6 мм и помещенный в фокусе аналогичного зеркала. Индикатором присутствия электромагнитных колебаний служила железо-константановая термопара и чувствительный гальванометр.

В комплекте приборов находились: поляризатор — в виде проволочной решетки площадью 4 см², зеркало для исследования интерференции и точного измерения длины волны и призма, изготовленная из эбонита размером 1,8 см × 1,2 см, с помощью которой по углу наименьшего

*) Доклад в Физическом институте АН СССР на заседании 12 марта 1962 г., посвященном 50-летию со дня смерти П. Н. Лебедева.

отклонения был определен показатель преломления эбонита. Исследования взаимодействия электромагнитных волн с кристаллическим веществом производились с помощью двоякопреломляющих кристаллов ромбической серы, из которых П. Н. Лебедевым были изготовлены призмы, николи, а также пластинка в четверть длины волны. Толщина последней, необходимая для того, чтобы разность фаз колебаний в двух взаимно перпендикулярных плоскостях достигла 90° , составляла всего 0,6 см.

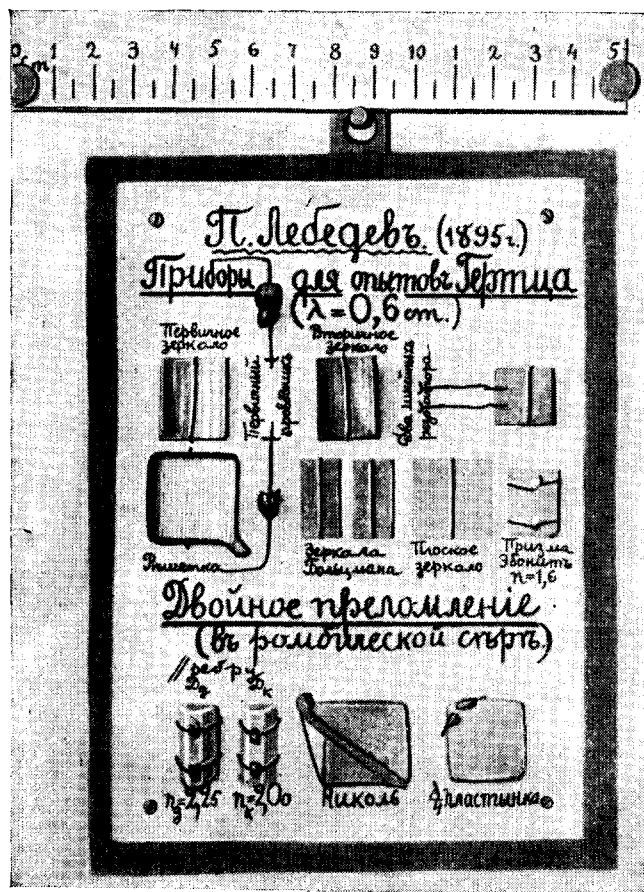


Рис. 1. Приборы П. Н. Лебедева для опытов Герца на волне 6 м (хранятся в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР).

С набором этих приборов были блестяще выполнены все опыты, демонстрировавшие «тождество в явлениях электрических и световых колебаний и в этом более сложном случае».

Огромной трудностью при реализации опытов являлась немонохроматичность генерируемых затухающих колебаний.

П. Н. Лебедеву удавалось получать не более двух интерференционных максимумов, опыты в толстых кристаллических пластинках с большой разностью хода не могли быть проведены по той же причине. Чувствительность приемника была крайне низка. Тем не менее, искусство экспериментатора позволило провести все намеченные опыты. Интересно, что П. Н. Лебедев сумел показать прямолинейность распространения волны с точностью до 3° . Легко подсчитать, что дифракционное расхождение

пучка (то, что на современном языке называется диаграммой направленности) примененной им зеркальной антенны имело раcтвор около 20° . Приходилось, таким образом, фиксировать уменьшение отклонения гальванометра, равное $\sim 10\%$ от максимального, что соответствовало 0,1 ширины диаграммы.

За десятилетия, прошедшие со времени пионерских исследований П. Н. Лебедева, радиотехника проделала огромный путь. Она стала, по словам акад. Л. И. Мандельштама, одним из чудес современного мира².

