

УДК 621.396.96

О РАДИОПРОСВЕЧИВАНИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ДИАПАЗОНЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН

С. Д. Елисеев, О. И. Яковлев

Анализируются особенности применения миллиметровых радиоволн для исследования и контроля атмосферы Земли методом радиопросвечивания с использованием двух спутников. Обсуждается поглощение радиоволн в атмосфере на трассе спутник — спутник в зависимости от длины волны и времени года. Проведен анализ ослабления сигнала в линиях поглощения водяного пара, кислорода и в окнах прозрачности миллиметрового диапазона. Показано, что радиопросвечивание миллиметровыми радиоволнами позволяет исследовать распределение с высотой влажности, плотности и облачности.

1. Радиопросвечивание, используемое при изучении атмосфер планет Солнечной системы, может стать эффективным способом исследования и контроля атмосферы Земли. Принцип радиопросвечивания основан на том, что при движении источника и приемника радиоволн лучевая линия проходит на разных высотах и осуществляет вертикальный разрез атмосферы. Зарегистрированные изменения частоты и напряженности поля радиоволны, обусловленные влиянием атмосферы, после обработки позволяют получать зависимости метеопараметров от высоты в различных районах планеты [1]. В работах [2, 3] впервые указано на возможность использования метода радиопросвечивания для исследования атмосферы Земли. Автор этих работ предложил определять высотные профили плотности атмосферы из измерений угла рефракции на искусственном спутнике Земли. В публикациях [4, 5] рассмотрена схема радиопросвечивания с использованием нескольких спутников, расположенных на круговой полярной орбите. Такая система, по мнению авторов, позволяет определять плотность атмосферы на нескольких фиксированных высотах. Предложенная в [4, 5] схема радиопросвечивания обладает недостаточным разрешением по высоте, и для ее реализации требуются высокие точности траекторных измерений. Дальнейшего развития она не получила.

Другая схема радиопросвечивания атмосферы Земли с применением двух спутников предложена и проанализирована в работах [6-9]. Предполагалось, что один из спутников расположен на геостационарной орбите, а другой — на низкой круговой. Найдены ожидаемые эффекты влияния атмосферы на изменение частоты и амплитуды сигнала при радиопросвечивании атмосферы в диапазоне дециметровых и сантиметровых радиоволн. Показано, что для восстановления высотных профилей метеопараметров с требуемой точностью необходимо получить из независимых измерений распределение влажности с высотой. При радиопросвечивании атмосферы с использованием двух спутников происходит и радиопросвечивание ионосферы. Ее влияние при этом проявляется в изменении частоты, что должно сказываться на точности определения атмосферных параметров. Эти эффекты проанализированы в [10].

В [11, 12] рассмотрено влияние горизонтальных градиентов показателя преломления на точность решения обратной задачи радиопросвечивания. Показано, что при определенных условиях можно восстановить горизонтально-неоднородные поля давления и показателя

преломления из данных радиопросвечивания. Результаты первых пробных экспериментов радиопросвечивания атмосферы Земли с помощью двух спутников изложены в [13, 14]. В [13] по данным об изменении частоты определялись давление, температура и плотность на нескольких уровнях в конкретном районе и проводилось их сравнение с метеорологическими измерениями. Проведенный анализ показал хорошее согласие между ними. В [14] исследовалась ионосфера. Эффекты, обусловленные влиянием ионосферы, на примененных частотах были малы, но все же удалось восстановить высотные профили электронной концентрации.

Перспективным является многочастотное радиопросвечивание, позволяющее с необходимой точностью определять высотные профили метеопараметров, влажность атмосферы и электронную концентрацию в ионосфере. Исследование содержания водяного пара, озона и кислорода возможно путем измерения ослабления сигнала при радиопросвечивании вблизи их линий поглощения в миллиметровом диапазоне. В связи с этим актуален анализ возможностей использования миллиметровых волн при радиопросвечивании атмосферы Земли. Цель данной статьи состоит в исследовании особенностей радиопросвечивания атмосферы Земли с применением миллиметровых радиоволн.

2. Считаем, что источник и приемник радиоволн расположены на двух спутниках (рис. 1): один из них является, по предположению, стационарным (точка A), а другой расположен на низкой круговой орбите (точка B). Кривая $AДB$ — лучевая линия в некоторый момент времени, точка D соответствует минимальной высоте луча H над поверхностью Земли, p — прицельное расстояние радиолуча, a — радиус Земли. Проанализируем изменение затухания миллиметровых радиоволн на трассе $AДB$ в зависимости от минимальной высоты лучевой линии.

