

# МЕТЕОРЫ, ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА И НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБЫХ МЕТЕОРОВ

*Б. Л. Кащеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук*

Радиотехнические методы исследования метеоров в последние годы получили широкое распространение. Метеорные тела и связанные с ними явления в атмосфере Земли представляют не только чисто научный, но и практический интерес при исследовании космического пространства и создании линий метеорной радиосвязи. Различные методы изучения метеоров, в основном фотографические, радиотехнические и прямые измерения на космических аппаратах, являются не столько конкурирующими, сколько дополняющими друг друга, так как они охватывают наблюдениями различные диапазоны масс метеорных тел.

В настоящей работе описывается радиолокационный комплекс, разработанный в Харьковском политехническом институте им. В. И. Ленина в 1965—1967 гг., предназначенный для всесторонних исследований метеоров с массами на два порядка меньше изучавшихся ранее наземными методами. Отдельные устройства комплекса описаны в работах [1, 2, 3]. В процессе эксплуатации в первоначальном варианте аппаратуры были сделаны некоторые изменения.

### Обоснование основных параметров комплекса

Главное требование при разработке данной аппаратуры — достижение максимально возможной эффективной чувствительности при измерениях численности, скоростей и радиантов слабых метеоров. Влияние параметров аппаратуры на эффективность радионаблюдений метеоров подробно рассмотрено в ряде работ [4,5] и др.

Максимальное значение мощности сигнала, рассеянного на насыщенном метеорном следе:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \alpha^2}{32\pi^2} \left(\frac{\lambda}{R}\right)^3 \left(\frac{e^2}{mc^2}\right)^2 f(r_0) \varphi^2(\Delta), \quad (1)$$

где  $P_{\text{пер}}$  — импульсная мощность передатчика;

$G_{\text{пер}} G_{\text{пр}}$  — коэффициенты направленного действия передающей и приемной антенн;

$\alpha$  — линейная электронная плотность в следе;

$\lambda$  — длина волны;

$R$  — дальность до следа;

$m, e$  — масса и заряд электрона;

$c$  — скорость света;

$r_0$  — начальный радиус следа;

$$\Delta = \frac{8\pi^2 DR^{\frac{1}{2}}}{V\lambda^{\frac{3}{2}}}; \quad (2)$$

$D$  — коэффициент амбиполярной диффузии;

$V$  — скорость метеора.

Множители  $f(r_0) = e^{-\left(\frac{2\pi}{\lambda} r_0\right)^2}$  и  $\varphi(\Delta) = \frac{1 - e^{-\sqrt{2}\Delta}}{\sqrt{2}\Delta}$  учитывают ослабление

сигнала вследствие влияния начального радиуса следа и диффузионного расширения за время формирования первой зоны Френеля.

Как видно из выражения (1), мощность рассеянного сигнала зависит от параметров аппаратуры  $\lambda$ ,  $G$  и  $P_{\text{пер}}$ . Без учета влияния начального радиуса и диффузии  $P_{\text{пр}} \sim \lambda^3$ , а их учет приводит к большей зависимости мощности рассеянного сигнала от длины волны. При  $\Delta > 1$  в первом приближении

$$P_{\text{пр}} \sim \lambda^6 e^{-2\left(\frac{2\pi}{\lambda} r_0\right)^2}. \quad (3)$$

Таким образом, радионаблюдения метеоров целесообразно проводить на более длинных волнах. С увеличением длины волны одновременно возрастает число регистрируемых метеоров  $N$ , поскольку распределение метеоров по массам подчиняется обратно-степенному закону. При посто-

янном пороговом сигнале можно считать  $N \sim \lambda^{\frac{3}{2}}$ .