Были созданы еще более мощные генераторы незатухающих радиочастотных автоколебаний, более чувствительные приемно-усилительные устройства. Эти устройства создавались на базе успехов электроники, в первую очередь с помощью электронных ламп. Не удивительно поэтому, что освоение радиочастотного диапазона пошло в дальнейшем со стороны длинных волн. Постепенно радиотехника продвигалась в сторону все более коротких волн, причем менялись не только габариты генераторов и приемников, но и физические принципы, положенные в основу их действия. В 30-е и последующие годы были прочно освоены сверхвысокие частоты — дециметровые, сантиметровые и, наконец, миллиметровые волны.

Радиофизика и радиотехника, начинавшиеся работами Г. Герца, О. Лоджа, А. Риги, П. Н. Лебедева, А. А. Глаголевой-Аркадьевой в дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах, вернулись, но на неизмеримо более высоком уровне, к этим же волнам.

Значение сверхвысоких частот, в том числе соответствующих миллиметровым волнам, трудно переоценить. Это значение связано с самой природой волновых явлений. Возможность получать остронаправленные пучки радиоволн ограничивается дифракцией, вследствие которой угловые размеры пучка φ характеризуются известным отношением $\varphi \approx \lambda/D$, где λ — длина волны, а D — размер выходного отверстия прибора. Чтобы была ясна ситуация, достаточно напомнить, что ультракороткие радиоволны длиной, скажем, 5 м, оказываются все же в 10 миллионов раз длиннее световой волны. Аналогом сравнительно небольшого оптического телескопа с зеркалом диаметром 10 см в метровом диапазоне волн явилось бы зеркало радиотелескопа поперечником в тысячу километров.

Укорочение длины радиоволн позволяет получать относительно острые пучки с помощью инструментов, умеренных по человеческим масштабам размеров. Именно необходимость улучшать отношение λ/D , возникавшая в связи с потребностями радиолокации, привела к вторичному освоению сантиметровых, а затем и миллиметровых радиоволн.

Не имея возможности сколько-нибудь подробно остановиться на роли сантиметровых и миллиметровых волн в физике и технике, подчеркнем лишь их значение в одной из возникших сравнительно недавно отраслей науки — в радиоастрономии.

Пока человек смотрел на Вселенную лишь с поверхности Земли, он располагал сравнительно узким окном видимого света. Ультрафиолетовый и большая часть инфракрасного участка спектра были практически недоступны из-за потерь в атмосфере Земли. Развитие радиотехники метровых и сантиметровых волн позволило использовать второе, более широкое окно. Оно ограничено со стороны метровых волн экранирующим действием ионосферы, а со стороны миллиметровых волн — молекулярным поглощением в атмосферном водяном паре и кислороде.

По крайней мере, в двух отношениях сантиметровые и миллиметровые волны представляют большой интерес для радиоастрономии. С одной стороны, как было указано выше, с укорочением длины волны появляется возможность пользоваться сравнительно узкими пучками радиоволн, что позволяет повышать разрешающую силу приборов. С другой стороны,

укорочение волны в некоторых важных случаях позволяет «работать» с относительно более интенсивными потоками радиоизлучения.

Речь идет о тех случаях, когда радиоизлучение космических тел, изучаемое радиоастрономией, представляет собою длинноволновую часть планковского теплового излучения. В этом случае, как известно, в рэлей-джинсовской ветви спектральной кривой интенсивность растет обратно пропорционально квадрату длины волны. С таким случаем мы встречаемся, например, при исследованиях радиоизлучения Луны и некоторых планет солнечной системы, в частности Марса и, по-видимому, Венеры.

