

УДК 621.371.332.4

## ОБ АНИЗОТРОПНОМ РАССЕЯНИИ РАДИОВОЛН КВ ДИАПАЗОНА В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ СРЕДНИХ ШИРОТ

А. М. Насыров, Ю. М. Стенин, Г. М. Тептин

Экспериментально исследованы частоты замираний, автокорреляционные характеристики, суточные и сезонные вариации, угловое распределение сигналов, распространяющихся боковым путем на трассе Москва — Казань на частоте 25 МГц. По синхронным измерениям на трассах Москва — Казань и Архангельск — Казань выделены сигнал типа  $E_H$ , рассеянный на магнитно-ориентированных, и  $E_\Phi$  — рассеянный на изотропных неоднородностях. Показано хорошее согласие экспериментальных характеристик сигнала  $E_\Phi$  с расчетными данными, полученными в рамках модели рассеяния радиоволн на турбулентных неоднородностях с учетом влияния магнитного поля Земли на спектр флуктуаций электронной плотности.

Известно, что при определенных ориентациях радиолиний относительно магнитного меридиана рассеяние радиоволн может осуществляться на магнитно-ориентированных неоднородностях области  $E$  ионосферы [1–3]. В опубликованных ранее работах исследованы некоторые характеристики этого вида рассеяния в УКВ диапазоне [1, 3]. В настоящей статье приводятся результаты измерения характеристик  $E_H^*$  рассеяния в КВ диапазоне на частоте, превышающей МПЧ, полученные в 1972—1976 гг. на среднеширотной трассе Москва — Казань (МК), которые сравниваются с теоретическими, рассчитанными с учетом анизотропии неоднородностей в геомагнитном поле, образующихся за счет механизма турбулентного перемешивания. Для выделения ракурсно-рассеянных сигналов на линии МК передающая и приемная антенны были развернуты к северу от дуги большого круга в направлении области зеркального рассеяния относительно вектора геомагнитного поля. Однако при этом рассеяние могло происходить не только на магнитно-ориентированных, но и изотропных неоднородностях в нижней ионосфере. Для выделения ракурсно-рассеянных сигналов параллельно проводились измерения на трассе прямого рассеяния Архангельск — Казань (АК) на частоте, близкой к использованной на МК. Центр трассы АК совпадал с областью ракурсного рассеяния линии МК. На рис. 1 в проекции на горизонтальную плоскость показаны расположение опытных радиолиний, ориентация приемной и передающих антенн и области

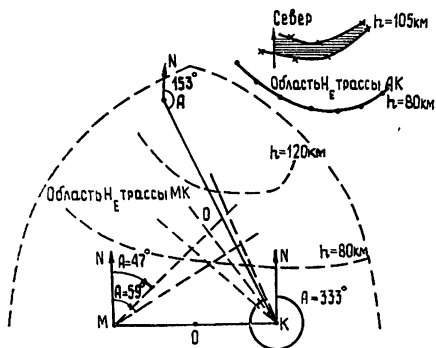


Рис. 1.

\* В литературе принято обозначать рассеяние на магнитно-ориентированных неоднородностях  $H_E$ . В настоящей статье использовано обозначение  $E_H$  для того, чтобы не вносить путаницу в терминологию при сравнении с фоновым сигналом  $E_\Phi$ .

ракурсного рассеяния обеих радиолиний. На трассе АК антенны ориентировались по дуге большого круга, на МК — под азимутами 31 и 56° к северу от линии трассы. На передающем конце линии МК использовалась двойная ромбическая антенна, на линии АК — трехэлементный волновой канал. Рабочие частоты находились в диапазоне 24—25 МГц. Прием рассеянных сигналов в Казани на обеих радиолиниях осуществлялся на одну и ту же фазированную активную решетку, состоящую из шести трехэлементных волновых каналов с двумя независимо управляемыми в горизонтальной плоскости лепестками с диапазоном сканирования  $\pm 15^\circ$  относительно азимута 323° [2]. Направление прихода радиоволн на линии МК в азимутальной плоскости измерялось двухканальным автоматическим цифровым пеленгатором, связанным с ЭВМ. Однозначный отсчет пеленга обеспечивался в секторе  $\pm 90^\circ$  относительно азимута 323°. Использование пеленгатора позволило исключить из обработки сигналы, распространяющиеся по дуге большого круга на линии МК.