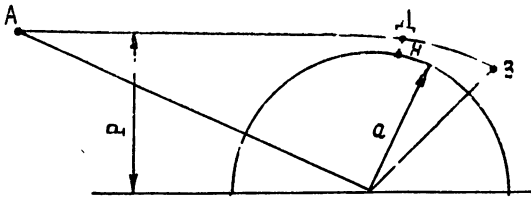


Рис. 1. Схема радиопросвечивания.

Ослабление плотности потока мощности Y в приближении сферически-симметричной атмосферы определяется выражением

$$Y(H, \lambda) = 2 \int_H^{\infty} \frac{\kappa(h, \lambda) n(h) (a+h) dh}{\sqrt{n^2(h) (a+h)^2 - p^2}}, \quad (1)$$

где $\kappa(h, \lambda)$ и $n(h)$ — соответственно коэффициенты поглощения и преломления на высоте h , λ — длина волны зондирующего сигнала, $p = (a+H)n(H)$ [1]. Высотная зависимость индекса преломления $N(h) = (n-1) \cdot 10^6$ была принята экспоненциальной:

$$N(h) = N_0 \exp(-\beta h), \quad (2)$$

где $N_0 = 320$, $\beta = 0,124 \text{ км}^{-1}$ [1].

При радиопросвечивании атмосферы в отсутствие гидromетeоров зондирующий сигнал испытывает ослабление из-за поглощения в газовых составляющих и из-за рефракционного ослабления. Рефракционное ослабление было проанализировано в [7], поэтому здесь не рассматривается. Поглощение миллиметровых волн в чистой атмосфере определяется взаимодействием радиоволн с молекулами H_2O и O_2

и зависит как от длины волны, так и от распределения метеопараметров с высотой [15-17]. Известно, что максимальное ослабление радиоволн достигается вблизи линий поглощения водяного пара и молекулярного кислорода, а минимальное — в окнах прозрачности. Анализ поглощения в задаче радиопросвечивания проведем для длин волн, лежащих в этих участках миллиметрового диапазона.

При вычислении распределения коэффициента поглощения с высотой $\kappa(h)$ были использованы профили метеопараметров, представленные в [18, 19]. Расчеты были выполнены для среднеклиматических условий, характерных для 60° северной широты в июле (температура у поверхности Земли $T = 287$ К, давление $P = 760$ мм рт. ст., влажность $\rho = 11,1$ г/м³) и в январе ($T = 257$ К, $P = 760$ мм. рт. ст., $\rho = 2,1$ г/м³). Высотное распределение водяного пара соответствовало модели «влажной» стратосферы: от поверхности до тропопаузы — монотонное убывание, выше тропопаузы, до $h \sim 30$ км, — медленное возрастание. Температура также падает с высотой вплоть до тропопаузы, а выше нее — растет. Коэффициент поглощения в молекулярном кислороде рассчитывался по квантовомеханической формуле (4) из работы [17], в которой учтена его зависимость от температуры и давления. Используемая при этом форма спектральной линии получена из решения кинетического уравнения. Коэффициент поглощения в парах воды вычислялся по инженерной методике, изложенной в [16]. Результаты расчета по этой методике совпадают с экспериментальными данными при нормальных условиях в атмосфере, а зависимости ослабления от влажности, давления и температуры согласуются с результатами, полученными из квантовомеханических формул.