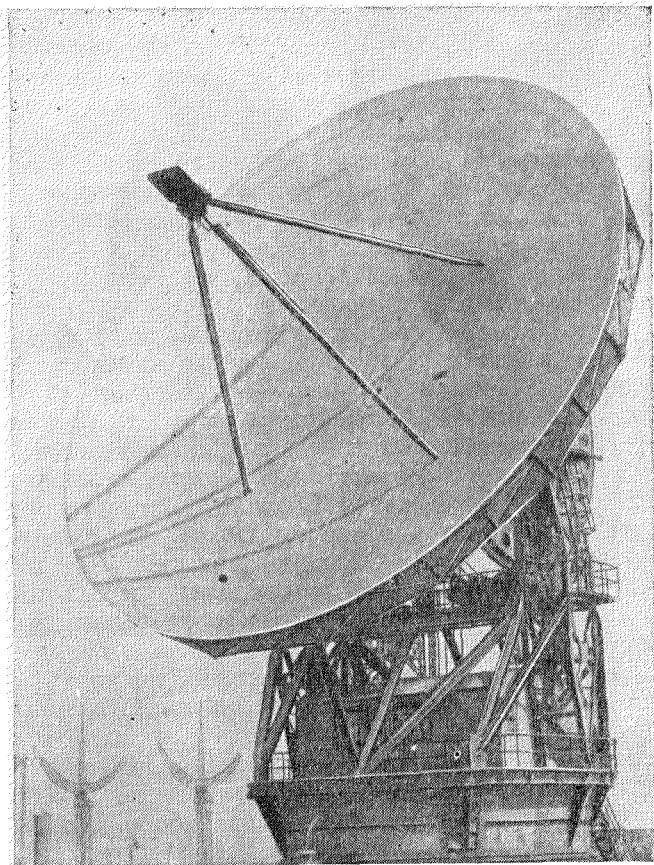


Рис. 2. Радиотелескоп РТ-22 Физического института им. П. Н. Лебедева.
(Диаметр его параболического рефлектора равен 22 м.)

Рекордные разрешающие силы зеркальных радиотелескопов удается получить как раз на сантиметровых и миллиметровых волнах. Например, зеркальный радиотелескоп Физического института им. П. Н. Лебедева (рис. 2) обладает направленностью приема около 2 угловых минут на волне 8 мм. Диаметр его алюминиевого параболического рефлектора 22 м.

Если вспомнить, что зеркальность поверхности, согласно обычным требованиям оптики, получается лишь при отклонениях от параболоида, не превышающих 0,1 длины волны, станет ясной трудность создания такого зеркала.

Использование этого радиотелескопа позволило в лаборатории радиоастрономии Физического института исследовать распределение темпера-

туры в слое под поверхностью Луны в зависимости от ее фазы. На рис. 3 изображены радиоизотопы собственного излучения Луны вблизи ее первой и третьей четвертей, полученные на волне 8 мм, а также изменение с фазой Луны яркостной температуры центра диска. Подобные измерения позволяют получить сведения о физических характеристиках материала лунной коры.

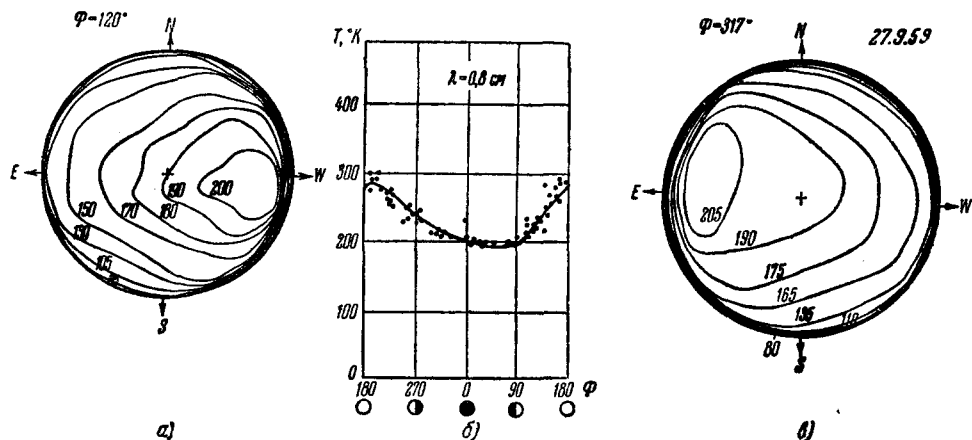


Рис. 3. Изофоты радиоизлучения Луны на волне 8 мм по измерениям на радиотелескопе РТ-22 вблизи первой (а) и последней (в) четвертей, а также изменения яркостной температуры центра диска Луны при смене ее фаз (б).