Однако при увеличении  $\lambda$  растет уровень космических шумов; при  $\lambda > 12$  м резко возрастают атмосферные помехи. Кроме того, приходится считаться с сигналами, рассеянными на неоднородностях ионосферы, с возвратно-наклонным зондированием и с помехами от различных радиостанций. Поэтому оптимальная длина волны для радионаблюдений метеоров находится в диапазоне  $\lambda = 10-14$  м. При разработке комплекса был выбран диапазон частот 22—23 Мгц.

Существенным фактором, определяющим возможность регистрации слабых метеоров, является коэффициент направленного действия антенны  $G$ . Увеличение  $G$  означает одновременно уменьшение ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны и, следовательно, уменьшение просматриваемой области. При этом в случае равномерного распределения видимых радиантов метеоров по небесной сфере и интегрального закона распределения метеоров по массам вида  $N \sim M^{-1}$  численность метеоров не меняется. При проектировании антенн было выбрано  $G = 250$ , что достигается сужением диаграммы направленности антенны до  $4-5^\circ$  в горизонтальной плоскости и до  $30^\circ$  — в вертикальной. Дальнейшее сужение диаграммы направленности антенны привело бы к ограничению количества наблюдаемых радиантов. Помимо этого метеорные следы, имеющие длину 10—20 км, не охватывались бы главным лепестком антенны, а для определения радиантов метеоров необходимо получить отражение от нескольких точек метеорного следа. Угол наклона главного лепестка диаграммы направленности антенны над горизонтом целесообразно выбирать в пределах 30—50°.

Мощность рассеянного сигнала также пропорциональна мощности излучения  $P_{\text{пер}}$ . В выбранном диапазоне частот имеет смысл ограничиться импульсной мощностью передатчика порядка мегаватта, так как ее дальнейшее увеличение связано со значительными техническими трудностями, с большими энергетическими затратами, а также потому, что возникающие помехи из-за рассеяния на неоднородностях ионосферы и эффекта Кабанова начинают превышать уровень космических и атмосферных шумов. Особенно это существенно в дневное время в периоды солнечной активности.

Выбор длительности  $\tau$  и частоты повторения  $F$  импульсов определяется несколькими требованиями: чувствительностью, оперативностью, разрешающей способностью, однозначностью и точностью измерения

дальности, точностью определения скоростей и радиантов метеоров. В окончательном варианте комплекса было принято  $\tau = 30$  мксек и  $F = 500$  имп/сек. Для однозначного определения дальности в пределах 600 км каждый пятый импульс излучается двоящим.

### Функциональная схема комплекса

Скорости и координаты радиантов индивидуальных метеоров измеряются при помощи импульсно-дифракционного метода с приемом отраженных сигналов в нескольких разнесенных пунктах. Рассмотрим принцип работы, назначение и взаимодействие отдельных устройств комплекса (рис. 1).

Радиоимпульсы, излучаемые антенной передающего устройства 1, в момент образования ионизированного метеорного следа рассеиваются на нем и принимаются в нескольких разнесенных на расстояние 5—10 км пунктах. Принятые в вынесенных пунктах сигналы после соответствующего преобразования частоты и усиления мощности ретранслируются в главный приемно-регистрирующий пункт. Сигналы с выхода приемного устройства 2 подаются в систему защиты от помех и на отклоняющие пластины электронно-лучевых трубок регистрирующих устройств 4. Полезные сигналы, проходя систему защиты от помех, вырабатывают в блоках устройства управления 3 импульсы запуска генераторов разверток и импульсы подсвета лучей. Экраны электронно-лучевых трубок фотографируются специальными автоматическими фотокамерами, работающими в ждущем режиме. При измерениях только численности метеоров ретрансляторы 6 не используются; отраженные от метеоров сигналы принимаются в главном пункте и фотографируются в регистрирующем устройстве 5 на непрерывно движущуюся киноплёнку.

*Передающее устройство 1* разработано с учетом возможности его применения для различных метеорных исследований, поскольку мощный передатчик является довольно сложным и дорогим устройством. Поэтому передатчик построен по многокаскадной схеме, чтобы можно было изменить частоту повторения и длительность импульсов, а также производить когерентно-импульсные измерения.