3. Рассмотрим ослабление сигнала при радиопросвечивании атмосферы Земли вблизи линий водяного пара. Результаты расчета поглощения Y для разных значений минимальной высоты луча H представлены на рис. 2. Кривые 1 и 2 соответствуют поглощению на длине волны $\lambda_1 = 13,5$ мм для метеоусловий января и июля. Кривые 3, 4 даны для длины волны $\lambda_2 = 1,63$ мм соответственно для среднеянварских и среднеиюльских метеоусловий. При вычислении Y учитывалось суммарное поглощение в парах воды и молекулярном кислороде. Соотношение вклада влажности и кислорода в поглощение зависит как от времени года, так и от используемой длины волны. На длине волны $\lambda_2 = 1,63$ мм поглощение в водяном паре и зимой и летом является преобладающим, поэтому поглощением в кислороде без существенной потери точности можно пренебречь. На длине волны $\lambda_1 = 13,5$ мм летом поглощением в кислороде также можно пренебречь, однако в зимнее время года, когда влажность намного меньше, чем летом, вклад кислорода в поглощение становится сравнимым с вкладом водяного пара и его нельзя не учитывать. Анализ поведения кривых $Y(H)$ на рис. 2 показывает, что поглощение на обеих длинах волн существенно больше летом, чем зимой. Это связано с уменьшением влажности в январе и указывает на высокую чувствительность величины Y к содержанию водяного пара в атмосфере. Поглощение на $\lambda_2 = 1,63$ мм значительно больше, чем на $\lambda_1 = 13,5$ мм, что позволяет проводить исследования влажности в более высоких слоях атмосферы. При вычислении коэффициента поглощения $\kappa(h)$ использовалась модель «влажной» стратосферы, которая учитывает увеличение содержания водяного пара выше тропопаузы. Именно этим объясняется немонотонность хода кривых 1 и 2 и наличие у них изгиба. Из рис. 2 следует, что метод радиопросвечивания в миллиметровом диапазоне чувствителен к распределению влажности с высотой. Если принять, что ошибки измерения амплитуды волн не превышают 1 дБ, то из рис. 2 видно, что содержание водяного пара на длине волны $\lambda_1 = 13,5$ мм может определяться до высоты $h \sim 30$ км, а на длине волны $\lambda_2 = 1,63$ мм — до $h \sim 40$ км.

4. Проанализируем ослабление сигнала при радиопросвечивании атмосферы на длинах волн, лежащих вблизи линий поглощения моле-

кулярного кислорода. Молекула O_2 обладает большим числом спектральных линий, лежащих в миллиметровом диапазоне [17]. Одна из них соответствует длине волны 2,5 мм, а остальные сосредоточены в узком спектральном интервале вблизи $\lambda=5$ мм. Вследствие малого разноса резонансных частот, расположенных около 5 мм, отдельные линии у поверхности Земли перекрываются и начинают разрешаться лишь на высотах $h \gtrsim 15$ км.

Относительное содержание молекулярного кислорода практически постоянно вплоть до высот 80—90 км, поэтому знание его распределения с высотой дает возможность получить вертикальный профиль плотности атмосферы. В связи с этим проведем анализ поглощения Y в зависимости от H на волнах $\lambda_3=2,5$ мм и $\lambda_4=4,93$ мм. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Кривые 1, 2 соответствуют поглощению на длине волны $\lambda_3=2,5$ мм для январских и июльских метеоусловий; кривые 3 и 4 — зависимости $Y(H)$ на длине волны $\lambda_4=4,93$ мм для метеоусловий января и июля. В расчетах учитывалось суммарное поглощение в кислороде и в парах воды. Поскольку поглощение в парах воды на этих длинах волн мало по сравнению с поглощением в кислороде, то поведение кривых определяется распределением с высотой температуры и давления (или плотности), которые входят в выражение для коэффициента поглощения в молекулярном кислороде. Профили давления для июля и января практически совпадают, а разность между средними температурами меняется с высотой и принимает минимальное значение в районе тропопаузы. Однако из сравнения кривых, соответствующих одной и той же длине волны, но разным временам года, видно, что величина Y слабо зависит от температуры. В основном Y определяется плотностью поглощающего газа. Это указывает на то, что замена реальных температурных профилей на модельные, характерные для данного географического района и времени года, не приведет к существенному ухудшению точности восстановления профиля плотности. Из рис. 3 видно, что если ошибки измерения интенсивности принимаемого сигнала не превышают 1 дБ, то, практически независимо от времени года, плотность атмосферы можно определять до высоты $h \sim 30$ км при просвечивании на длине волны $\lambda_3=2,5$ мм и до высоты ~ 40 км на длине волны $\lambda_4=4,93$ мм. Измерение ослабления на более сильных линиях вблизи 5 мм даст возможность исследовать профиль плотности на больших высотах.

5. Рассмотрим далее ослабление радиоволн при радиопросвечивании в окнах прозрачности миллиметрового диапазона. Результаты вычислений $Y(H)$ для этого случая представлены на рис. 4. Кривые 1, 2 соответствуют среднеклиматическим условиям января и июля для $\lambda_5=8,6$ мм; кривые 3, 4 — соответственно для января и июля на $\lambda_6=3,3$ мм. Поскольку ослабление на указанных длинах волн обусловлено примерно в равной степени как поглощением в молекулярном кислороде, так и поглощением в парах воды, то представляет интерес сравнить сезонные вариации $Y(H)$. Проведенные расчеты показывают, что, например, при $H=10$ км ослабление Y в окнах прозрачности возрастает от января к июлю примерно на 20%, тогда как в линиях поглощения водяного пара оно изменяется на 45%, а в линиях поглощения молекулярного кислорода всего на 3%. Это указывает на то, что сезонные изменения $Y(H)$ в окнах прозрачности определяются для безоблачной атмосферы главным образом вариациями влажности. Из рис. 4 следует, что ослабление Y на рассматриваемых длинах волн пренебрежимо мало при $H > 15$ км.