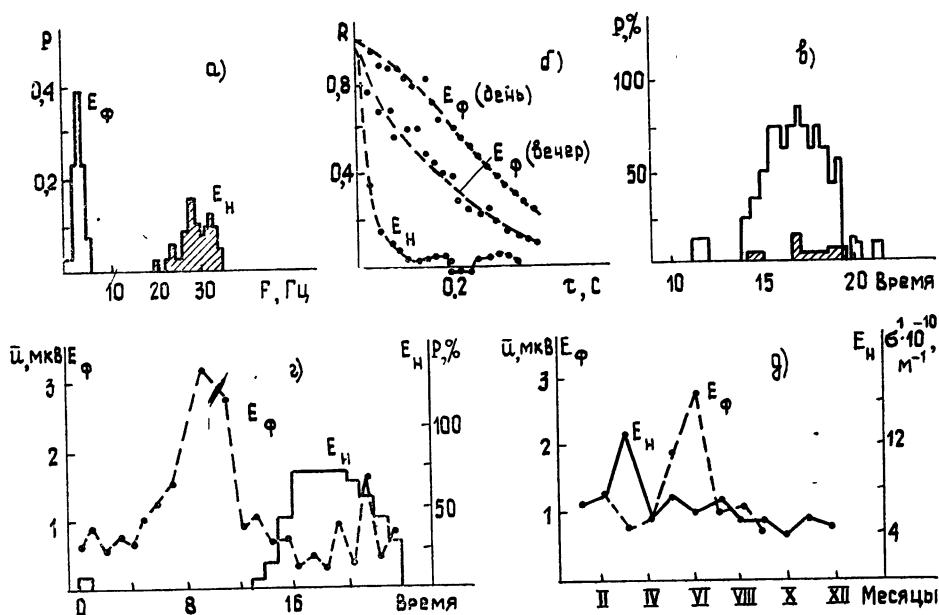


Рис. 2.

По статистическим характеристикам сигнал, приходящий в точку приема на линии МК боковым путем, оказалось возможным разделить на два типа: фоновый —  $E_\phi$  и «авроральный» —  $E_N$ . Такая классификация проводилась и ранее [2, 3]. В [3] эти типы сигналов названы фоновым и квазинепрерывным и предполагалось, что за оба типа рассеяния ответственны анизотропные неоднородности в области  $E$ , ориентированные вдоль вектора геомагнитного поля. Ниже, путем сравнения данных, полученных на линиях МК и АК и расчетных характеристик будет показано, что анизотропным характером рассеяния обладает лишь сигнал типа  $E_N$ . Полученные экспериментально на линии МК характеристики сигналов  $E_\phi$  и  $E_N$  приведены на рис. 2. На рис. 2а представлены распределения частот замираний. Заштрихованная гистограмма относится к сигналам типа  $E_N$ . Наиболее вероятная частота замираний для  $E_\phi$  равна 3 Гц, для  $E_N$  — 30 Гц. Так же резко отличаются и автокорреляционные характеристики  $R(\tau)$  огибающих обоих типов сигналов. На рис. 2б приведены результаты измерения  $R(\tau)$ : для  $E_N$  интервал корреляции на уровне  $R(\tau) = 0,5$  в среднем равен  $\tau_k = 0,015$  с, для  $E_\phi$  —

