

23. О ДИАГНОСТИКЕ ПИВ ПО ДАННЫМ РАДАРОВ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Ойнац А.В.¹, Куркин В.И.¹, Пономарчук С.Н.¹, Lester M.²

¹Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

²University of Leicester, England

Аннотация. В работе изучается возможность использования радаров декаметрового диапазона для диагностики крупномасштабных и среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Описывается методика моделирования радиосигналов, рассеянных шероховатостями земной поверхности, разработанная в рамках волноводного подхода. Приводятся результаты моделирования влияния ПИВ на характеристики рассеянных радиосигналов и их сопоставление с экспериментальными данными, полученными на радарх SuperDARN CUTLASS (Исландия и Финляндия). Обсуждаются вопросы определения параметров ПИВ по измерениям задержек рассеянного сигнала с трех близких направлений.

ВВЕДЕНИЕ

Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) представляют собой локализованные волнообразные неоднородности электронной концентрации. Основным источником ПИВ считаются атмосферные гравитационные волны (АГВ). АГВ принято разделять на мелкомасштабные с периодами порядка нескольких минут, среднемасштабные - от 15 минут до 1 часа и крупномасштабные – от 30 минут и до нескольких часов [1, 2]. В данной работе мы не будем касаться мелкомасштабных возмущений, а сосредоточимся на последних двух классах.

Основное различие между среднемасштабными и крупномасштабными АГВ состоит в величине фазовой скорости, которая соответственно меньше и больше скорости звука в тропосфере. Крупномасштабные АГВ являются сравнительно редким событием и возникают вследствие больших суббурь и специфических событий в полярном овале [3]. Среднемасштабные АГВ наблюдаются наиболее часто и связываются с активностью в полярном овале, в частности с вариациями в горизонтальных токовых структурах. В свою очередь среднемасштабные АГВ разделяют на прямые и отраженные от поверхности земли [4]. Прямая мода в основном проявляется в виде неперiodических неоднородностей, в то время как отраженная мода показывает квазимонохроматическую волновую активность с количеством периодов, достигающим до 5-7. В этой связи диагностика и изучение ПИВ



Рис. 1. Схема расположения и секторов обзора радаров SuperDARN CUTLASS.

является важным средством исследования АГВ, генерируемых в авроральных зонах северного и южного полушарий.

Обычно для изучения ПИВ применяются такие инструменты как, например, ионозонды, доплеровские зонды, радары когерентного и некогерентного рассеяния. Радары когерентного рассеяния (и в частности сеть радаров SuperDARN [<http://superdarn.jhuapl.edu/>]), работающие в дециметровом диапазоне радиоволн, по видимому, являются одними из наиболее удобных средств диагностики ПИВ, так как обеспечивают возможность непрерывного мониторинга больших пространственных областей [5]. Проявление ПИВ в данных радаров когерентного рассеяния заключается в квазипериодических вариациях мощности, доплеровской скорости, угла прихода и минимального группового пути сигнала, рассеянного земной поверхностью, или, другими словами, сигнала возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ). Вариации мощности сигнала ВНЗ обусловлены явлением фокусировки сигнала, возникающим вследствие искривления ПИВ верхней отражающей поверхности волновода. Вертикальное движение этих искривленных поверхностей приводит к вариациям угла прихода, доплеровской скорости и минимального группового пути сигнала.

В качестве иллюстрации на рис. 1 показана схема расположения и секторы обзора радаров SuperDARN CUTLASS Hankasalmi (62.3°N , 26.6°E) и Pykkvibaer (63.9°N , 19.2°W). Сектор обзора каждого радара составляют 16 лучей с разными азимутальными направлениями, в которых могут фазироваться антенны. Нумерация лучей идет по часовой стрелке, начиная с 0. На рис. 2 представлена зависимость мощности рассеянного земной поверхностью сигнала от группового пути и времени

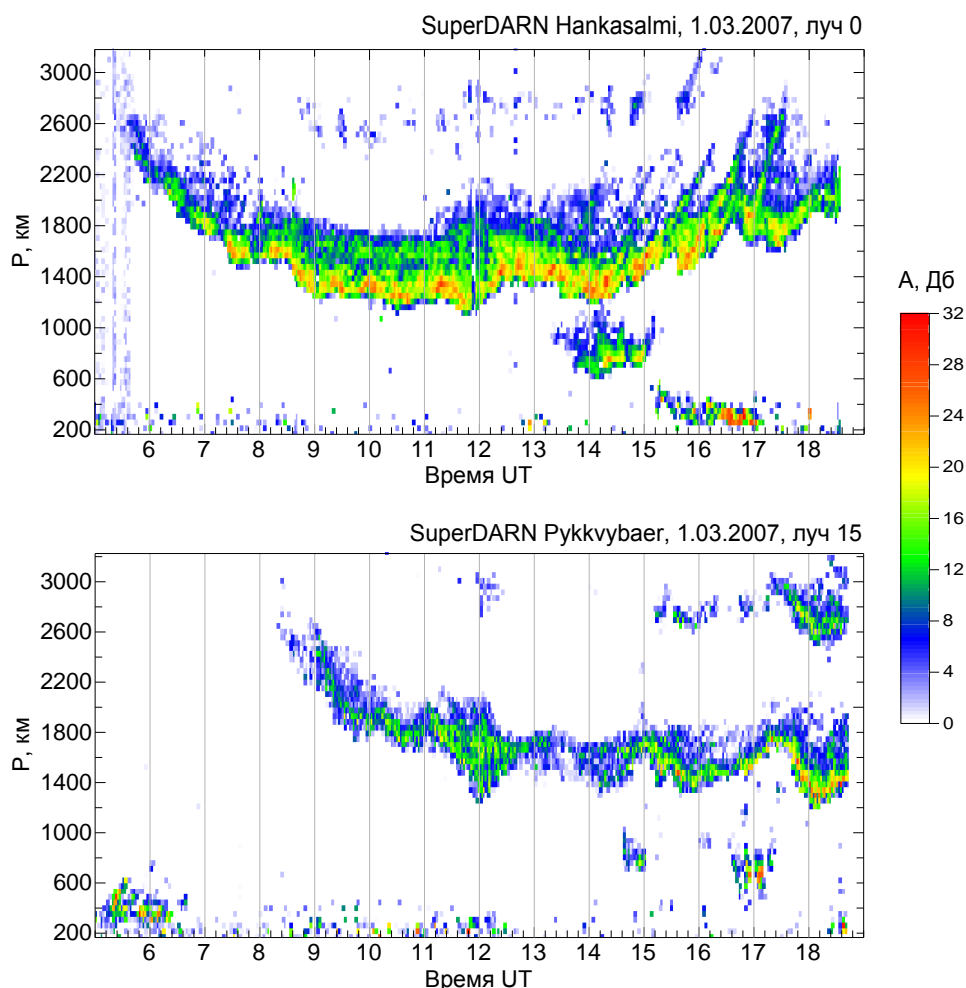


Рис. 2. Мощность принимаемого сигнала, измеренная на радарях CUTLASS 1.03.2007 Hankasalmi (вверху) и Pykkvubaer (внизу) в зависимости от группового пути и времени UT.