*Мощный усилитель МУ* представляет собой четырехкаскадный усилитель радиоимпульсов с симметричным выходом мощностью 1 Мвт и с коэффициентом усиления по мощности около  $10^4$ . Колебательные контуры выполнены в виде короткозамкнутых отрезков двухпроводных линий; связь между каскадами и с антенно-фидерной системой индуктивная, регулируемая.

*Возбудитель В* выполнен в виде отдельного блока, который можно использовать при настройке антенн в качестве мощного генератора сигналов. На вход возбудителя из устройства управления 3 поступают импульсы запуска и напряжение возбуждения. Здесь происходит умножение частоты в шесть раз и модуляция прямоугольными импульсами. Таким образом, возбудитель вырабатывает радиоимпульсы мощностью 150 вт, служащие для возбуждения мощного усилителя. Предусмотрена возможность работы от внутренних кварцевого автогенератора и генератора запускающих импульсов.

*Система питания передатчика* вырабатывает необходимые напряжения для питания всех каскадов и обеспечивает плавную регулировку анодного напряжения до 36 кв при мощности до 180 квт. Система воздушного охлаждения генераторных ламп состоит из двух независимых каналов, всасывающего и нагнетающего. При авариях в электросети для питания

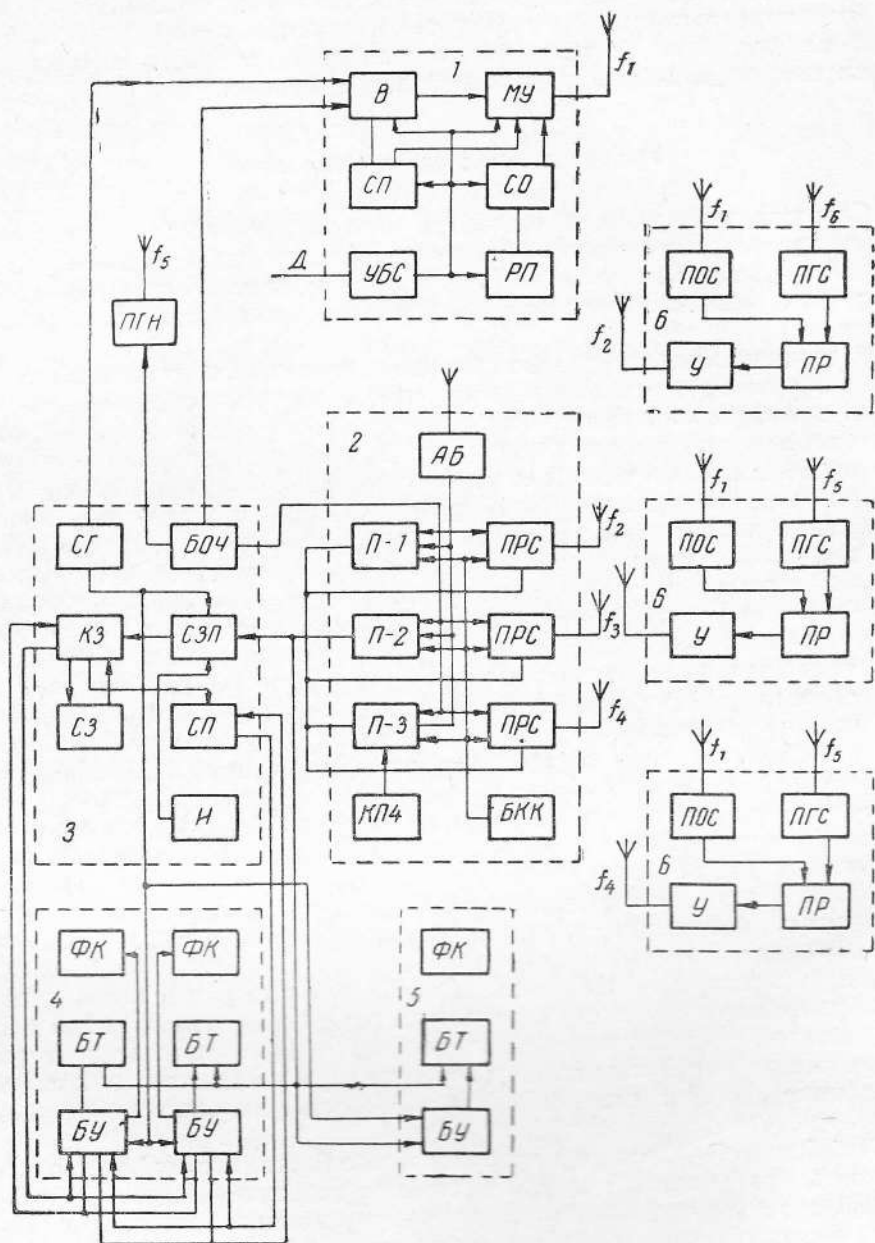


Рис. 1. Функциональная схема комплекса:

1 — передающее устройство; 2 — приемное устройство; 3 — устройство управления и защиты от помех; 4 — по кадровый регистратор; 5 — непрерывный регистратор; б — ретрансляторы; В — возбудитель; МУ — мощный усилитель; СП — система питания; СО — система охлаждения; ЧБС — цепи управления, блокировки и сигнализации; РП — резервное питание; ПГН — передатчик гетеродинного напряжения; АБ — антенный блок; П-1, П-2, П-3 — приемники; ПРС — приемники ретранслированного сигнала; КП4 — контактно-пусковые часы; БКК — блок контроля и калибровки; СГ — синхрогенератор; БОЧ — блок опорных частот; КЗ — коммутатор запуска; СЗП — система защиты от помех; СЗ — схема запрета; СП — схема подвета; И — имитатор; ФК — фотокамера; БТ — блок электронно-лучевых трубок; БУ — блок управления; ПОС — приемник основного сигнала; ПГС — приемник гетеродинного сигнала; ПР — преобразователь частоты; У — усилитель; Д — дистанционное управление.

