

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОФИЗИКИ

УДК 538.566

ГЛОБАЛЬНЫЙ БАЛАНС ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ  
КВ-ДИАПАЗОНА В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А. Г. Колесник, С. А. Колесник, П. М. Нагорский

Проведены численные эксперименты на математической модели планетарного распределения плотности потока радиоизлучения от наземных радиостанций КВ-диапазона. Определено соотношение долей энергии, поглощаемой ионосферой, поверхностью Земли и уходящей в космическое пространство, в зависимости от сезона года и мирового времени.

## Введение

Излученная наземными радиостанциями энергия частично уходит в космическое пространство, частично поглощается земной поверхностью и ионосферой. Большая часть мощности мировой сети радиовещательных станций излучается передатчиками, расположенными на Европейском континенте. При этом основная доля излученной энергии поглощается в околоземном пространстве либо высвечивается из него на характерных расстояниях от источника радиоизлучения, сопоставимых с длиной первого скачка от источника [1].

Рассмотрим соотношение долей поглощаемой и высвечивающейся энергии в зависимости от мирового времени ( $UT$ ) и сезона года для средних гелио-геофизических условий. Для этого проведем серию численных экспериментов на модели, предложенной в работах [1, 2]. Общая картина количественных оценок соотношения долей поглощаемой и высвечивающейся энергии в диапазоне частот  $5 \div 25$  МГц приведена на рисунке. Здесь даны как абсолютные ( $P$ ), так и процентные ( $P_{rel} = P/P_{\Sigma}$ , где  $P_{\Sigma}$  — суммарная излученная энергия) значения энергии, ушедшей в космическое пространство и поглощенной ионосферной плазмой и поверхностью Земли.

## 1. Высвечивание энергии из околоземного пространства

На высоких и средних частотах КВ-диапазона основную роль в «утечке» всей излученной энергии в космическое пространство играет состояние ионосферы над Центральной и Восточной Европой, которая формирует вентиляльную границу в ионосфере, отделяющую область отражения от области пропускания электромагнитной энергии. Положение этой границы определяется соотношением

$$f = f_{0F2} / \cos \gamma_0,$$

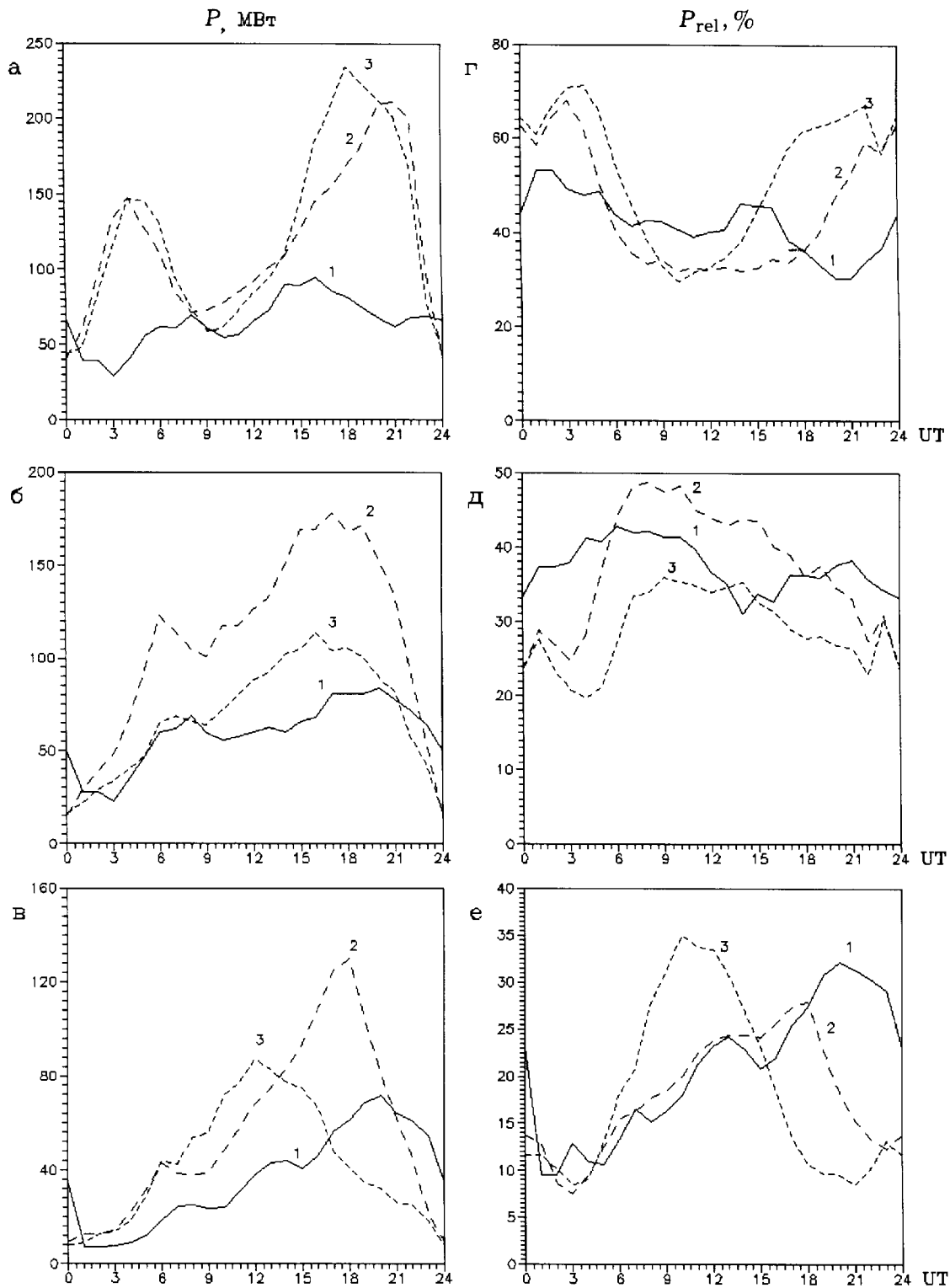
где  $\gamma_0$  — угол падения радиоволн на ионосферную плазму,  $f_{0F2}$  — критическая частота области  $F2$  ионосферной плазмы:

$$f_{0F2} = 9 \cdot 10^{-6} \sqrt{N_{mF2}},$$

$f$  и  $f_{0F2}$  выражаются в мегагерцах, а максимальная электронная концентрация  $N_{mF2}$  в  $F2$ -области — в единицах электрон/м<sup>3</sup>. При смещении вентиляльной границы в область более низких критических частот  $f_{0F2}$  радиоволны земного происхождения получают возможность покинуть околоземное пространство (расширяется область пропускания и сужается область отражения), а при смещении границы в область более высоких  $f_{0F2}$  картина изменяется на обратную. Поэтому суточные вариации энергии, ушедшей в космическое пространство, находятся в противофазе с суточным ходом критических частот  $F2$ -области ионосферы средних широт.

Ярко выраженная периодичность «утечки» энергии выявлена для всех сезонов года (см. рисунок,  $a, z$ ). Минимум ушедшей энергии (35%) в декабре наблюдается с 9.00 до 13.00  $UT$  (60 МВт), в период равноденствия — с 6.00 до 18.00  $UT$  (70 МВт), в июне — с 17.00 до 23.00  $UT$  (50 МВт). Связь этого минимума с мировым временем объясняется тем, что максимальные значения критических частот  $f_{0F2}$ , приводящие к максимальному смещению положения вентиляльной границы над Европейским континентом, наблюдаются зимой с 12.00 до 14.00 часов местного времени ( $LT$ ), а летом — в вечерние часы (с 18.00 до 20.00  $LT$ ). Наибольшая амплитуда полусуточной волны этих вариаций (35 ÷ 70%) зарегистрирована в зимнее время года (60 ÷ 230 МВт) и в период равноденствия (70 ÷ 210 МВт), наименьшая (30 ÷ 50%) — во время летнего солнцестояния (30 ÷ 80 МВт). Зимой имеет место эффект «суперпозиции» суточных вариаций концентрации электронов в области  $F2$  ионосферы и неравномерного распределения радиоизлучающих средств на земной поверхности с суточными вариациями излучаемой мощности и ее распределением по частотному диапазону.

Основные каналы «утечки» энергии радиоволн из околоземного пространства расположены в высоких широтах обоих полушарий и вблизи утреннего терминатора. Эти же каналы являются основными для поступающего космического КВ-радиоизлучения в область «Земля — ионосфера».



Суточные распределения абсолютных ( $P$ ) и относительных ( $P_{rel}$ ) значений долей энергии в диапазоне частот  $5 \div 25$  МГц, ушедшей в космическое пространство (*а, г*), поглощенной ионосферной плазмой (*б, д*) и земной поверхностью (*в, е*), в периоды июньского (*1*) и декабрьского (*3*) солнцестояний и осеннего равноденствия (*2*)

## 2. Поглощение энергии ионосферной плазмой

Рассмотрим закономерности вариаций той доли энергии, которая поглощается ионосферой. Как из-

вестно, поглощение радиоволн в основном определяется высотным распределением электронной концентрации в нижней части ионосферной плазмы.