UT, полученная 1 марта 2007 года на радарях CUTLASS на лучах 0 и 15. На рисунке можно заметить отчетливые квазипериодические вариации мощности и минимального группового пути принимаемого сигнала. В утреннее время период вариаций составляет около 1-го часа, а в вечернее - около 2-х часов. Одновременное наблюдение вариаций в принимаемом сигнале с одинаковыми периодами на обоих радарях позволяет говорить о том, что они обусловлены одним и тем же ионосферным возмущением.

На сегодняшний день опубликовано большое количество работ, связанных с наблюдениями ПИВ и разработкой методов их диагностики по данным радаров SuperDARN [5-14]. Основными параметрами ПИВ, которые могут быть определены с использованием радара SuperDARN, являются период, амплитуда, азимут направления распространения, а также горизонтальные составляющие длины волны и фазовой скорости. В отдельных случаях удается также определить координаты источника ПИВ и связать их с конкретными событиями в авроральных областях.

Для понимания того, как распространяющиеся в секторе обзора декаметрового радара ПИВ влияют на характеристики принимаемого сигнала, разными авторами

ранее проводилось моделирование характеристик радиосигналов, рассеянных земной поверхностью. В частности в работах [5, 10, 11] авторы используют для моделирования характеристик декаметрового радиосигнала метод геометрической оптики и простые модели среды распространения. В отличие от указанных работ в данной работе используется методика, основанная на волноводном подходе [15], и современная модель ионосферы IRI-2007 [16]. Полученные при моделировании результаты сопоставляются с данными радаров SuperDARN CUTLASS, а найденные зависимости могут быть использованы для диагностики ПИВ.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет характеристик поля, рассеянного неровностями земной поверхности, проводится в адиабатическом приближении метода нормальных волн [15] с использованием разработанной в ИСЗФ СО РАН методики моделирования сигналов при возвратно-наклонном зондировании (ВНЗ) ионосферы [17-20]. В основе методики лежит представление поля излучателя с произвольным распределением тока в азимутально-симметричном волноводе Земля-ионосфера в виде ряда нормальных волн

$$E_j(\vec{r}, t) = \text{Re} \left\{ \frac{A}{y\sqrt{\sin\theta}} \sum_n (\gamma_n)^{-1/2} I_{nj}(\phi) P_{nj}(\vec{r}) A_{nj}(\vec{r}) g_0(t - \tau_n(\vec{r})) e^{i\Phi_{nj}(\vec{r}) - i\omega_0 t} \right\} \quad (1)$$

В формуле (1) используется сферическая система координат с началом в центре Земли, излучатель находится в точке $\vec{r}_b = b, 0, 0$, $j = r, \theta, \phi$, θ - угловая дальность от излучателя до точки наблюдения, $y = r/a$ - приведенная радиальная координата, a - радиус Земли, γ_n , $\tau_n(\vec{r})$, $A_{nj}(\vec{r})$ и $\Phi_{nj}(\vec{r})$ - спектральный параметр, задержка, амплитуда и фаза нормальной волны с номером n , $g_0(t)$ - огибающая сигнала, $P_{nj}(\vec{r})$ - поляризационные множители, а $I_{nj}(\phi)$ - коэффициент возбуждения нормальных волн. Явные выражения для фазы, задержки и амплитуды нормальной волны приводятся в [15].

В основе способа выделения модовой структуры сигнала лежит условие стационарности [21], которое определяет интерференционные свойства ряда нормальных волн в волноводном канале, и эквивалентное условию:

$$L_n^\pm(\vec{r}, f) = \frac{1}{2\pi} (\Phi_n^\pm(\vec{r}) - \Phi_{n+1}^\pm(\vec{r})) = l^\pm \quad (2)$$

- разность фаз соседних нормальных волн кратна 2π . Здесь f - частота, l^\pm - целые неотрицательные числа (число скачков). Для заданных координат приемника и рассчитанной зависимости функции L_n^\pm от номера нормальной волны уравнение (2)