6. Миллиметровые и короткие сантиметровые радиоволны испытывают значительное ослабление в облаках. Для анализа аэрозольного поглощения в облаках при радиопросвечивании атмосферы $\Gamma(H)$ были проведены расчеты ослабления сигнала в облаках форм St (слоистые) и As (высокослоистые). Эти облака имеют большую горизонтальную

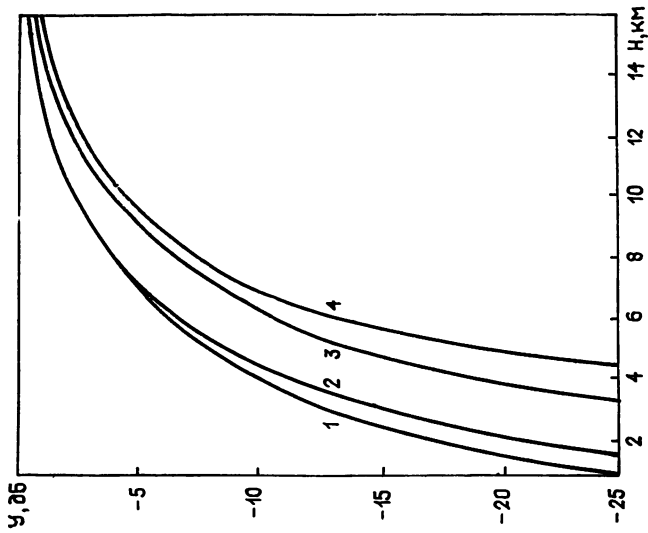


Рис. 4.

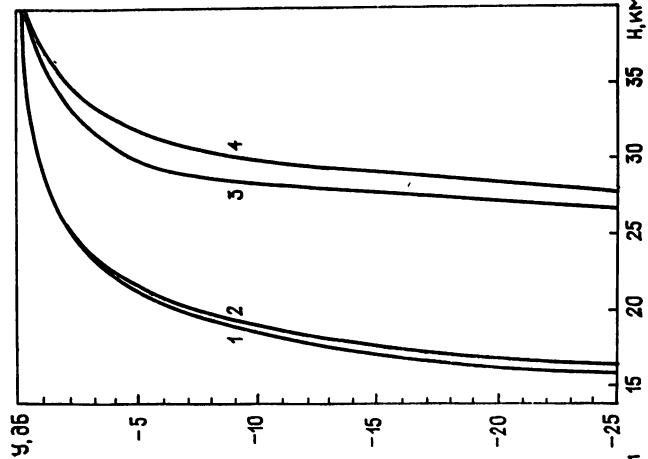
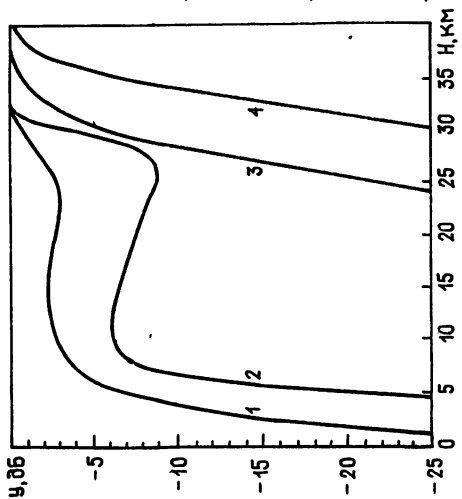
Рис. 2. Ослабление сигнала при радиопросвечивании на длинах волн 13,5 (кривые 1, 2) и 1,63 мм (кривые 3, 4) для среднеклиматических условий января и июля в зависимости от минимальной высоты луча.

Рис. 3. Ослабление сигнала при радиопросвечивании на длинах волн 2,5 (кривые 1, 2) и 4,93 мм (кривые 3, 4) для среднеклиматических условий января и июля в зависимости от минимальной высоты луча.

Рис. 4. Ослабление сигнала при радиопросвечивании на длинах волн 8,6 (кривые 1, 2) и 3,3 мм (кривые 3, 4) для метеусловий января и июля в зависимости от минимальной высоты луча.