$\tau_k = 0,25$  с днем и  $\tau_k = 0,14$  с вечером. Отличаются на порядок не только значения  $\tau_k$ , но и сам характер зависимости  $R(\tau)$ . Функция автокорреляции сигналов  $E_H$  в области существенной корреляции аппроксимируется экспоненциальной кривой, сигналов  $E_\phi$  — гауссовой. Полученный результат отличается от данных, приведенных в [3], где функция корреляции обоих типов сигналов аппроксимировалась гауссовой зависимостью. Измерения, проведенные в 1972—1976 гг., позволили выявить различия в суточных и сезонных изменениях вероятности регистрации сигналов типа  $E_\phi$  и  $E_H$ . Для получения этих зависимостей измерения проводились ежемесячно в течение 6—8 суток. Циклы наблюдения внутри месяца распределялись равномерно. На рис. 2г пунктирной линией показан суточный ход среднего уровня сигнала типа  $E_\phi$ , сплошной линией — суточные изменения вероятности  $P(E_H)$  регистрации сигналов типа  $E_H$ . На левой оси ординат на рис. 2г отложено среднее значение сигнала на входе приемника в микровольтах, на правой оси ординат — значение  $P(E_H)$ , определенное как отношение числа пятнадцатиминутных интервалов времени, в которых регистрировался сигнал типа  $E_H$  на уровне, превышающем  $0,15$  мкВ, к общему числу пятнадцатиминутных интервалов регистрации. По оси абсцисс на рис. 2г указано время суток (московское). Усреднение данных на рис. 2г произведено по 96 суткам наблюдений. Максимальные уровни сигналов типа  $E_\phi$  регистрируются днем. Рассеяние типа  $E_H$  на линии МК преимущественно регистрируется в вечерние и предполуденные часы, что согласуется с данными, полученными в УКВ диапазоне [3]. На рис. 2д приведены сезонные изменения среднего уровня сигналов типа  $E_\phi$ , построенные по наблюдениям в 1975—1976 гг. (пунктирная кривая). Аналогичная зависимость для рассеяния типа  $E_H$  приведена на этом же рисунке сплошной линией. По правой оси ординат на рис. 2д отложено сечение рассеяния  $\sigma$  единичным объемом. Методика расчета  $\sigma$  для анизотропного рассеяния приведена в [4, 5]. По оси абсцисс на рис. 2д указан сезон наблюдений. Сезонный максимум  $E_\phi$  рассеяния приходится на летние месяцы,  $E_H$  рассеяния — на период весеннего равноденствия.

Полученные на линии МК данные позволили выявить существенную разницу в статистических характеристиках двух анализируемых видов рассеяния. Сигнал типа  $E_H$  является аналогом некоторых видов высокоширотного рассеяния, поэтому назван «авроральным» типом. Этот вид рассеяния, как показали одновременные измерения на трассах МК и АК, обладает ракурсными свойствами. Для иллюстрации этого на рис. 2в приведены изменения вероятностей регистрации рассеяния типа  $E_H$  в течение суток, полученные в марте 1976 г. Заштрихованная гистограмма относится к линии АК. Измерения выявили заметную разницу в вероятностях регистрации сигналов типа  $E_H$  на линиях, ориентированных под различными углами к магнитному меридиану. На линии МК вероятности достигали в максимуме значений 95%, т. е. рассеяние типа  $E_H$  в некоторые часы суток регистрировалось практически регулярно, на линии АК вероятность появления  $E_H$ -рассеяния находилась в пределах 5—15%. Необходимо отметить, что рассеяние типа  $E_H$  на линии АК регистрировалось только в период весеннего равноденствия, тогда как на линии МК — во все сезоны наблюдений. Полученный результат свидетельствует о ракурсном характере рассеяния типа  $E_H$ . Сигналы типа  $E_\phi$  обладают свойствами, аналогичными рассеянию на изотропных неоднородностях областей D и E ионосферы [6]. Однако необходимо иметь в виду, что на трассе МК сигналы как  $E_H$ , так и  $E_\phi$  типа были приняты под азимутами, отличными от дуги большого круга. На рис. 3 представлено распределение азимутов, построенное по измерениям в течение 8 суток в январе 1976 г. на линии МК для двух интервалов времени 10—12<sup>h</sup> и 20—22<sup>h</sup>, когда

явно преобладала одна из мод рассеяния. За нулевой отсчет на рис. 3 принято направление по дуге большого круга. По оси ординат отложено число измерений  $N$ . В дневные часы, когда преобладает  $E_{\Phi}$ -рассеяние, большая часть сигналов регистрируется в азимуте  $A = 15^\circ$ , вечером, при преобладании  $E_H$ -рассеяния,  $A \approx 100^\circ$ . Минимум в окрестности азимута  $A = 60^\circ$  вызван ослаблением сигнала за счет использования в эксперименте антенн с горизонтальной поляризацией (в этом направлении угол между волновыми векторами падающей и рассеянной волн близок к  $90^\circ$ , что приводит к поляризационному ослаблению из-за дипольного характера рассеяния радиоволн электронами). Учитывая различие в тонкой структуре сигналов  $E_{\Phi}$  и  $E_H$ , суточные и сезонные различия вероятности их регистрации, разделение в пространстве областей рассеяния, различную степень ракурсной чувствительности, резонно предположить, что за генерацию неоднородностей типа  $E_{\Phi}$  и  $E_H$  ответственны различные механизмы.