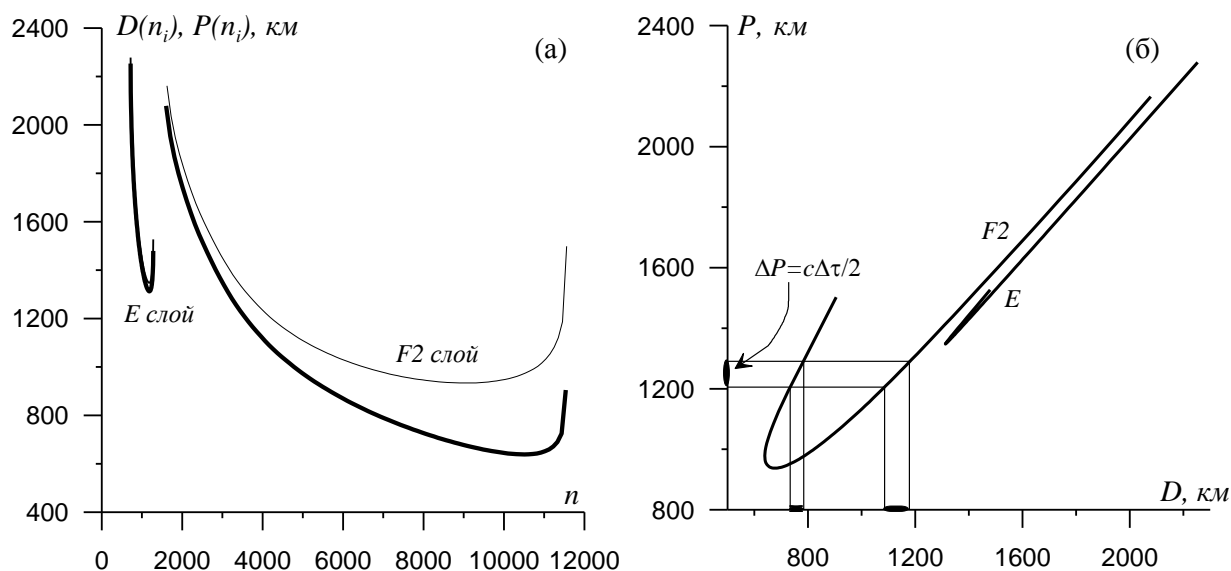


Рис. 3. Зависимости дальности скачка $D(n_i)$ и группового пути $P(n_i)$ от номера нормальной волны (а) для рабочей частоты 10 МГц: толстая линия - $D(n_i)$, тонкая линия - $P(n_i)$. Зависимость $P(D)$ - (б).

позволяет определить центральные номера пакетов волн, складывающихся почти в фазе и дающих основной вклад в поле в точке наблюдения. С другой стороны условие (2) для заданного номера нормальной волны позволяет определить геометрическое место локализации поля группы нормальных волн с данным центральным номером, т.е. траекторию распространения пакета сфазированных нормальных волн. Для повышения оперативности расчетов условие (2) также учитывается при суммировании в формуле (1).

В частности алгоритм расчета минимального группового пути с использованием (2) строится следующим образом. На первом этапе рассчитываются граничные номера группы нормальных волн, эффективно возбуждаемых излучателем и слабо просачивающихся через ионосферу. Для заданных значений n_i из этой группы решается уравнение (2) относительно угловой дальности θ при условии $y = 1$, т.е. на поверхности Земли. При этом получается аналог дальностно-угловой характеристики $D(n_i)$. После этого для каждого номера n_i рассчитывается групповая задержка с использованием $D(n_i)$, и в результате получается аналог дистанционно-угловой характеристики $P(n_i)$. На рис. 3а приведены зависимости $D(n_i)$ (толстая линия) и $P(n_i)$ (тонкая линия) односкачкового сигнала для рабочей частоты $f = 10$ МГц для ионосферы, рассчитанной по модели IRI. Для каждого из волноводных каналов E и F2

присутствуют свои зависимости $D(n_i)$ и $P(n_i)$. Минимум в зависимости $D(n_i)$ соответствует границе мертвой зоны, а минимум в зависимости $P(n_i)$ определяет минимальный групповой путь. Как видно на рис. 3а, зависимости $P(n_i)$ и $D(n_i)$ «несимметричны», т.е. граница мертвой зоны не совпадает с дальностью, на которой достигается минимум группового пути. На рис. 3б показана соответствующая зависимость $P(D)$. При увеличении рабочей частоты дальность минимального группового пути сигнала приближается к границе мертвой зоны.

При ВНЗ ионосферы освещенная область земной поверхности простирается на тысячи километров, начиная от дальности мертвой зоны. Однако в каждый конкретный момент времени из всей освещенной области «засвечиваются» только некоторые площадки, размеры которых определяются наклоном траектории распространения сигнала и пространственной длиной зондирующего импульса $\Delta P = c\Delta\tau/2$, где $\Delta\tau$ - длительность импульса, c - скорость света. Для определения этих площадок и расчета их размеров используются найденные зависимости $P(D)$. На рис. 3б схематически показано, что импульсом с пространственной длиной ΔP в один и тот же момент времени освещаются две площадки: одна «верхним», а другая «нижним» лучом. Обе площадки дают вклад в амплитуду принимаемого сигнала, но в разные моменты времени. Как показали оценки [22], типичные размеры засвеченных площадок малы по сравнению с шириной волновода и расстоянием до них, а амплитуду падающего поля и угол падения в их пределах можно приближенно считать постоянными.

В силу малости размеров засвеченных площадок для характеристики их рассеивающих свойств используется понятие коэффициента рассеяния $\sigma(\alpha_i, \alpha_s)$, который связан с коэффициентом возбуждения $I_{n_j}(\phi)$ соотношением [17]

$$I_n(\phi) = \frac{C_n}{ka^3} cA_i \sqrt{\frac{\sigma(\alpha_i, \alpha_s) S \cos \alpha_i}{4\pi}} e^{-iZ_n}. \quad (3)$$

Здесь амплитуда падающего поля A_i , амплитудный множитель C_n и фаза радиальной функции Z_n рассчитываются на поверхности земли, как если бы шероховатостей не было, α_i и α_s - углы падения и рассеяния соответственно, S - площадь рассеивающей площадки, $k = 2\pi f/c$ - волновое число. В качестве коэффициента рассеяния

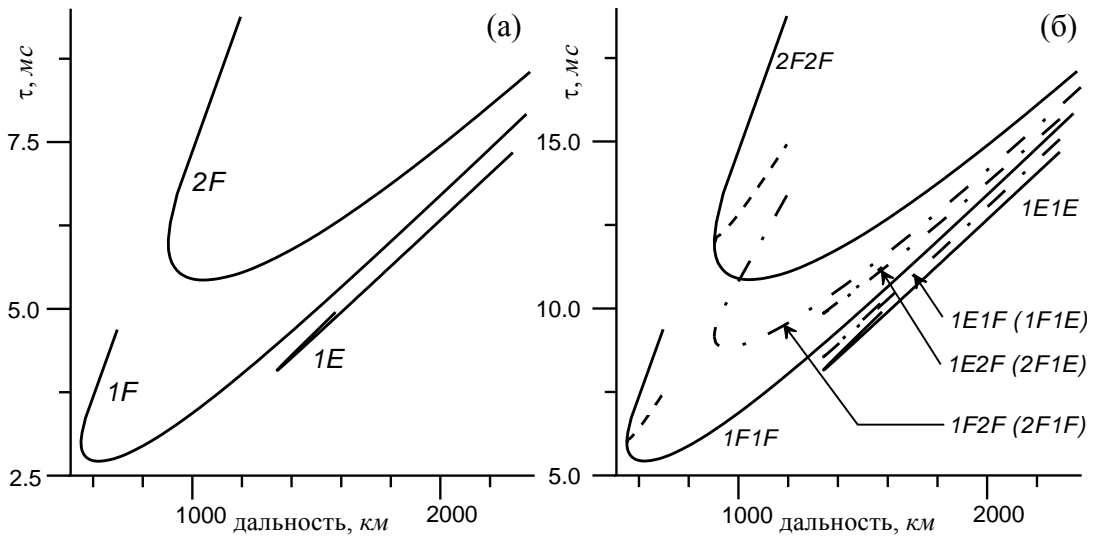


Рис. 4. Зависимости задержек верхнего и нижнего лучей для двухслойной ионосферы $\tau_A(\theta)$ и $\tau_i(\theta)$, а также рассчитанные зависимости (5) и (6) в этом случае.