Рис. 3.

Рис. 2.



протяженность [20], поэтому в первом приближении их можно рассматривать как сферически-симметричный слой с резкими верхней и нижней границами. Коэффициент поглощения в облаке вычислялся по формуле

$$\gamma = (2,6\pi/\lambda) \operatorname{Im}[(\epsilon_c - 1)/(\epsilon_c + 2)]\omega, \quad (3)$$

где γ в дБ/км, ω — водность облака в г/м³, λ — длина волны в см [21]. Диэлектрическая проницаемость воды ϵ_c определялась по формуле Дебая

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_s - \epsilon_0}{1 + (i\lambda_s/\lambda)} + \epsilon_0, \quad (4)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость воды на частотах $\nu \gg 1/\tau_p$ (оптическая), ϵ_s — диэлектрическая проницаемость воды на частотах $\nu \ll 1/\tau_p$ (статическая), τ_p — время релаксации молекул воды. Величины ϵ_s и λ_s зависят от температуры t , а значение ϵ_0 по данным разных авторов составляет 5,5 или 4,9 (нами было выбрано $\epsilon_0 = 5,5$). Для расчета ϵ_s и λ_s использовались формулы, полученные в [22] на основе анализа результатов измерений, проведенных многими авторами:

$$\epsilon_s = 0,00081t^2 - 0,40885t + 88,2, \quad (5)$$

$$\lambda_s = 1,4662 \exp(-0,0634t) + 0,000136t^2 - 0,027296t + 1,8735116.$$

Были использованы модели облаков As и St из работы [15]. Согласно этим моделям было принято, что нижняя граница высокослоистых облаков расположена на высоте 4 км, их мощность 1 км, водность 0,3 г/м³, нижняя граница слоистых облаков находится на высоте 1,6 км, их мощность 0,3 км, водность 0,33 г/м³. Профиль температуры соответствовал среднеиюльскому для 60° северной широты. Вычисления $\Gamma(H)$ проводились по формуле:

$$\Gamma(H) = \begin{cases} 2 \int_H^{B+\Delta h} \frac{\gamma(a+h)dh}{\sqrt{(a+h)^2 - (a+H)^2}}, & B \leq H < B+\Delta h \\ 2 \int_B^{B+\Delta h} \frac{\gamma(a+h)dh}{\sqrt{(a+h)^2 - (a+H)^2}}, & 0 \leq H \leq B \end{cases}, \quad (6)$$

где B — высота нижней границы, Δh — мощность облака. Результаты представлены на рис. 5, где кривые 1, 2 соответствуют поглощению на длинах волн 3 и 2 см в слоистых облаках (As), кривые 3, 4 — поглощению на тех же длинах волн в высокослоистых облаках (St). Анализ поведения кривых указывает на возможность обнаружения слоистообразных облаков методом радиопросвечивания, так как кривая суммарного ослабления $Y(H) + \Gamma(H)$, где $Y(H)$ — поглощение в парах воды и молекулярном кислороде на рассматриваемых длинах волн, будет иметь локальный минимум. Расчеты аэрозольного поглощения в облаках, выполненные для окон прозрачности миллиметрового диапазона, показали, что ослабление сигнала будет выражено особенно резко. Из рис. 5 видно, что метод радиопросвечивания позволяет разделять вклад облаков разных ярусов, так как облака формы As относятся к облакам среднего яруса, а облака формы St — к облакам нижнего яруса [20]. Возможно также определение этим методом верхней и нижней границ облачности, а проведение синхронных измерений на нескольких длинах волн позволит восстановить другие параметры сплошной облачности (водность, температуру).

7. В заключение сформулируем основные результаты. В данной работе проанализированы возможности радиопросвечивания атмосферы

ры Земли в миллиметровом диапазоне радиоволн с использованием двух спутников. Определены в зависимости от времени года ожидаемые значения поглощения вблизи линий водяного пара (длины волн 13,5 мм и 1,63 мм) и молекулярного кислорода (2,5 мм и 4,93 мм). Показано, что по измерениям ослабления радиоволн в этих диапазонах возможно исследование профилей влажности и плотности воздуха до высот 30—40 км.

