

УДК 550.510.35

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН НА ТРАНСПОЛЯРНЫХ ТРАССАХ ВО ВРЕМЯ АВРОРАЛЬНЫХ СУББУРЬ

Н. Ф. Благовещенская, В. А. Бубнов

Представлены результаты исследования особенностей дальнего распространения декаметровых волн на трансполярных трассах в различные фазы авроральной суббури в ночные часы зимнего периода. Обнаружены устойчивые закономерности в вариациях интенсивностей КВ сигналов в течение суббури.

Наиболее сложные и крупномасштабные изменения в магнитосфере и ионосфере Земли наблюдаются во время суббури. Естественно, что значительные изменения состояния ионосферы в течение суббури должны повлиять на условия распространения декаметровых радиоволн, особенно на высокоширотных трассах. В [1-4] представлены закономерности изменения характеристик КВ сигналов на высокоширотных трассах протяженностью до 2 тыс. км в различные фазы авроральной суббури. Целью настоящей работы является изучение особенностей распространения декаметровых радиоволн на нескольких высокоширотных трассах, имеющих длину 7—9 тыс. км, во время авроральных суббурь.

Экспериментальные наблюдения проводились в зимний период 1976—1978 гг. с 21 до 02 часов МДВ. В месте приема осуществлялась непрерывная регистрация амплитуд КВ сигналов от радиомаяков. Радиолиния № 1 имела протяженность $D_1 \approx 7200$ км. Работа велась на частоте $f = 15$ МГц. На радиотрассе № 2 длиной $D_2 = 8800$ км использовались рабочие частоты $f = 13$ и 17 МГц. Трасса № 3 имела протяженность $D_3 = 7600$ км, рабочая частота $f \approx 17$ МГц. Рассматриваемые радиолинии относятся к категориям трансполярных. Они проходят через полярную шапку с двукратным пересечением авроральных зон (на дневной и ночной стороне). Пункты передачи и пункт приема сигналов находились в средних широтах. Расстояние от места приема сигналов до зоны авроральной активности составляло 600—800 км.

Для интерпретации экспериментальных результатов, полученных на радиотрассах, привлекались данные магнитно-ионосферного комплекса, расположенного на ночной стороне в авроральной зоне. Использовались данные регистрации H -компоненты магнитного поля, данные вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) и тригонометрические данные по поглощению на частоте 32 МГц. Рассматривалось поведение средних уровней КВ сигналов на трансполярных трассах № 1, 2 и 3, начиная за 1—2 часа до момента резкого уменьшения H -составляющей магнитного поля Земли (этот момент времени принят за $T = 0$), в самой бухте и спустя 1—2 часа после ее окончания. Уровни сигналов усреднялись на двухминутных интервалах, исходя из времени стационарности случайного процесса.

Детальное рассмотрение вариаций уровней КВ сигналов на трансполярных трассах совместно с данными магнитно-ионосферного комплекса во время конкретных авроральных суббурь (26 суббурь в ноч-

ном секторе зимнего периода) позволяет выявить общие закономерности в распространении декаметровых волн на различных фазах суббури.

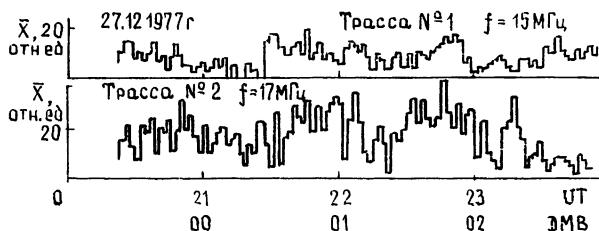


Рис. 1.

На рис. 1 для сравнения результатов показаны вариации уровней КВ сигналов \bar{X} на трансполярных трассах в магнитоспокойные ночные часы. Наиболее типичные вариации уровней КВ сигналов \bar{X} на радиотрассах № 1, 2 и 3 во время бухтообразных возмущений H -компоненты