системы охлаждения используется резервный источник. Передатчиком можно управлять дистанционно из приемно-регистрающего пункта.

*Приемное устройство 2* состоит из шести импульсных радиоприемников супергетеродинного типа. Приемник П-1 имеет амплитудный и фазовый каналы и работает вместе с покадровым регистратором 4. Полоса пропускания приемника 45 кГц. Приемник П-2 имеет три амплитудных канала с антенными коммутаторами и используется при измерениях азимута отражающей точки амплитудным методом. Приемник П-3 с полосой пропускания 35 кГц предназначен для измерения численности метеоров с помощью непрерывного регистратора 5. Усиление приемника может ступенчато меняться по заданной программе с помощью контактно-пусковых часов КПЧ. Приемники ПРС служат для приема ретранслированных сигналов с вынесенных пунктов 6 и отличаются между собой только рабочими частотами.

*Антенный блок АБ* суммирует сигналы от всех вибраторов антенного устройства. Меняя число используемых вибраторов и различным образом фазируя принятые сигналы, можно одновременно получить диаграммы направленности приемной антенны с различными шириной и направлением в горизонтальной плоскости, что используется в амплитудном азимутемере.

*Устройство управления и защиты от помех 3* координирует работу всех устройств комплекса. Синхрогенератор СГ вырабатывает все необходимые импульсные сигналы; задающим элементом является кварцевый автогенератор на частоте 150 кГц. Блок опорных частот БОЧ создает гетеродинное напряжение для всех приемников, опорное напряжение для фазовых детекторов и напряжение возбуждения передатчика. Гетеродинное напряжение для приемников вынесенных пунктов передается с помощью передатчика гетеродинного напряжения ПГН на частоте 160 МГц. БОЧ обеспечивает когерентность и синхронную перестройку в диапазоне 22—23 МГц всего комплекса.