С помощью этого же радиотелескопа исследовалось радиоизлучение планеты Венеры на волне 8 мм³ и даже на волне 4 мм⁴ *). На рис. 4 приведены образцы записей «прохождения» планеты через конус направлений, по которым зеркало воспринимает излучение. Максимальный сигнал получается, когда ось параболического рефлектора направлена на планету.

Эти записи получены на волнах 8 и 4 мм в 1961 г. вблизи нижнего соединения Венеры и позволили определить яркостную температуру ночной стороны планеты, оказавшуюся близкой к 400° К. На волне 8 мм удалось также зафиксировать радиоизлучение Юпитера. На рис. 4 — результат обработки нескольких записей «прохождения» этой планеты.

Важные сведения о физической природе источников радиоизлучения удается получать, исследуя не только интенсивность принимаемого излучения, но и состояние его поляризации. В своих классических поляризационных опытах П. Н. Лебедев создал и использовал, как упоминалось, поляризаторы, анализаторы и пластинки в «четверть волны». Элементы этого типа широко используются в радиоастрономии.

Роль анализаторов и поляризаторов часто играют те волноводы, по которым проходит высокочастотная энергия. Пластинки в «четверть волны» представляют собой помещенные в круглом волноводе вдоль его оси тонкие диэлектрические пластинки, позволяющие замедлять скорость распространения волны, поляризованной в плоскости пластинки по сравнению с волной, поляризованной перпендикулярно к ней. В результате плоскополяризованная волна может превращаться в поляризованную по кругу и наоборот. Изменение скорости распространения волн достигается и путем деформации кругового волновода в эллиптический. Идея использовать двоякопреломляющие свойства вещества, реализованная

*) Интересные радиоастрономические наблюдения Солнца и Луны на волне 4 мм выполнены в НИРФИ А. Г. Кисляковым с помощью радиотелескопа меньшего размера [Изв. вузов (Радиофизика), № 1 (1961)].

в опытах П. Н. Лебедева, также находит широкое применение в технике радиоастрономии. Известны свойства ферритов — поликристаллических веществ, замечательным образом сочетающих магнитные характеристики ферромагнетиков и низкие электрические потери полупроводников. Вследствие взаимодействия со спинами электронов атомов вещества, электромагнитные волны в присутствии внешнего магнитного поля имеют в ферритовом материале скорости распространения, различные в зависимости

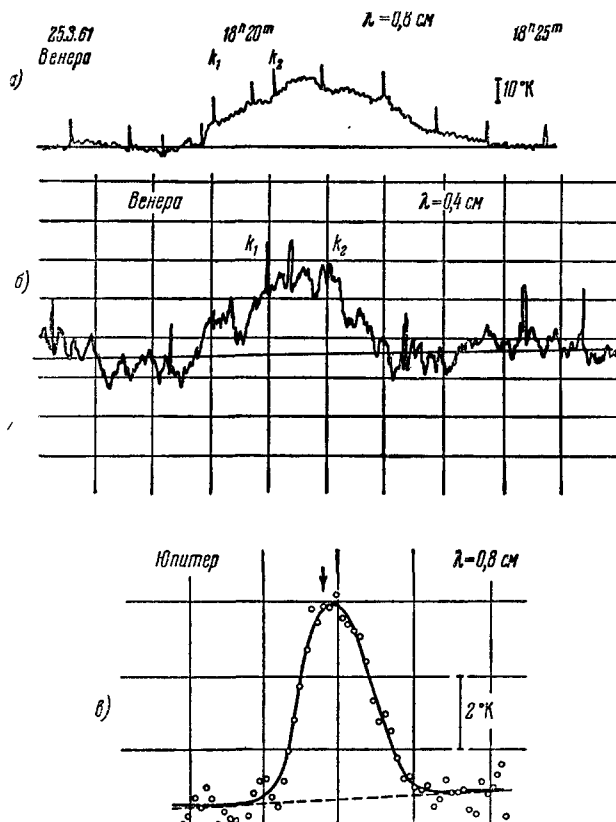


Рис. 4. Образцы записей радиоизлучения Венеры на волнах 8 мм (а) и 4 мм (б) и Юпитера на волне 8 мм (в), полученных в 1961 г. на радиотелескопе РТ-22.