используется аналитическое выражение, полученное в рамках метода малых возмущений [23]

$$\sigma(\alpha_i, \alpha_s) = 4\pi k^4 \cos^2 \alpha_i \cos^2 \alpha_s |\mu|^2 W(-k(\sin \alpha_i + \sin \alpha_s)), \quad (4)$$

где μ - коэффициент, зависящий от поляризации волны и электрических свойств поверхности, $W(x)$ - спектральная плотность высот случайной шероховатой поверхности.

Падающее поле рассеивается засвеченной площадкой во всех направлениях. Однако если пренебречь изменениями ионосферы за время распространения сигнала до рассеивающей площадки и обратно, то сигнал в точку приема вернется по тем же траекториям, по которым распространялся к площадке. Поэтому при наличии одного волноводного канала в каждый момент времени засвечивается не более трех площадок, а в точку приема может прийти не более 4-х сигналов, групповые задержки которых в зависимости от типа траектории и дальности по земле определяются формулами

$$\tau_{BB}(\theta) = 2\tau_B(\theta), \quad \tau_{HH}(\theta) = 2\tau_H(\theta) \quad (5)$$

$$\tau_{BH}(\theta) = \tau_B(\theta) + \tau_H(\theta), \quad \tau_{HB}(\theta) = \tau_H(\theta) + \tau_B(\theta) \quad (6)$$

Здесь $\tau_B(\theta)$ и $\tau_H(\theta)$ - задержки сигналов «верхнего» и «нижнего» лучей соответственно. При наличии нескольких слоев и рассмотрении скачков разной кратности количество засвеченных площадок увеличивается. Для примера на рис. 4а

представлены расчеты зависимостей $\tau_B(\theta)$ и $\tau_H(\theta)$ для двух скачков в случае двухслойной ионосферы (в обозначениях мод на рисунке цифра указывает кратность скачка, а буква - канал). На рис. 4б приведены соответствующие зависимости (5) и (6) для всех типов траекторий. Сплошными линиями показаны зависимости для основных мод (например, 1F1F), штриховыми без значков - для комбинированных мод типа "верхний - нижний". Штрихпунктирными линиями показаны зависимости для комбинированных мод, распространяющихся туда и обратно в разных каналах и по траекториям с разной кратностью скачков (например, 1F2F).

Таким образом, проводя анализ существующих каналов и рассчитывая соответствующие зависимости (5) и (6), можно определить типы траекторий, количество и местоположение рассеивающих площадок, дающих вклад в амплитуду сигнала ВНЗ в заданный момент времени на временной развертке. Далее, по формуле (1) с использованием (3) и (4) можно рассчитать вклад каждой площадки и восстановить амплитуду на всей временной развертке.

Среда распространения при моделировании рассчитывается по модели IRI. Для исследования эффектов, связанных с ПИВ, фоновая электронная концентрация модулируется гармонической волной [24]

$$N(\phi, \theta, r, t) = N_0(\phi, \theta, r, t) \left(1 + \delta \cos(k_r \Delta r + k_\theta r_0 \Delta \theta + k_\phi r_0 \sin \theta \Delta \phi - \frac{2\pi}{T} t + \Phi_0) \right), \quad (7)$$

где $N_0(\phi, \theta, r, t)$ – фоновая электронная концентрация, δ , T и Φ_0 – относительная амплитуда, период и начальная фаза ПИВ, $\{k_\phi = (2\pi/\Lambda) \sin \Phi \cos \Psi$, $k_r = (2\pi/\Lambda) \sin \Phi \sin \Psi\}$ – волновой вектор ПИВ с длиной волны Λ , углы Φ и Ψ задают азимут направления распространения и наклон направления распространения к горизонтالي соответственно, $\Delta \phi$ и $\Delta \theta$ – изменения сферических координат относительно точки расположения излучателя.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Моделирование эффектов ПИВ на характеристики сигнала ВНЗ проводилось для виртуального радара, расположенного в г. Иркутска (52.5°N, 104.0°E). Угловое расстояние между соседними лучами - 3.6°, азимут луча №1 - 76.6°, всего лучей – 16, ширина диаграммы направленности луча в горизонтальной плоскости - 3.6°. На рис. 5 показаны расположение радара и его сектор обзора. Сплошной линией показан

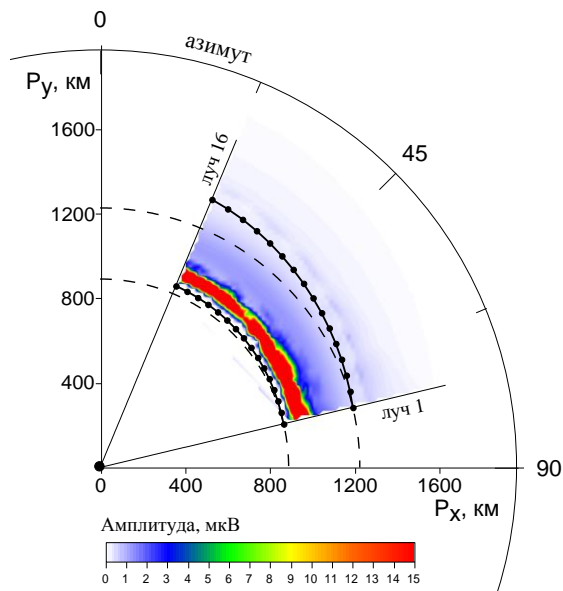


Рис. 5. Сектор обзора радара. Цветом показано распределение амплитуды для марта 2007 10:36. Сплошная линия с точками минимальный групповой путь, пунктирные линии – окружности с центром в точке расположения радара.