*Система защиты от помех СЗП* состоит из четырех идентичных каналов (по числу приемных пунктов), каждый из которых включает в себя амплитудный и широтный дискриминаторы и логическую схему различения сигналов по периоду и коду. Коммутатор запуска КЗ служит для рассылки отражений, существующих одновременно по различным регистраторам и первоначальной записи сигналов в схему подсвета СП. Последняя формирует импульсы взаимно-однозначного подсвета сигналов, принятых различными пунктами и регистрируемых несколькими индикаторами.

*Схема запрета СЗ* закрывает каналы запуска индикатора на время регистрации, не допускает одновременной регистрации одного и того же метеора в случае длительных или флуктуирующих отражений [6]. В это время возможна регистрация других метеоров, поскольку в схеме запрета так же, как и в схеме подсвета осуществляется стробирование сигналов по дальности. Основные узлы устройства управления и защиты от помех выполнены на феррит-диодных логических элементах.

*Регистрирующее устройство 4* состоит из двух одинаковых покадровых фоторегистраторов, работающих в ждущем режиме. В каждом регистраторе используется три пятилучевых трубки. Импульсами подсвета сигналы высвечиваются только во время прямого хода разверток. Блок управления регистратора БУ вырабатывает напряжения разверток длительностью 0,25 сек; 3 и 0,4 мсек для регистрации амплитудно-временных картин грубой и точной дальности. После окончания развертки автоматически запускается фотокамера и киноплёнка продергивается на один кадр, после чего устройство готово для следующей регистрации.

*Регистрирующее устройство 5* служит для регистрации отражений от метеоров на киноплёнке в виде яркостных кодированных меток и измерения амплитуды сигналов. Развертка дальности имеет в интервале 100—225 км «электронную лупу», поскольку здесь регистрируется наибольшее число отражений. Для получения информации о величине амплитуды отраженные сигналы подаются на вертикально-отклоняющие пластины трубки. Развертка проводится путем непрерывной протяжки киноплёнки со скоростью 8 м/ч. Для индикации амплитуд сигналов используется четыре луча, каждому из которых соответствует определенный интервал дальностей.

*Ретрансляторы 6* состоят из приемника отраженных сигналов ПОС, приемника гетеродинного сигнала ПГС, преобразователя частоты ПР и усилителя мощности У. Максимальная выходная мощность в импульсе 10 вт. Ретранслятор может работать от внутреннего кварцевого гетеродина, если не проводятся когерентные измерения и не требуется оперативного изменения частоты. В этом случае отключается канал передачи на вынесенные пункты гетеродинного напряжения.

### Антенные устройства

В главном пункте используются отдельные передающая и приемная антенны. Помимо увеличения надежности, уменьшения перегрузки приемных устройств зондирующими импульсами и повышения к. п. д. антенно-фидерных устройств это позволит одновременно получить для приемной антенны несколько каналов с различными диаграммами направленности.

Обе антенны однотипны и представляют собой линейку биконических вибраторов с низким волновым сопротивлением, помещенную в угловой отражатель с углом раствора 60°. Применение прогрессивного шага между вибраторами позволяет уменьшить уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Угловой отражатель образуется двумя проволочными сетками, установленными под углами 15° и 75° к горизонту. Ширина каждого полотна рефлектора 27 м, максимальная длина 193 м, высота главных опор 35 м. Антенно-фидерные устройства рассчитаны для работы в диапазоне волн 8—16 м.