от того, поляризованы ли они по кругу вправо или влево. В технике радиоастрономии используется возникающее вследствие этого фарадеевское вращение плоскости поляризации.

В лаборатории радиоастрономии ФИАН разработаны и успешно применяются поляризационные ферритовые модуляторы и четвертьволновые пластинки 8 мм-диапазона⁵.

На рис. 5,а показан комплект таких устройств, представляющих собой высокочастотную часть поляризационного радиометра.

Особый интерес представляют исследования поляризационных характеристик радиоизлучения Солнца.

Высокая разрешающая сила радиотелескопов в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн позволяет получать радиоизотопы отдельных областей на солнечном диске, в том числе и в поляризованном свете. Обнаруживается, в частности, что радиоизлучение более ярких локальных источников на Солнце, связанное с группами пятен, где велико

локальное магнитное поле, частично поляризовано по кругу. Измерения этого радиоизлучения позволяют получать сведения об атмосфере Солнца над группами пятен и о магнитных полях над ними. Первые наблюдения

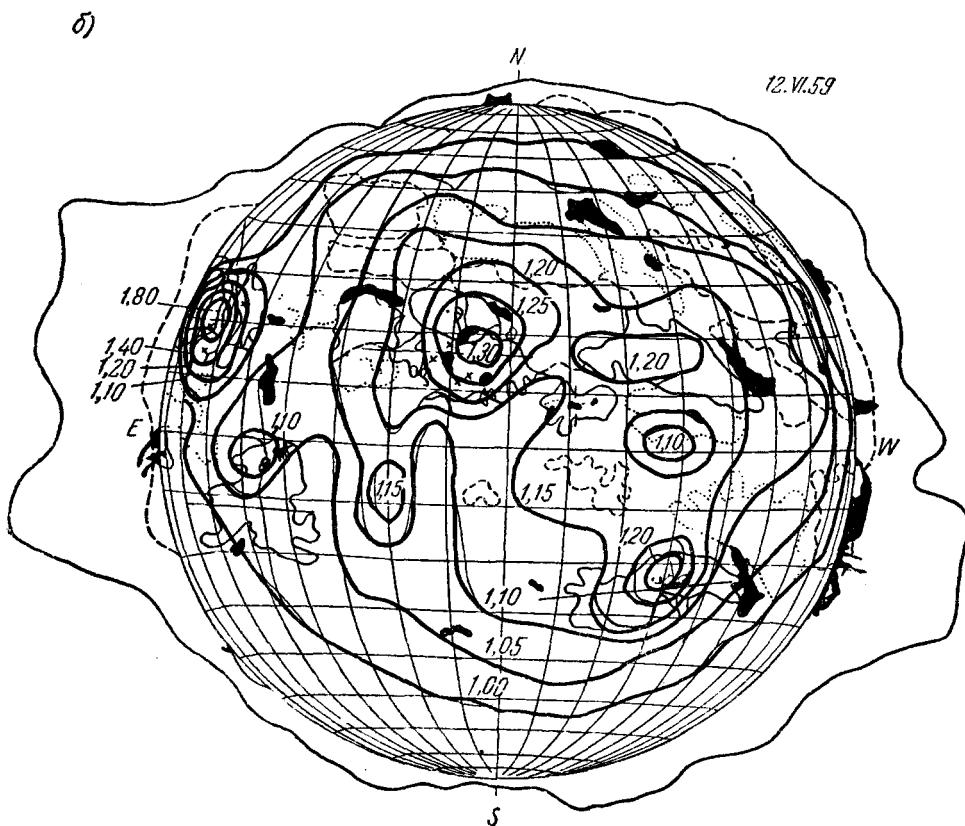
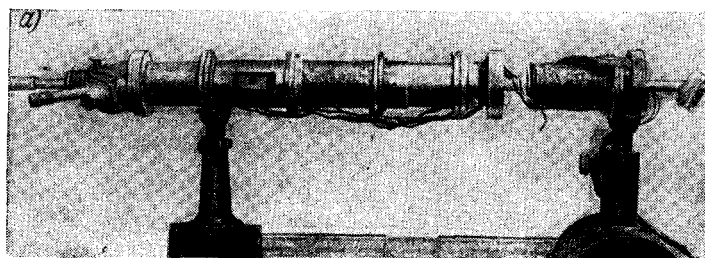


Рис. 5. а) Общий вид высокочастотной части поляризационного радиометра диапазона 8 мм, разработанного У. В. Хангильдиным (ФИАН). б) Образец изофот радиоизлучения Солнца на волне 8 мм, полученных с помощью радиотелескопа РТ-22. Видны локальные источники радиоизлучения, связанные с группами пятен. Цифры характеризуют относительную интенсивность излучения. За 1 принят уровень излучения спокойного Солнца.