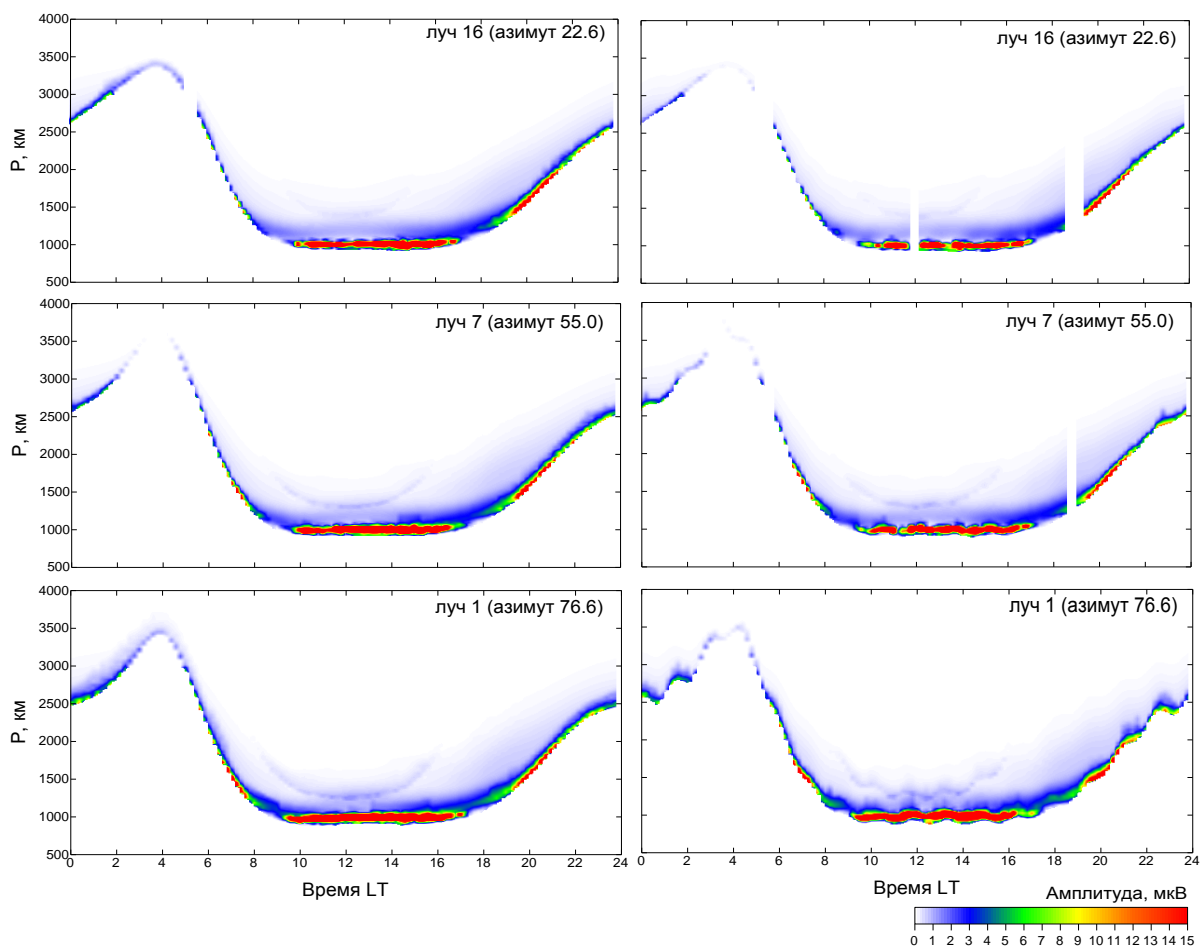


Рис. 6. Амплитуда принимаемого сигнала на рабочей частоте 13 МГц в зависимости от локального времени и группового пути, рассчитанная для марта 2007 и лучей 16, 7 и 1: слева - невозмущенный случай, справа - при наличии ПИВ.

минимальный групповой путь в 10:36 LT, а точки на нем соответствуют пересечению с

лучами. Цветом показана рассчитанная амплитуда принимаемого сигнала в 10:36 LT в координатах P_x и P_y . В качестве приемной и передающей антенн выбраны РГ $\frac{65}{4}$ 1 и 2БС2 соответственно. Электрические параметры земной поверхности постоянные вдоль трассы.

На рис. 6 показаны рассчитанные зависимости амплитуды принимаемого сигнала для рабочей частоты 13 МГц на лучах 16, 7, 1 для марта 2007. В левой части рисунка представлена амплитуда в невозмущенном случае. Как видим, для разных лучей суточный ход амплитуды отличается, что объясняется различной ориентацией соответствующих трасс. В правой части рисунка представлена амплитуда при наличии ПИВ (амплитуда 5%, длина волны 500 км, период 1.5 часа), распространяющегося строго с севера на юг под углом 30° к горизонту. При наличии ПИВ на всех лучах происходит почти гармоническая модуляция минимального группового пути с периодом равным периоду ПИВ. Амплитуда вариаций увеличивается по мере увеличения угла между лучом и направлением распространения ПИВ (вариации на луче 1 проявились значительно сильнее, чем на лучах 7 и 16). На рис. 7 показаны вариации минимального группового пути в присутствии ПИВ относительно невозмущенных условий. Видно, что амплитуда вариаций зависит от времени суток. В частности ночью амплитуда вариаций больше, чем днем, что объясняется вариациями высоты максимума F2 слоя в течение суток. Вариации минимального группового пути на разных лучах сдвинуты по времени, что обусловлено временем распространения фронта ПИВ от одного луча к другому. Очевидно, что максимальное влияние ПИВ оказывает в апогее траектории распространения зондирующего сигнала, т.е. в области отражения от слоя. В сферически симметричном случае положение этой области совпадает со средней точкой трассы. В случае неоднородной ионосферы средняя точка трассы, вообще говоря, не совпадает с областью отражения. Однако при приближенных оценках и интерпретации экспериментальных данных можно считать, что отражение происходит в средней точке трассы.