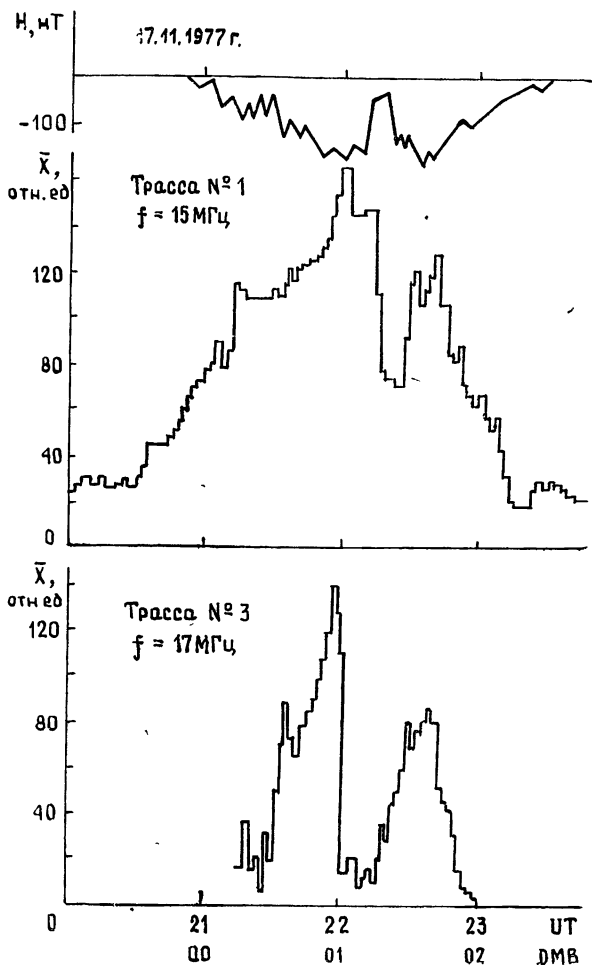


Рис. 2.

магнитного поля различных типов представлены на рис. 2—5. В верхней части рис. 2—5 приведены изменения H -составляющей магнитного поля, в нижней — вариации средних уровней \bar{X} в относительных единицах.

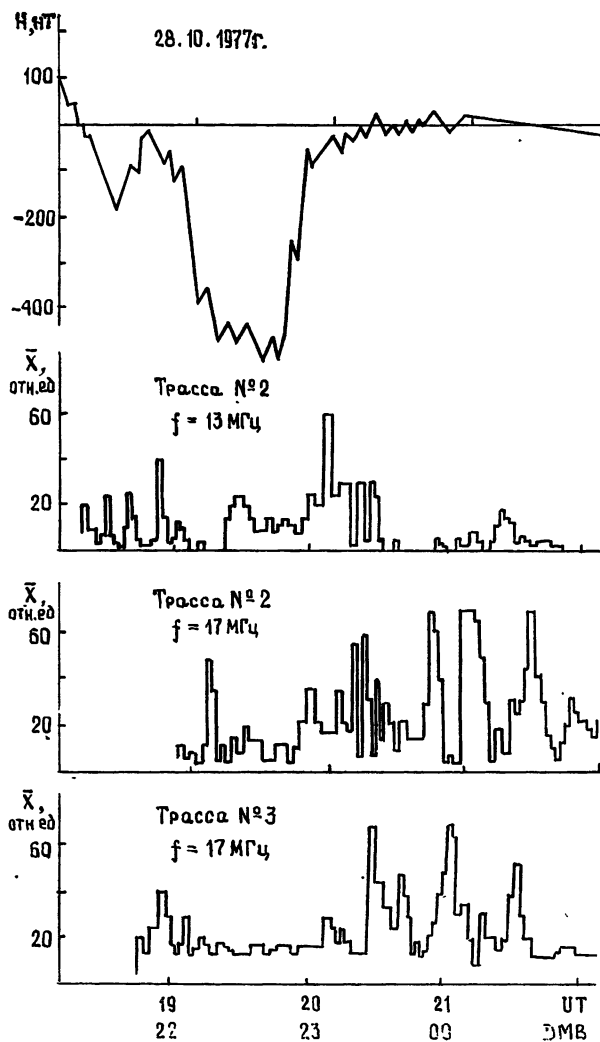


Рис. 3.

Проведенные расчеты глобальных профилей ионосферы и траекторий распространения радиоволн показали [5], что в рассматриваемых условиях на трансполярных радиопутьях реализуются волноводные траектории. При распространении на трансполярных трассах протяженностью 7—9 тыс. км с дневной стороны на ночную (на рабочих частотах, в 1,3—2,1 раза превышающих МПЧ F_2 для скачкового механизма распространения радиоволн) захват волн в ИВК происходит в сумеречной зоне, где имеются регулярные отрицательные градиенты критической частоты F_2 слоя $\partial f_0/\partial \theta$, равные 0,1—0,2 МГц/град, и положительные градиенты высоты максимума F_2 слоя $\partial h_m/\partial \theta$, равные 2,5—8 км/град. Условия вывода волн из ИВК на трансполярных трассах за счет регулярных горизонтальных градиентов концентрации отсутствуют [5]. Тем не менее прием КВ сигналов на данных радиопутьях

ях свидетельствует о возможности вывода радиоволн из ИВК вследствие специфической структуры высокоширотной ионосферы и ее динамики в зависимости от фазы суббури.