поляризации излучения Солнца в сантиметровом диапазоне были выполнены в Пулковской обсерватории⁶. На рис. 5, б приведен пример радиоизофот Солнца, получаемых на 22-метровом радиотелескопе на волне 8 мм. Аналогичные радиоизофоты на волне 3 см были получены ранее на 30-метровом радиотелескопе ФИАН в Крыму⁷. Недавно на 22-метровом радиотелескопе были получены изофоты Солнца на волне 4 мм.

Современный этап развития радиофизики характеризуется невиданным скачком в увеличении чувствительности приемной аппаратуры и повышении монохроматичности и частотной стабильности генерируемых колебаний. Оба эти достижения связаны с развитием квантовой радиофизики, в котором Физический институт имени П. Н. Лебедева играет ведущую роль⁸. В свою очередь, повышение чувствительности приемной аппаратуры в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн имеет решающее значение в дальнейшем изучении небесных тел методами радиоастрономии, в частности позволяет резко увеличить число дискретных источников радиоизлучения, доступных измерениям.

Выход за пределы земной атмосферы, в космическое пространство, снимает те ограничения в выборе диапазона электромагнитных волн, о которых говорилось выше. Вынос радиотелескопов за пределы атмосферы позволяет продвигаться практически неограниченно в сторону все более коротких радиоволн. В этой связи уместно упомянуть о той огромной роли, которую будут играть усилители и генераторы субмиллиметровых, инфракрасных и световых волн, которые становятся реальностью в связи с успехами квантовой радиофизики. И здесь мы возвращаемся снова к тому знаменитому опыту, который связан с именем П. Н. Лебедева, — к его световому давлению. Известно, что одно из важных применений лебедевское давление получило как раз в диапазоне сверхвысоких радиочастот. По ряду причин в этом диапазоне оказалось, например, весьма целесообразным измерять мощность излучения по его пондеромоторному действию. На принципе использования лебедевского давления основано действие разнообразных измерителей мощности сверхвысоких частот⁹.

С созданием оптических усилителей и генераторов света методы радиофизики сверхвысоких частот распространяются в область оптики, подобно тому как во времена П. Н. Лебедева оптические методы помогали овладевать «пучками электрической силы». Создание когерентных оптических излучателей, где размеры фокусируемого пятна ограничены лишь дифракционными эффектами, приводит к необычайному возрастанию пондеромоторного действия света.

Таким образом, оба направления трудов П. Н. Лебедева — световое давление и миллиметровые волны — получают новое и многообещающее развитие спустя половину столетия со дня его кончины.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. П. Н. Лебедев, Журн. Русск. физ.-хим. об-ва, ч. физ., 213 (1895).
2. Л. И. Мандельштам, Из предистории радио, М., Изд-во АН СССР, Введение.
3. А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, Астрон. ж. 38, № 6, 1115 (1961); 39, № 4 (1962).
4. А. Г. Кисляков, А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович, Изв. вузов (Радиофизика) 4, № 3, 573 (1961).
5. У. В. Хангильдин, Радиотехника и электроника 4, 1945 (1959).
6. Н. Л. Кайдановский, Д. В. Корольков, Н. С. Соболева, С. Э. Хайкин, ДАН СССР 112, № 6, 1012 (1957).
7. В. В. Виткевич, А. Д. Кузьмин, А. Е. Саломонович, В. А. Удальцов, Радиоастрономия, Парижский симпозиум (1958 г.). М., ИЛ, 1961, стр. 129.
8. А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, Квантовая радиофизика, Вестн. АН СССР, № 4, 110 (1960).
9. Р. А. Валитов, Тр. радиофиз. факультета Харьковского гос. университета им. Горького, т. 1, 53 (1959).