На рис. 8а представлены вариации минимального группового пути на луче 7 для амплитуд ПИВ 5%, 15% и 25% на временном отрезке от 9:00 UT до 15:30 UT. Как видим, при увеличении относительной амплитуды ПИВ амплитуда вариаций минимального группового пути увеличивается. Зависимость амплитуды вариаций

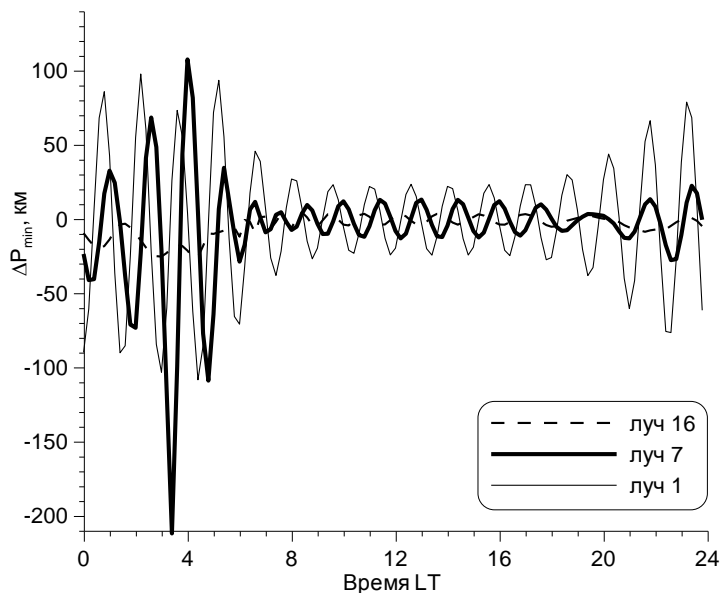


Рис. 7. Вариации минимального группового пути относительно невозмущенных условий для лучей 1, 7 и 16 (см. рис. 5).

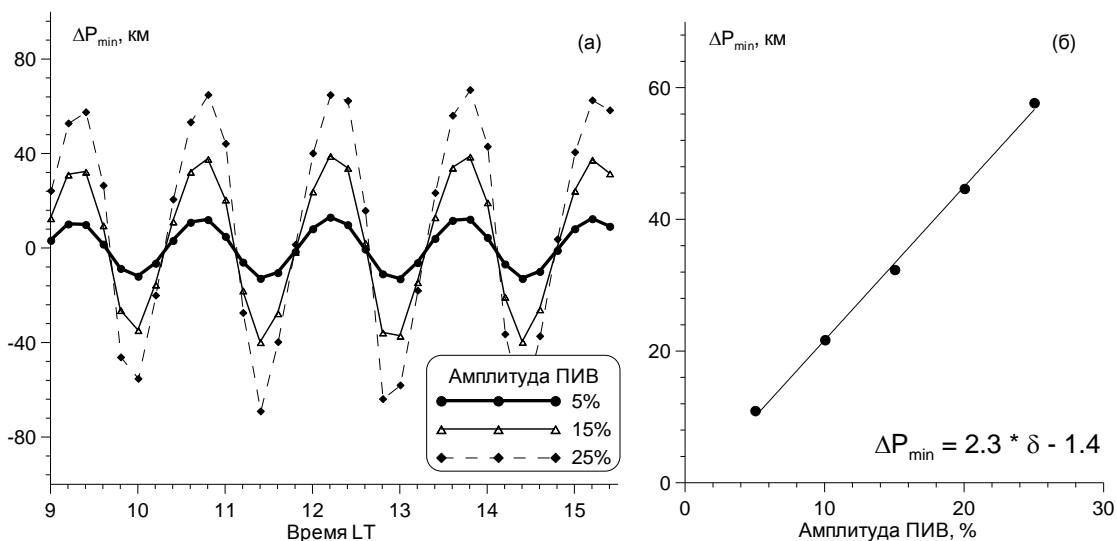


Рис. 8. Вариации минимального группового пути относительно невозмущенных условий (а) и зависимость амплитуды вариаций ΔP_{\min} от амплитуды ПИВ δ (б) для луча 7.

минимального группового пути от относительной амплитуды ПИВ показана на рис. 8б для луча 7. Для диапазона амплитуд от 5% до 25% зависимость близка к линейной.

Схема определения параметров ПИВ по измерениям на трех лучах

Пользуясь тем, что между проявлениями ПИВ на разных лучах наблюдается временная задержка, можно попытаться определить основные параметры ПИВ. Рассмотрим схему на рис. 9. Пусть радар расположен в точке O . Жирными линиями показаны проекции на поверхность земли трех смежных лучей 1, 2 и 3. Азимуты лучей

отличаются на углы β_1 и β_2 . Точками А, В и С на лучах обозначены проекции областей отражения сигнала от ионосферы. Пунктирными линиями показано направление распространения ПИВ и его волновой фронт. Углы между лучами и направлением распространения ПИВ в точках А и В обозначим через α_1 и α_2 , а угловое расстояние между ними (отрезки АВ и ВС) через Δ_1 и Δ_2 соответственно.

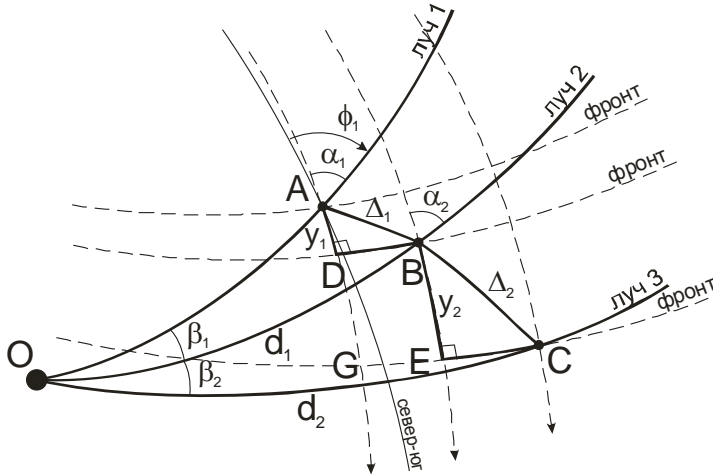


Рис. 9. Схема определения параметров ПИВ по измерениям на трех лучах.