Сформулируем основные закономерности между изменениями уровней КВ сигналов на трансполярных трассах и вариациями ионосферных параметров и H -компоненты магнитного поля Земли (вблизи места вывода волн из ИВК) в различные фазы авроральной суббури.

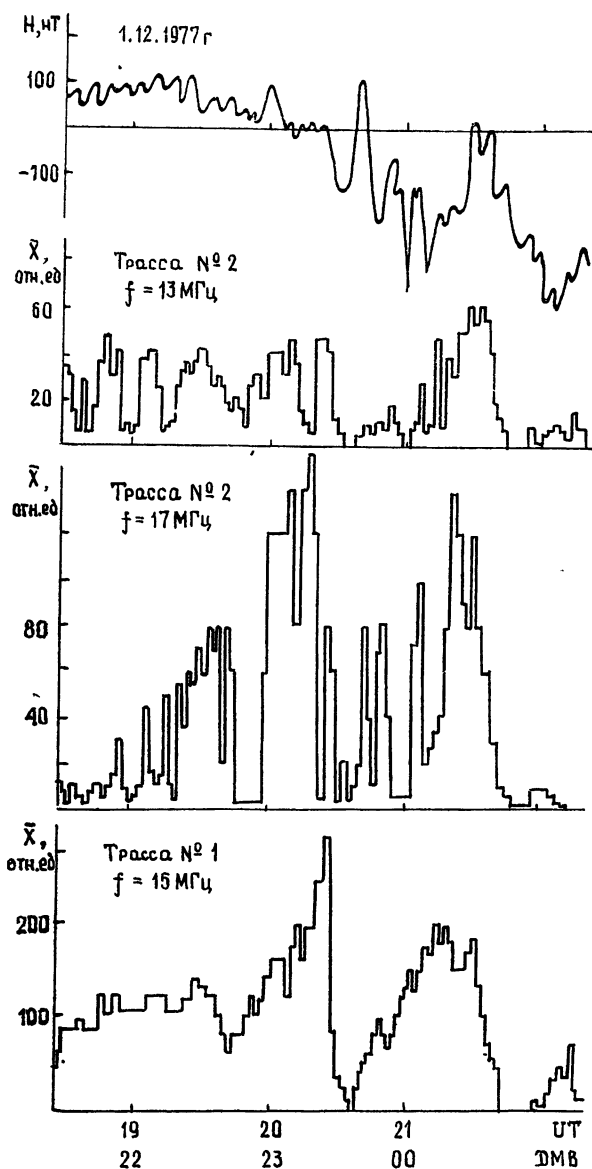


Рис. 4.

В предварительную фазу авроральной суббури на трансполярных трассах отмечается повышение уровней КВ сигналов. Если суббурия на ночной стороне аврорального овала развивается на фоне спокойного магнитного поля, то в предварительную фазу примерно за 1,0—1,5 часа до момента резкого уменьшения H -составляющей магнитного поля ($T = 0$) наблюдается аномальная ионизация в F -области ($F2S$) либо

аномальная ионизация $F2S$ и плоские спорадические слои E_s (тип f). Критические частоты слоев $f_0 \approx 2,0-3,0$ МГц. При наличии в F -области аномальной ионизации вывод волн из ИВК происходит за счет однократного или многократного рассеяния на мелкомасштабных интенсивных неоднородностях. Причем, как показано в [6, 7], в диапазоне частот 10—20 МГц происходит однократное рассеяние, если вблизи оси волнового канала расположены неоднородности с размерами $l \approx \approx 50-100$ м. Неоднородности более крупного размера с $l \geq 0,5-1,0$ км при относительных флуктуациях электронной концентрации $\Delta N/N \approx \approx 5 \cdot (10^{-2} - 10^{-1})$ вызывают многократное рассеяние радиоволн [6, 7].