Антенны были экспериментально изучены с самолета с помощью малоомощного импульсного передатчика. Координаты самолета определялись с помощью специальной радиолокационной станции сопровождения, передавались с помощью сельсинов в приемный пункт и автоматически регистрировались на киноплёнке вместе с амплитудами сигналов. Экспериментально полученные параметры антенн близки к расчетным. Ширина диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости около 4°30', в вертикальной плоскости 30°. Коэффициенты усиления передающей и приемной антенн 244 и 260 соответственно.

В качестве приемных антенн в вынесенных пунктах применяются двойные горизонтальные ромбы с  $G = 30$ . Для ретрансляции сигналов используются пятиэлементные антенны «волновой канал».

### Контроль чувствительности и калибровка аппаратуры

При интерпретации результатов наблюдений метеоров необходимо знать параметры аппаратуры. Для изучения различных временных зависимостей наиболее важным требованием является постоянство эффективной чувствительности комплекса, которая в основном определяется по

рогом регистрации, усилением приемников и мощностью передатчика. Если невозможно по каким-либо причинам сохранить чувствительность постоянной, необходимо знать ее изменение во времени. Такие параметры аппаратуры как  $\lambda$ ,  $\tau$  и  $F$  измеряются достаточно точно и не подвергаются существенным флуктуациям.

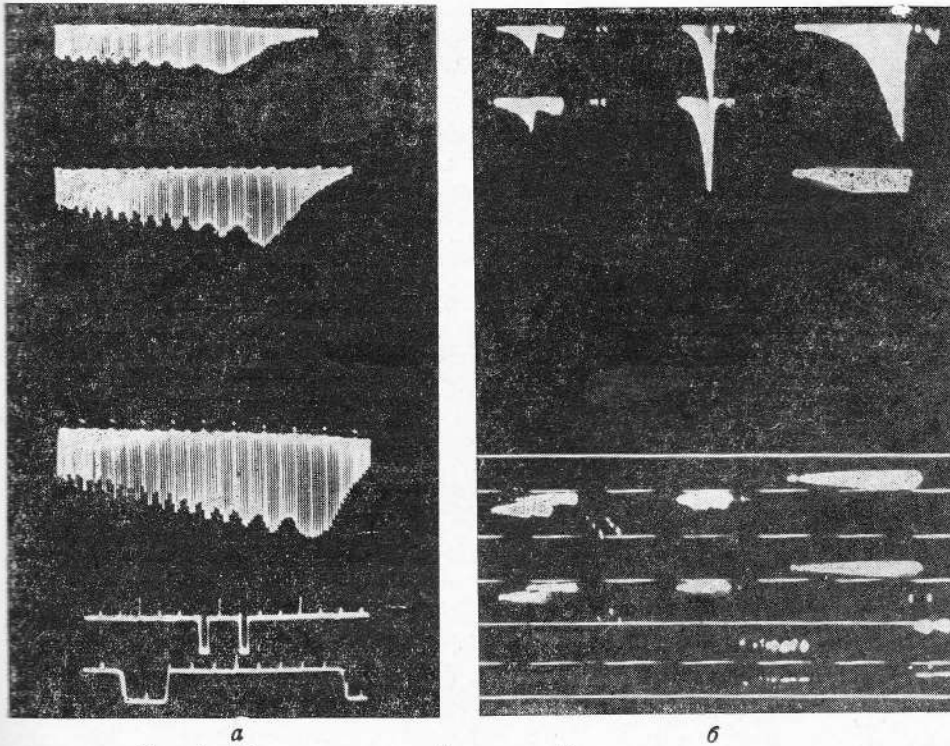
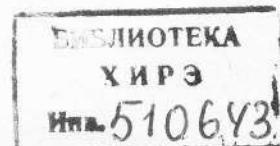


Рис. 2. Образцы регистраций отражений от метеорных следов:  
*a* — покадровая регистрация; *b* — непрерывная регистрация.