Пусть задержки между вариациями минимального группового пути на лучах 1-2 и 2-3 равны соответственно t_1 и t_2 . Тогда, пользуясь известными теоремами из сферической геометрии, в рамках приближения плоского фронта (малые параметры Δ_1 и Δ_2) для азимута Φ направления распространения, фазовой скорости ν и пространственной длины волны ПИВ Λ можно получить следующие выражения

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\pi + \varphi_1 - \Phi) = \frac{\Delta_2 t_1 \cos(\gamma_2 - \beta_1) - \Delta_1 t_2 \cos \gamma_1}{\Delta_1 t_2 \sin \gamma_1 - \Delta_2 t_1 \sin(\gamma_2 - \beta_1)} \\ \sin \gamma_1 = \frac{\sin \beta_1}{\Delta_1} \sin d_1 \\ \sin \gamma_2 = \frac{\sin \beta_2}{\Delta_2} \sin d_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$v = \frac{\Delta_1 \cos[\gamma_1 - \pi - \varphi_1 + \Phi]}{t_1}, \quad \Lambda = vT.$$

Здесь через γ_1 и γ_2 обозначены углы $\angle OAB$ и $\angle OBC$, а φ_1 - азимут луча 1 в точке А.

Таким образом, измерив период ПИВ T и временные задержки t_1 и t_2 между вариациями минимального группового пути для трех близких по азимуту лучей можно по формулам (8) определить основные параметры ПИВ. Если составить «тройки» из близких лучей радара и повторить для них вычисления по формулам (8), то можно определить волновой фронт ПИВ и оценить дальность до источника. Отметим, что в реальном эксперименте в секторе обзора радара может находиться сразу несколько ПИВ. В этом случае зависимость группового пути от времени является более сложной и определяется суперпозицией волн. В этом случае описанная схема может быть применима, если можно отделить эффект от отдельных ПИВ.

С использованием формул (8) были оценены параметры ПИВ, которые наблюдались на радарх CUTLASS 1 марта 2007 (см. рис. 2). При оценке использовались измеренные задержки между вариациями минимального группового пути на лучах 0, 2 и 4 радара Hankasalmi и 15, 13 и 11 радара Phykkvibaer. Поэтому результаты (табл. 1) относятся к областям средних точек на данных лучах.

Время наблюдения и период ПИВ	Hankasalmi			Phykkvibaer		
	Φ	v , м/с	Λ , км	Φ	v , м/с	Λ , км
8-12UT, $T \sim 1$ часа	210	250	1800	170	200	800
12-19UT, $T \sim 2$ часа	169	560	4000	213	160	1200

Табл. 1. Оценки параметров ПИВ по данным рис. 1.

Оценки для длины волны и скорости ПИВ на двух радарх отличаются довольно сильно. Разногласия могут быть связаны с несоответствиями средних точек трассы областям отражения, а также неточностями в определении задержек между вариациями на разных лучах. В то же время азимуты распространения находятся в согласии, и можно считать, что в среднем возмущения распространяются в южном направлении.

С использованием проведенных оценок было проведено моделирование амплитуды рассеянного сигнала (рис. 10). Сравнивая рис. 2 и 10, можно увидеть, что имеется качественное согласие между модельными и наблюдаемыми вариациями минимального группового пути для обоих радаров. Основные расхождения связаны в неправильном предсказании формы суточного хода амплитуды и интервала в течение суток, когда наблюдается рассеянный сигнал. Например, для радара Hankasalmi при моделировании рассеянный сигнал присутствует, только начиная с 8UT, а в эксперименте сигнал наблюдается примерно с 5UT. Также при моделировании

существенно завышенной оказалась величина минимального группового пути, что особенно ярко проявилось в вечерние часы для радара Pykkvubaer. Указанные расхождения в основном связаны с ошибками предсказания моделью IRI-2007 ионосферного профиля на высоких широтах.