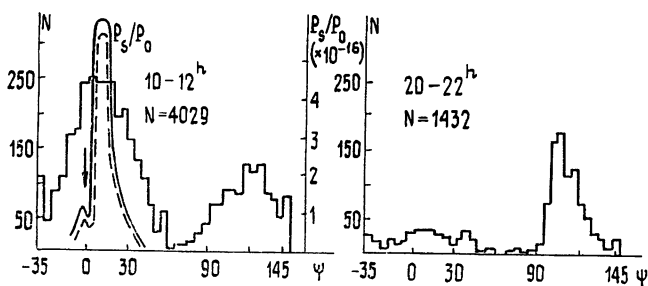


Рис. 3.

Известно, что в средних широтах основным механизмом образования мелкомасштабных неоднородностей является турбулентное перемешивание. Попытаемся оценить, можно ли в рамках этой модели описать характеристики  $E_H$  и  $E_{\Phi}$ . Высоты, на которых существует развитая мелкомасштабная турбулентность, лежат в интервале 80—110 км. Расчеты характеристик радиоволн, рассеянных на турбулентных неоднородностях, показали хорошее согласие с экспериментом как при наклонном, так и вертикальном зондировании [7]. В этих расчетах существует возможность учесть влияние геомагнитного поля на анизотропию неоднородностей (которая становится заметной на высотах более 100 км) и, следовательно, на параметры рассеянных радиоволн. Основной характеристикой процесса рассеяния, которая используется в дальнейших расчетах, является отношение мощности  $P_s$  рассеянного сигнала к мощности  $P_0$ , излученной передающей антенной. Выражение этого отношения через спектральные характеристики флуктуаций  $N$  приведено в [8], а вид одномерного спектра для всего диапазона существующих масштабов неоднородностей  $N$  — в [9]. Перейдя к трехмерной спектральной плотности в интервале масштабов, соответствующем рассматриваемому диапазону радиоволн, окончательно можно получить

$$P_s/P_0 = (80,8/c^2)^2 0,011 \alpha_N K (\pi^3/2) \lambda^2 \times \int_{V_{\text{расс}}} \frac{(d\bar{N}/dz)^2 l_0^{4/3} p^{-11/3} \exp[-(0,17 l_0)^2 p^2] |F_1|^2 |F_2|^2 \sin^2 \chi dV}{D_a R_1^2 R_2^2} \quad (1)$$

Здесь  $c$  — скорость света,  $\alpha_N \approx 1$  — число Шмидта,  $K$  — коэффициент турбулентного обмена,  $\lambda$  — рабочая длина волны,  $d\bar{N}/dz$  — высотный градиент среднего профиля электронной концентрации,  $l_0$  — внутренний

масштаб турбулентности,  $D_a$  — коэффициент амбиполярной диффузии,  $F_1$  и  $F_2$  — диаграммы направленностей приемной и передающей антенн,  $R_1$  и  $R_2$  — расстояния от антенн до элемента  $dV$  эффективно рассеивающего объема  $V_{\text{расс}}$ ,  $\chi$  — угол в точке рассеяния между электрическим вектором падающей волны и направлением на точку приема,  $p = 2\pi/r = (4\pi/\lambda) \sin(\theta/2)$  — пространственное волновое число ( $r$  — масштаб неоднородности,  $\theta$  — угол рассеяния).

По формуле (1) определялся средний уровень рассеянного сигнала и распределения азимутов радиоволн, приходящих в точку приема. Расчеты проводились при параметрах аппаратуры, использовавшейся в экспериментах на линии МК. Значение коэффициента диффузии в зависимости от угла  $\beta$  между волновым вектором неоднородностей и вектором геомагнитного поля использовалось в приближении, справедливом для слабоионизованной плазмы [10]:

$$D_a = (T_e + T_i) \{M_i \nu_{im} [1 + (\Omega_H/\nu_{im})^2]/[1 + (\Omega_H/\nu_{im})^2 \cos^2 \beta] + m\nu_{em} [1 + (\omega_H/\nu_{em})^2]/[1 + (\omega_H/\nu_{em})^2 \cos^2 \beta]\}^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $T_e$ ,  $T_i$  — электронная и ионная температуры,  $\omega_H$ ,  $\Omega_H$  — гирочастоты электронов и ионов,  $m$ ,  $M_i$  — массы заряженных частиц,  $\nu_{em}$ ,  $\nu_{im}$  — частоты соударений электронов и ионов с нейтральными атомами.