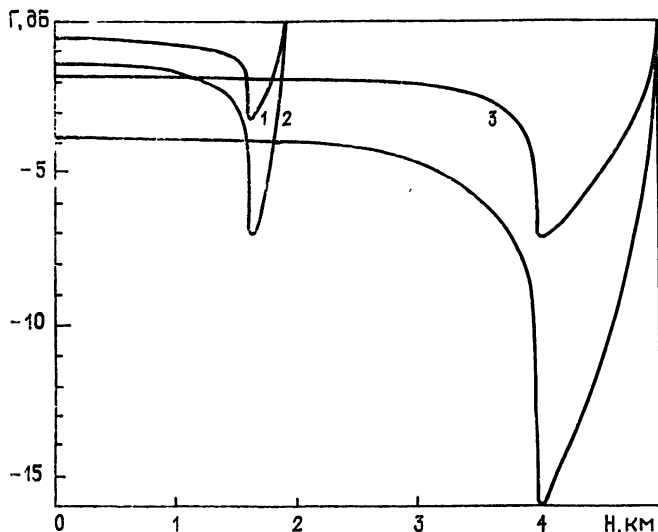


Рис. 5. Аэрозольное ослабление сигнала при радиопросвечивании облаков форм As (кривые 1, 2) и St (кривые 3, 4) на длинах волн 3 и 2 см в зависимости от минимальной высоты луча.

Проанализировано поглощение радиоволн в окнах прозрачности миллиметрового диапазона для длин волн 8,6 и 3,3 мм. Показано, что для безоблачной атмосферы им можно пренебречь, когда минимальная высота луча становится больше 15 км. В нижних слоях атмосферы оно достигает значительных величин, а его изменения обусловлены главным образом вариациями влажности.

Анализ аэрозольного поглощения в слоистых (форма As) и высокослоистых облаках (форма St), проведенный для длин волн 3 и 2 см, указал на возможность исследования облачности методом радиопросвечивания: локализацию верхней и нижней границ, определение ярусности облаков и водности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев О. И. Распространение радиоволн в космосе. — М.: Наука, 1985.
2. Татарский В. И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. № 7. С. 699.
3. Татарский В. И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. № 8. С. 811.
4. Lusignea В. В. In: Space Research — IX. Amsterdam: Pergamon Press, 1969. P. 603.
5. Kluge A. J. In: Space Research — IX. Amsterdam: Pergamon Press, 1969. P. 590.
6. Шутко А. М., Кутуза Б. Г., Яковлев О. И. и др. Итоги науки и техники. Радиотехника. — М.: ВИНТИ, 1978. Т. 16.
7. Калашников И. Э., Яковлев О. И. // Космические исследования. 1978. Т. 16. Вып. 6. С. 943.
8. Калашников И. Э., Яковлев О. И. // Труды V Всесоюзного совещания по радиометеорологии. — М.: Гидрометеоздат, 1981. С. 184.
9. Калашников И. Э., Матюгов С. С., Павельев А. Г. и др. В кн.: Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. — М.: Наука, 1986. С. 208.
10. Калашников И. Э., Матюгов С. С., Яковлев О. И. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 1. С. 56.
11. Гурвич А. С., Соколовский С. В. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 21. № 1. С. 12.

12. Соколовский С. В. // Исследование Земли из космоса. 1986. № 3. С. 13.
13. Rappaswamy S. // Geophys. Res. Lett. 1976. V. 3. № 8. P. 483.
14. Liu A. S. // Radio Sci. 1978. V. 13. № 4. P. 709.
15. Исхаков И. А., Зражевский А. Ю., Аганбекян К. А. и др. В кн.: Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. — М.: Наука, 1986. С. 82.
16. Зражевский А. Ю. // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 5. С. 951.
17. Жевакин С. А., Наумов А. П. // Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. № 6. С. 987.
18. US Standard Atmosphere Supplements. — Washington: US Government Printing Office, 1966.
19. Комаров В. С. // Труды НИИ аэроклиматологии, 1971. Вып. 70.
20. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1978. Т. 2.
21. Кутуза Б. Г. В кн.: Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. — М.: Наука, 1986. С. 180.
22. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. — Л.: Гидрометеониздат, 1972.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
25 марта 1987 г.

ON THE RADIO OCCULTATION OF THE EARTH'S ATMOSPHERE BY MILLIMETER RADIOWAVES

S. D. Eliseev, O. I. Yakovlev

Features of using of millimeter radiowaves during radio occultation of the Earth's atmosphere are analysed. Absorption of radiowaves in the atmosphere between two satellites for different wavelengths and seasons is discussed. The investigation of the height profiles of water vapour, density and also cloud parameters is possible by radio occultation method in the millimeter wave range.