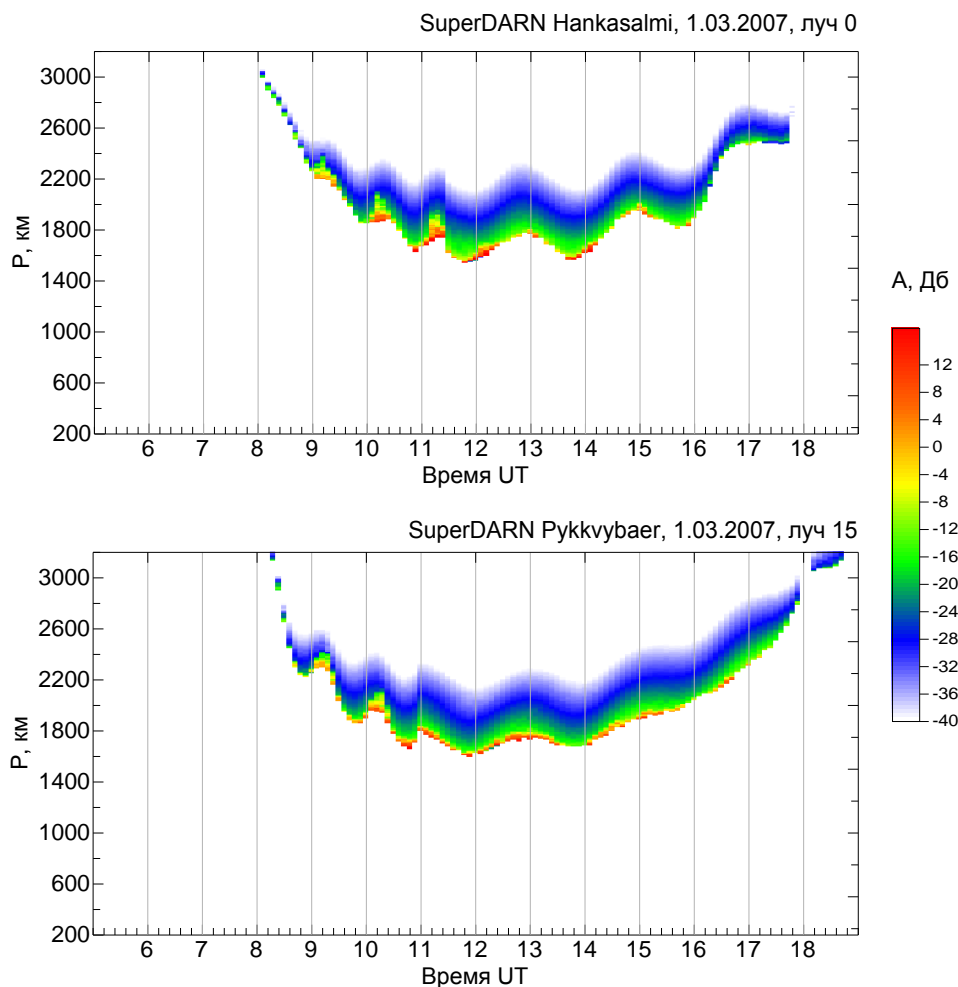


Рис. 10. Результат моделирования амплитуды рассеянного сигнала для условий рисунка 1 с параметрами ПИВ из табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении можно сделать вывод о том, что радары декаметрового диапазона обладают большим потенциалом в задаче диагностики ПИВ. В то же время для повышения точности диагностики с помощью этих радаров требуются эффективные методики моделирования амплитудных характеристик декаметровых сигналов, рассеянных земной поверхностью. Представленная в данной работе методика качественно позволяет моделировать эффект ПИВ на характеристики рассеянного сигнала. Найденные при моделировании зависимости характеристик рассеянного сигнала от основных параметров ПИВ находятся в качественном согласии с данными

наблюдений и результатами других авторов и могут использоваться при интерпретации экспериментальных данных и диагностике среднемасштабных и крупномасштабных ПИВ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-05-00658-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hocke, K., Schlegel, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Annales Geophysicae*. 1996. V. 14. P. 917–940.
2. Hunsucker, R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1982. V. 20, N 2. P. 293–315.
3. Rice, D. D., Hunsucker R. D., Lanzerotti L. J., Crowley G., Williams P. J. S., Craven J. D., and Frank L. An observation of atmospheric gravity wave cause and effect during the October 1985 WAGS campaign // *Radio Sci.* 1988. V. 23. P. 919-930.
4. Francis S. H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79. P. 5245-5260.
5. Karhunen T.J.T., Robinson T.R., Arnold N.F., Lester M. Determination of the parameters of travelling ionospheric disturbances in the high-latitude ionosphere using CUTLASS coherent scatter radars // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2006. V. 68. P. 558–567.
6. MacDougall J.W., Andre D.A., Sofko G.J., Huang C.-S., Koustov A.V. Travelling ionospheric disturbance properties deduced from Super Dual Auroral Radar measurements // *Annales Geophysicae*. 2001. V. 18. P. 1550-1559.
7. Bristow W. A., Greenwald R. A., Samson J. C. Identification of high-latitude acoustic gravity wave sources using the Goose Bay I-IF radar // *Journal of geophysical research*. 1994. V. 99, N A1. P. 319-331.
8. Parish H.F., Robinson T.R., Stocker A.J. and Jones T.B. Evidence of gravity wave structures in cutlass radar measurements // *Adv. Space Res.* 1997. V. 20, N 6. P. 1257-1260.
9. Bristow W. A., Greenwald R. A. Estimating gravity wave parameters from oblique high-frequency backscatter: Modeling and analysis // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100, N A3. P. 3639-3648.
10. Stocker A. J., Arnold N. F., Jones T. B. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing // *Annales Geophysicae*. 2000. V. 18, N 1, P. 56-64.
11. Bristow W. A., Greenwald R. A. Estimating gravity wave parameters from oblique high-frequency backscatter: Modeling and analysis // *Journal of geophysical research*. 1995. V. 100, N A3. P. 3639-3648.
12. Hall G. E., MacDougall J. W., Cecile J.-F., Moorcroft D. R., St.-Maurice J. P. Finding gravity wave source positions using the Super Dual Auroral Radar Network // *Journal of geophysical research*. 1999. V. 104, N A1. P. 67-78.
13. L.-S. He, P. L. Dyson, M. L. Parkinson, and W. Wan Studies of medium scale travelling ionospheric disturbances using TIGER SuperDARN radar sea echo observations // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22. P. 4077–4088.

14. T.Ishida, K.Hosokawa, T.Shibata, S.Suzuki, N.Nishitani, and T. Ogawa SuperDARN observations of daytime MSTIDs in the auroral and mid-latitudes: possibility of long-distance propagation // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. L13102.
15. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.
16. Bilitza, D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in Space Research*. 2008. V. 42. P. 599–609.
17. Куркин В.И., Орлов И.И., Пономарчук С.Н. Схема расчета характеристик КВ сигналов, рассеянных локализованными неоднородностями в волноводе Земля-ионосфера // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. М.: Наука, 1990. Вып. 92. С. 116-121.
18. Куркин В.И., Пономарчук С.Н. Моделирование характеристик ЛЧМ сигналов при возвратно-наклонном зондировании ионосферы // *Тезисы докладов XIX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн*. Казань, 1999. С. 447-448.
19. Ойнац А.В. Моделирование сигналов ВНЗ на основе метода нормальных волн // *Байкал. междунар. молодеж. шк. по фундам. физике (БШФФ-2003). Труды VI сессии молодых учен. "Волновые процессы в проблеме космической погоды"*. Иркутск. 2003. С. 146-149.
20. Oinats, A.V. The Diagnostics of Ionosphere and Earth Ground Surface by Backscatter Sounding Data / S. N. Ponomarchuk, V. I. Kurkin, and A. V. Oinats // *PIERS Proceedings*. Moscow, Russia. August 18-21, 2009. P. 1245-1248.
21. Попов В.Н., Потехин А.П. Структура поля импульсного сигнала декаметрового диапазона в волноводе земля-ионосфера // *Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. М.: Наука, 1982. Вып. 59. С. 68-76.
22. Ойнац А.В., Куркин В.И., Пономарчук С.Н. О разработке метода диагностики ионосферных возмущений по данным ВНЗ с использованием ЛЧМ-сигналов // *Тезисы II-го международного совещания "Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений"*. Паратунка Камчатской области. 2001. С.43-44.
23. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно - неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т.2. 317 с.
24. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротковолнового канала // *Известия вузов. Радиофизика*. 2005. Т. XLVIII, № 6. С. 455- 471.