Значения углов наклона и склонения, характеризующих направление силовых линий магнитного поля, выбирались из результатов геомагнитной съемки. При проведении расчетов по формуле (1) потребовалось знание и других величин. Так, значения коэффициента турбулентного перемешивания для конкретных месяцев измерений на трассе заимствованы из работы [11]. Профиль внутреннего масштаба турбулентности  $l_0$  получен на основании измерений интенсивности турбулентности, проводившихся на рассматриваемых высотах 80—110 км методом радиолокации метеорных следов, в соответствии с работой [12]. Вид профиля приведен на рис. 4. Высотный ход градиента определялся для конкретных условий измерений на трассах с помощью модели высотно-суточных вариаций электронной плотности, описанной в [13].

На рис. 3 приведены вычисленные значения  $P_s/P_0$  в зависимости от азимута приема, полученные при использовании на приеме диполя, а на передаче — двойной ромбической антенны, ориентированных в ракурсную зону трассы МК. Результаты расчетов с учетом влияния магнитного поля на спектр неоднородностей  $\Phi_N$  показаны сплошной кривой, без учета поля — пунктиром. На рис. 3 азимуты отсчитываются от направления линии МК (положительные азимуты соответствуют повороту к северу). Сравнивая результаты вычислений, видим, что влияние магнитного поля на уровень сигнала есть, но оно невелико и достигает максимально 10—15%. Влияние магнитного поля заметно почти во всем интервале рассмотренных значений азимутальных углов. Это связано с тем, что условие ракурсности внутри объема  $V_{\text{расс}}$  выполняется в довольно большой области, что и приводит к «размытию» эффекта влияния магнитного поля на характеристики рассеянного сигнала. Слабое увеличение  $P_s$  при учете влияния магнитного поля свидетельствует о малой анизотропии неоднородностей. Это объясняется быстрым увеличением с высотой внутреннего масштаба турбулентности  $l_0$ , что равносильно падению интенсивности малых масштабов. В результате, согласно расчетам, основная доля рассеянного сигнала в нашем случае приходит из интервала высот 80—90 км, на которых диффузия изотропна. На рис. 5 приведены результаты вычисления относительной интенсивности рассеянного сигнала  $P_s/P_0$  для различных высот и азимутов. И хотя с увеличением высоты влияние магнитного поля на неоднородности заметно возрастает, из рис. 5 видно, что вклад этой части объема

в мощность рассеянного сигнала весьма незначителен. Существование небольших максимумов на рис. 5 связано с наличием нескольких зависимостей в формуле (1) от азимута. Изменение их соотношений при изменении азимута и приводит к некоторой неравномерности в величинах  $P_s/P_0$ . Если сравнить расчетные и экспериментальные данные на рис. 3, видно, что теоретическая кривая азимутальной зависимости принимаемой мощности близко соответствует экспериментальному распределению азимутов сигналов типа  $E_\Phi$ . Важно то, что теория и эксперимент показывают наличие бокового распространения. При этом, согласно расчетам, оно вызвано «турбулентным» рассеянием на почти изотропных неоднородностях. Поэтому можно утверждать, что сигнал типа

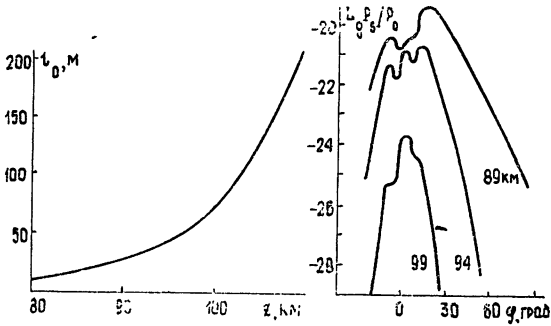


Рис. 4.

Рис. 5.

$E_\Phi$  не обладает ракурсными характеристиками и его уровень будет возрастать при ориентации антенн по дуге большого круга за счет уменьшения угла рассеяния и поляризационных потерь. Подтверждением того, что сигнал  $E_\Phi$  вызван рассеянием на турбулентных неоднородностях, служит и близкое совпадение расчетных и экспериментальных уровней сигнала. Вычисления проводились по формуле (1) для трех ориентаций приемной узконаправленной антенны. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Азимут приемной антенны, град	Средний уровень сигнала, мкВ	
	Эксперимент	Расчет
332	2,0	2,10
323	1,1	0,74
314	1,9	2,80

В результате сравнения теории и эксперимента удалось показать:

1) теоретические оценки, полученные в предположении о турбулентном механизме образования неоднородностей с учетом геомагнитного поля в нижней ионосфере, хорошо совпадают с экспериментальными данными для сигналов типа  $E_\Phi$ ;

2) влияние магнитного поля Земли на характеристики сигналов  $E_\Phi$  невелико вследствие того, что рассеяние происходит на почти изотропных неоднородностях. Это вызвано ростом внутреннего масштаба турбулентности с высотой, приводящего к тому, что основная доля сигнала рассеивается в интервале высот 80—90 км;

3) механизм турбулентного рассеяния не может объяснить экспериментальных данных по ракурсному рассеянию типа  $E_H$ . Это, возможно, свидетельствует о существовании в среднеширотной ионосфере дру-

гих механизмов образования неоднородностей, приводящих к рассеянию сигнала на высотах, больших 110 км, где диффузия анизотропна. Возможно, что они вызваны токовыми нестабильностями, с помощью которых в настоящее время объясняют образование анизотропных неоднородностей в высоких и экваториальных широтах [14]. Что касается анизотропного рассеяния на более низких высотах, вызванного турбулентным перемешиванием, обсуждавшегося выше, оно в принципе может быть выделено экспериментально, если использовать более низкие рабочие частоты и узконаправленные в вертикальной плоскости антенны, ориентированные в ракурсную область на высоты, большие 110 км. Применение узконаправленных антенн позволит исключить изотропное рассеяние с высот 80—90 км, использование низких частот позволяет компенсировать обеднение мелких масштабов в спектре неоднородностей, вызванное ростом с высотой внутреннего масштаба турбулентности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Heritage I. L., Fay W. I., Bowen E. D.—J. Geophys. Res., 1962, 67, № 3, p. 953.
2. Насыров А. М., Каримов Р. А.—В сб.: Метеорное распространение радиоволн.—Казань: Гос. ун-т, 1972, вып. 10—11, с. 197.
3. Филипп Н. Д. Диссертация. Томск, 1978.
4. Коровин А. В., Насыров А. М.—В сб.: Метеорное распространение радиоволн.—Казань: Гос. ун-т, 1979, вып. 15.
5. Филипп Н. Д.—Радиотехника и электроника, 1977, 22, вып. 3, с. 433.
6. Шумская Н. И., Вязников В. В., Гаспарьянц Э. М., Фикс Я. А., Шергина З. А. Радиопередача ионосферного рассеяния метровых волн.—М.: Связь, 1973.
7. Тептин Г. М., Стенин Ю. М. Статья депонирована в ВИНТИ, рег. № 1052-28. Деп. от 28 марта 1978 г.
8. Стенин Ю. М., Тептин Г. М. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по распространению радиоволн.—Казань: Гос. ун-т, 1975, ч. 4, с. 192.
9. Тептин Г. М., Стенин Ю. М.—ДАН СССР, 1977, 233, № 1, с. 15.
10. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е.—Геоматематика и астрономия, 1965, 5, с. 251.
11. Тептин Г. М. Структура нижней термосферы.—Казань: Гос. ун-т, 1976.
12. Тептин Г. М.—Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1972, 8, № 3, с. 243.
13. Зелецькова Г. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. Н.—В сб.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы.—М.: Наука, 1976.
14. Гершман Б. Н., Игнатьев Ю. А., Каменецкая Г. Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя  $E_s$  на различных широтах.—М.: Наука, 1976.

Казанский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
23 июня 1980 г.,  
после доработки  
23 декабря 1980 г.

#### ANISOTROPIC SCATTERING OF RADIO WAVES OF SW RANGE IN LOW IONOSPHERE OF MIDDLE LATITUDES

A. M. Nasyrov, Yu. M. Stenin, G. M. Teptin

Dying-out frequencies, autocorrelation characteristics, diurnal and seasonal variations, angular distribution of signals propagating by a side way on Moscow—Kazan' trace are experimentally investigated at the frequency of 25 MHz. According to synchronous measurements on Moscow—Kazan' and Arkhangel'sk—Kazan' traces a  $E_H$ -type signal is isolated being scattered by field-aligned irregularities and a  $E_s$ -type being scattered by isotropic irregularities. A good agreement is shown between experimental characteristics of the  $E_s$  signal and calculational data obtained in the frames of a model of radio wave scattering by turbulent irregularities with taking into account the effect of the Earth magnetic field on the spectrum of electron density fluctuations.