Сложным вопросом является измерение большой импульсной мощности на радиочастотах. Имеющиеся в промышленности приборы рассчитаны на сравнительно небольшую среднюю мощность и имеют не соответствующее нашей антенне входное устройство. Поэтому импульсная мощность определялась путем измерения пиковым вольтметром напряжения на нагрузке с помощью трансформатора напряжения. Стабильность выходной мощности дополнительно контролируется по приборам, характеризующим режимы генераторных ламп.

Для определения реальной чувствительности приемно-регистрающей аппаратуры на вход приемников (при подключенной антенне) через аттенюатор с ослаблением 26 дБ при помощи блока контроля и калибровки ББК подаются сигналы, имитирующие метеорное отражение. Сигналы фотографируются в обоих регистраторах. Изменяя амплитуду входных сигналов, можно определить порог регистрации и амплитудную характеристику приемно-регистрающего устройства. В процессе наблюдений такие операции проводятся регулярно.

Для калибровки аппаратуры вынесенных пунктов разработан имитатор, синхронизируемый зондирующими импульсами, что позволяет аналогичным образом фотографировать калибровочные сигналы с вынесенных пунктов. Стабильность усиления всего приемно-ретранслирующего канала



дополнительно контролируется величиной амплитуды ретранслированных зондов при уменьшении мощности передатчика до определенного уровня, а также сравнением сигналов, отраженных от одной точки метеорного следа и принятых в двух пунктах.

Разработанный комплекс успешно эксплуатируется в течение трех лет и позволяет регистрировать отражения от следов с электронной плотностью  $10^{11}$  эл/м. Образцы регистраций показаны на рис. 2. Некоторые результаты исследований, выполненных на этом комплексе, приведены в работах [7, 8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Г. Бондарь, Б. С. Дудник, А. А. Ткачук. Передающее и антенное устройства метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ № 22 (70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
2. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Регистраторы метеорной станции высокой эффективной чувствительности. Вестник ХПИ № 22 (70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
3. Б. Г. Бондарь, В. М. Жебко, В. В. Лизогуб, М. И. Гуртовой. Направленная коротковолновая антенна для исследования метеоров. Вестник ХПИ № 22 (70) «Радиотехника», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
4. Е. И. Фиалко. О влиянии длины волны на эффективность радиолокационного метода исследования метеоров. Труды Сибирского физико-технического института, вып. 37, 1959.
5. Ф. И. Перегудов. Характеристика метеоров как радиолокационной цели. Изд-во Томского ун-та, 1960.
6. Ю. И. Волощук, В. А. Нечитайленко. Методика определения оптимальных параметров АФС метеорных регистраторов. Вестник ХПИ № 36 (84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
7. Б. Л. Кашеев, Ю. И. Волощук, Б. С. Дудник, Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук. Радиолокационные наблюдения численности метеоров в Харькове на шести уровнях регистрации. Вестник ХПИ № 36 (84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.
8. Б. Л. Кашеев, И. А. Делов, Б. С. Дудник, Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук. Измерение радиантов и орбит слабых метеоров. Вестник ХПИ № 36, (84) «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969.

### ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТ МЕТЕОРОВ

*Н. В. Новоселова, А. А. Ткачук*

Радиолокационный комплекс, описанный в работе [1], помимо своего основного назначения — измерения радиантов индивидуальных метеоров — может быть использован для определения высот слабых метеоров. Достигается это благодаря узости диаграмм направленности антенн. Конструкция и основные расчетные параметры антенно-фидерных устройств комплекса описаны в работе [2]. Антенны выполнены в виде линеек вибраторов с переменным шагом, помещенных в угловой отражатель. Для определения эффективной чувствительности аппаратуры необходимо знать коэффициент усиления антенн, а для определения ошибок измерения высот принятым методом — ширину диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование антенн.

#### Измерение диаграммы направленности антенн

Диаграмма направленности антенн является характеристикой, не зависящей от расстояния. Однако это справедливо лишь на больших расстояниях от антенн. Для каждой антенны в зависимости от ее типа,