В зимнее время года и в период равноденствия на средних широтах  $D$ -область ионосферы формируется только в дневные часы, летом она существует практически в любое время суток [3]. Поэтому вариации в суточном ходе энергии, поглощенной в ионосфере, наиболее ярко выражены зимой и в период равноденствия, а летом они практически постоянны. Наибольшая доля в суточной вариации связана с радиоволнами нижней части КВ-диапазона ( $5 \div 10$  МГц). Проведенные расчеты (рисунок, б, д) позволили выявить в суточном ходе абсолютных значений поглощенной энергии два максимума (полусуточная гармоника):

1) зима — 6.00 UT (60 МВт), равноденствие — 7.00 UT (130 МВт), лето — 8.00 UT (60 МВт);

2) зима — 16.00 UT (180 МВт), равноденствие — 17.00 UT (180 МВт), лето — 21.00 UT (80 МВт).

Существование первого максимума обусловлено двумя процессами: началом формирования в освещенной ионосфере области  $D$ , которая и вносит основной вклад в ионосферное поглощение радиоволн, и одновременным уменьшением в освещенное время суток доли электромагнитной энергии, поступающей в низкочастотную часть КВ-диапазона. Второй максимум связан с основным максимумом в суточном цикле величины суммарной мощности, излученной радиовещательными станциями.

### 3. Доля энергии, поглощаемая Землей

В суточном ходе энергии, поглощенной поверхностью Земли, имеется ярко выраженный минимум, наблюдаемый в ночные часы по мировому времени (рисунок, в, е). Максимум поглощенной энергии приходится летом на 20.00 UT, зимой — на 10.00 UT и в период равноденствия — на 18.00 UT. Такое распределение поглощенной энергии связано с двумя основными факторами.

Первый фактор состоит в следующем. Количество поглощенной энергии определяется величиной падающего потока радиоизлучения на поверхность Земли. Вместе с тем от ионосферы отражается (и попадает на земную поверхность) только часть излученной электромагнитной энергии. Для дневного сектора имеют место: поглощение радиоволн на восходящей части траектории в  $E$ ,  $D$ -слоях, отражение от ионосферы (при этом часть энергии высвечивается в космическое пространство), поглощение радиоволн на нисходящей части траектории в  $E$ ,  $D$ -слоях и, наконец, поглощение части энергии земной поверхностью при отражении от нее падающего пучка радиоволн. Далее процесс повторяется на следующем скачке. В ночных условиях исчезает поглощение в  $D$  и  $E$ -областях ионосферы, и основным фактором, уменьшающим уровень отраженного от ионосферы сигнала, становится "утечка" части электромагнитной энергии в космическое пространство и поглощение части энергии земной поверхностью при отражении от нее падающего пучка радиоволн. На следую-

щем скачке процесс повторяется. В силу указанных обстоятельств доля поглощаемой энергии падающего на поверхность Земли потока зависит как от величины излученной энергии, так и от энергии, поглощенной ионосферной плазмой и ушедшей в космическое пространство.

Второй фактор (менее значимый, чем первый), связан с физическими свойствами земной поверхности. Коэффициент поглощения  $\chi$  определяется дисперсионными свойствами земной поверхности ( $\epsilon$ ,  $\sigma$ ) и углом падения радиоволн  $\gamma$  на нее [4]:

$$\chi_0(\theta, \varphi) = \ln R(\theta, \varphi), \quad (1)$$

$$R(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos \gamma - \sqrt{n_0^2(\theta, \varphi) - \sin^2 \gamma}}{\cos \gamma + \sqrt{n_0^2(\theta, \varphi) - \sin^2 \gamma}} \right|, \quad (2)$$

$$n^2(\theta, \varphi) = \frac{\epsilon(\theta, \varphi)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\epsilon(\theta, \varphi)}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(\theta, \varphi)}{f}\right)^2}. \quad (3)$$

Здесь  $R(\theta, \varphi)$  — коэффициент отражения радиоволн от земной поверхности,  $n(\theta, \varphi)$  — показатель преломления,  $\theta$ ,  $\varphi$  — широта и долгота. Поскольку диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и проводимость  $\sigma$  в течение года претерпевают значительные изменения (в зависимости от показателя преломления  $n$ , влажности почвы, снежного покрытия и т. п.), то они также вносят соответствующий вклад в вариации количества энергии, поглощенной поверхностью Земли.

### Заключение

1. Количественные оценки суммарных потерь электромагнитной энергии в околоземном пространстве позволили установить, что в среднем в течение суток земной поверхностью поглощается  $\sim 20\%$ , ионосферой  $\sim 30\%$  и "покидает" околоземное пространство  $\sim 50\%$  всей энергии, излученной мировой сетью радиовещательных станций.

2. Показано, что важнейшими каналами обмена электромагнитной энергии, создаваемой источниками земного и космического происхождения, являются каналы, расположенные в области высоких широт и восточного терминатора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-64907) и программы «Университеты России» («Геокосмос»).

### Литература

1. Колесник А.Г., Колесник С.А., Нагорский П.М. // Изв. вузов, Физика. 1996. № 10. С. 16.
2. Колесник А.Г., Колесник С.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. № 6. С. 59.
3. Бронелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М., 1988.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М., 1973.