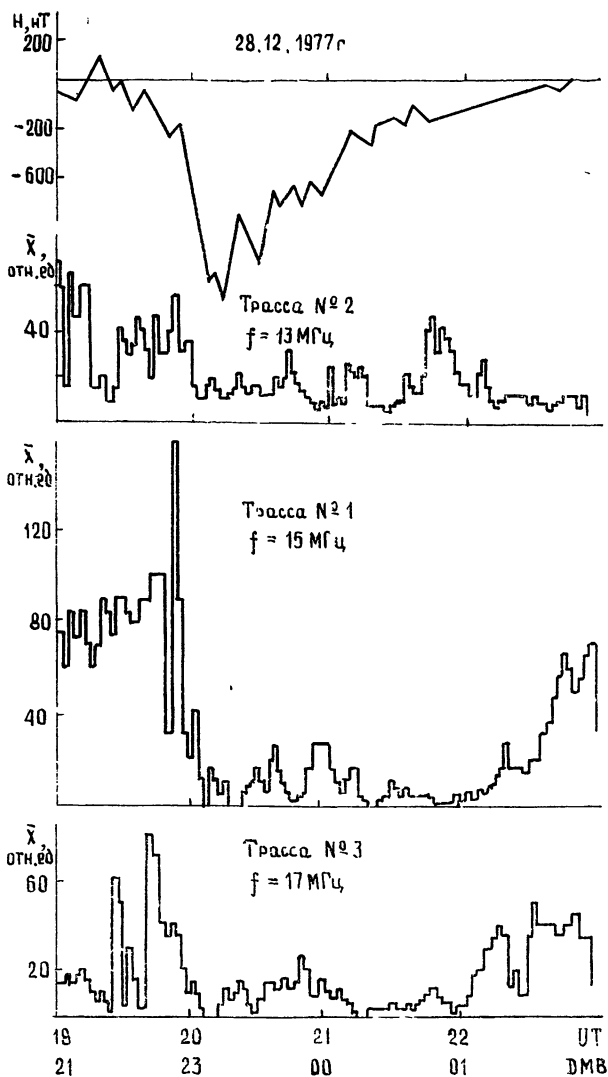


Рис. 5.

Если по данным вертикального зондирования ионосферы регистрируются слои $F2S$ и E_s , то наиболее вероятным механизмом вывода волн из ИВК является рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях двух слоев — $F2S$ и E_s . По мере приближения к моменту $T = 0$ появляются спорадические слои E_s с групповым запаздыванием (тип r), а их

критические частоты возрастают. В предварительную фазу суббурь, развивающихся на фоне возмущенного магнитного поля, по данным ВЗ ионосферы регистрируются только плотные слои E_s типа r , критические частоты которых повышаются по мере приближения к моменту $T = 0$.

В активную фазу суббурь небольшой и средней интенсивности ($\delta H_{\max} \approx 300 \text{ нТ}$) наблюдаются экранирующие слои E_s типа r с высокими критическими частотами ($f_0 E_{sr} \approx 4,5\text{--}6,0 \text{ МГц}$). Величина $f_0 E_{sr}$ строго коррелирует с амплитудой отрицательных отклонений H -компоненты. Уровни КВ сигналов на трансполярных трассах в рассматриваемых условиях достигают максимальных значений. Причем вариации уровней сигналов происходят в фазе с изменениями как H -составляющей магнитного поля, так и величины $f_0 E_{sr}$. Наличие плотных локализованных спорадических слоев E_s типа r с горизонтальными размерами $l \approx 100\text{--}300 \text{ км}$ и высокими критическими частотами $f_0 E_{sr} \approx 4,0\text{--}6,0 \text{ МГц}$ делает возможным вывод волн из ИВК за счет рефракции на крупномасштабных E_s -образованиях. Причем, чем выше критические частоты E_s типа r в месте вывода волн из ИВК, тем больше уровни КВ сигналов на трансполярных трассах. Для интенсивных суббурь с максимальным отклонением H -компоненты $\delta H_{\max} > 300\text{--}400 \text{ нТ}$ и риометрическим поглощением $A_{\max} > 2,0\text{--}2,5 \text{ дБ}$ (на частоте 32 МГц) в активную фазу характерно не возрастание, а уменьшение интенсивности сигналов на трансполярных трассах по сравнению с их значениями в предварительную фазу. Такое поведение уровней КВ сигналов обусловлено как значительным авроральным поглощением, так и изменением структуры E_s -слоев. В этот период времени, если нет «блэкаутов» по данным ВЗ, в основном, наблюдаются диффузные спорадические слои E_s типа a . Тем не менее следует отметить достаточно устойчивое прохождение КВ сигналов на трансполярных трассах большой протяженности в периоды сильного аврорального поглощения, в то время как на высокоширотных трассах протяженностью $D \leq \leq 4000 \text{ км}$ в этих условиях регистрируется полное поглощение КВ сигналов. По данным [8] существенные нарушения прохождения КВ сигналов при скачковом механизме распространения радиоволн в ночные часы на радиолиниях длиной $D \leq 4000 \text{ км}$ происходят уже при риометрическом поглощении $A \approx 1 \text{ дБ}$. Интенсивные мелкомасштабные неоднородности с размерами $l \approx 30\text{--}50 \text{ м}$, которые формируют диффузные спорадические образования E_s типа a , вероятно, могут способствовать выводу волн из ИВК вследствие рассеяния.

В фазу восстановления суббури наблюдаются спорадические слои E_s типа r , критические частоты которых плавно уменьшаются по мере удаления от начала отрицательной бухты H -компоненты магнитного поля. Если суббури происходят цепочками, быстро следуя одна за другой, то уменьшение критических частот $f_0 E_{sr}$ сменяется их возрастанием в связи с развитием следующей суббури. После изолированных суббурь по мере удаления от окончания бухты вместе с E_{sr} регистрируется слой $F2S$. Критические частоты $f_0 E_{sr}$ и $f_0 F2S$ составляют примерно $2,5\text{--}4,0 \text{ МГц}$ и постепенно уменьшаются после окончания бухты. В фазу восстановления суббурь небольшой и средней интенсивности на трансполярных трассах отмечается понижение уровней КВ сигналов, которое происходит одновременно с уменьшением отклонения H -компоненты и критических частот $f_0 E_{sr}$. Фаза восстановления интенсивных суббурь характеризуется возрастанием уровней сигналов на рассматриваемых радиолиниях. С одной стороны, это вызвано уменьшением поглощения, а с другой — появлением плотных E_s -слоев типа r с достаточно высокими критическими частотами.

Таким образом, вариации характеристик на трансполярных трассах во время авроральных суббурь зависят от времени начала, интенсивности и формы бухты H -составляющей магнитного поля Земли,

а также состояния ионосферы до начала возмущения. Отчетливая взаимосвязь между изменениями уровней КВ сигналов и вариациями H -составляющей магнитного поля и ионосферных параметров вблизи места вывода волн из ИВК свидетельствует о следующем. При волноводном распространении декаметровых волн на трансполярных трассах с дневной стороны на ночную динамика характеристик КВ сигналов определяется условиями вывода радиоволн из ИВК. Проведенные экспериментальные исследования и их анализ позволяют сделать заключение, что имеют место устойчивые закономерности в вариациях интенсивностей КВ сигналов на трансполярных трассах большой протяженности во время авроральных суббурь, которые в известной степени позволяют прогнозировать условия дальнего распространения декаметровых волн в высоких широтах в возмущенные периоды.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Благовещенский Д В, Благовещенская Н Ф, Курченко Ю. А. — Геомагнетизм и аэрономия, 1977, 17, № 3, с. 534.
- 2 Перцовский Р. А., Ткаченко Б. В. — В сб.: Распространение радиоволн в полярной ионосфере. — Апатиты: Полярный геофизический институт, 1977, с. 70.
- 3 Благовещенская Н. Ф. — Геомагнетизм и аэрономия, 1979, 19, № 2, с. 274.
- 4 Благовещенский Д В, Благовещенская Н. Ф., Курченко Ю. А., Пирог О М. — Изв вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 1, с. 12
- 5 Бубнов В А., Герасимова Ж. И., Киселев Ю. В., Куприянов С. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1851
- 6 Ерухимов Л М., Матюгин С. М., Урядов В. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 9, с. 1297.
- 7 Гуревич А. В., Ерухимов Л. М., Ким В. Ю., Урядов В. П., Цедилина Е. Е. — Изв вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 9, с. 1305.

Поступила в редакцию
23 января 1981 г.

INVESTIGATION OF DECAMETER RADIO WAVE PROPAGATION AT TRANSPOLAR TRACES DURING AURORAL SUBSTORMS

N. F. Blagoveshchenskaya, V. A. Bubnov

Results are given on investigation of peculiarities of far distant propagation of decameter waves at transpolar traces in different phases of auroral substorms at night hours of the winter period. Stable regularities are detector in intensity variations of HF signals during substorm
