

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации  
Научно-исследовательский радиофизический институт

---

П р е п р и н т    N    439

ЗАХОДНЫЙ ЭФФЕКТ В ВАРИАЦИЯХ СОБСТВЕННЫХ  
ЧАСТОТ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО  
РЕЗОНАТОРА.

Е. Н. Ермакова  
В. Ю. Трахтенгерц  
П. П. Беляев  
Н. И. Белова

Нижний Новгород, 1997

Ермакова Е. Н., Трахтенгерц В. Ю., Беляев П. П.,  
Белова Н. И.

## ЗАХОДНЫЙ ЭФФЕКТ В ВАРИАЦИЯХ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА.

*Препринт N 439*

– Нижний Новгород: НИРФИ, 1997. – 12 с.

УДК 550.383

Предложен и апробирован метод исследования параметров волновых возмущений в ионосфере, основанный на регистрации вариаций резонансных частот  $\Delta F$  ионосферного альвеновского резонатора. Амплитуда этих вариаций существенно возрастает после прохождения вечернего терминатора. Характерные периоды этих флуктуаций колеблются в пределах 30–60 мин., а их относительная амплитуда составляет (2–5)%. Вариации  $\Delta F$  связываются с генерацией на высотах  $\geq 200$  км модифицированных внутренних гравитационных волн (ВГВ), в которых присутствует и возмущение заряженной компоненты ионосферы.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования волновых возмущений на высотах 150–300 км основаны, как правило, на измерениях вариаций электронной концентрации различными методами: измерение действующих высот, измерение  $N(h)$  профилей с помощью ионозондов, применение метода некогерентного рассеяния радиоволн, доплеровский метод радиозондирования. С помощью указанных методов накоплен большой фактический материал о суточных и сезонных зависимостях появляемости ВГВ на высотах E и F-слоев ионосферы, преобладающих периодах и направлениях их перемещений[1]. Наиболее регулярно наблюдаются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с периодами от 10 мин. до 1 часа, имеющие горизонтальные масштабы 100 – 3500 км, вертикальные масштабы 50–200 км, скорости горизонтального перемещения 150–200 м/с [2-4].

Источниками ВГВ, порождающими ПИВ, могут быть грозы, ураганы, струйные течения, землетрясения и т.д.. Наиболее принята точка зрения, согласно которой ВГВ, которые приводят к образованию ПИВ в ионосфере, генерируются в нижних, более плотных слоях ионосферы[1]. Однако есть источники, например, солнечный терминатор, приводящие к эффективной генерации ВГВ и ПИВ в ионосфере непосредственно на высотах F-слоя

ионосферы и выше[5]. Характерные масштабы ВГВ при этом: горизонтальные  $\sim 1000$  км, вертикальные  $\geq 100$  км, периоды  $\geq 30$  мин.

В настоящей работе развивается метод обнаружения волновых возмущений (ВВ) на высотах 200–400 км, основанный на регистрации вариаций собственных частот ионосферного альвеновского резонатора.

Ионосферный Альвеновский Резонатор (ИАР) - был впервые экспериментально обнаружен в 1985 г. при исследовании спектра фоновой приземной электромагнитной волны в диапазоне частот 0.1–20 Гц [6]. Центральная часть ИАР приходится на максимум F-слоя, а верхняя граница обусловлена нарушением геометрической оптики для альвеновских волн на спаде концентрации ионосферной плазмы выше максимума F-слоя. Нижняя граница ИАР служит в то же время верхней стенкой волновода Земля-ионосфера. Будучи резонатором для альвеновских волн, эта область ионосферы является одновременно волноводом для быстрых магнитозвуковых волн. Внутри ионосферы на резонансных частотах ИАР  $f_k \sim k f_0$ , где  $f_0$  - фундаментальная частота альвеновского резонатора,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , энергия альвеновских волн возрастает. Как оказалось, наличие резонансных условий для альвеновских волн в ионосфере приводит к формированию Резонансной Структуры Спектра (РСС) электромагнитных волн на частотах 0.1–10 Гц, возбуждаемых разрядами молний в полости Земля-ионосфера (высоты 0-100 км. РСС проявляется в значительной гармонической модуляции спектральной интенсивности приземной электромагнитной волны с характерным частотным масштабом  $\Delta F_{k,k+1} = f_{k+1} - f_k$ . Известно[4] и более подробно обсуждается ниже, что  $\Delta F$  определяется величиной электронной концентрации  $N_e$  вблизи максимума F-слоя ионосферы. Таким образом, исследования временных вариаций  $\Delta F$  позволяют судить о вариациях электронной плотности  $N_e$  на высотах 200–400 км, которые при определенных условиях могут быть связаны с распространением ВГВ на этих высотах.

2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ Экспериментальные исследования РСС, результаты которых представлены в данном препринте, проводились на среднеширотном низкочастотном приемном пункте, который был создан для точных измерений в УНЧ ( $f \sim 0,01-10$  Гц) и СНЧ-ОНЧ ( $f \sim 10^{-2}-10^2$  кГц) диапазонах. Этот пункт расположен примерно в 100 км к востоку от Нижнего Новгорода (географическая широта -  $57^\circ$  с.ш., долгота -  $45^\circ$  в.д.,  $L=2,65$ ) и имеет достаточно низкий уровень промышленных помех. Пункт предназначен для измерений как естественных излучений, так и искусственных низкочастотных сигналов, генерируемых нагревным стендом "Сура", расположенным в 30 км от приемного пункта.

Измерительное оборудование пункта:

1. Базовый индукционный двухкомпонентный широкополосный экранированный магнитометр с чувствительностью  $0,05$  пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 Гц (для измерения северо-южной  $H_{C-Ю}$  и восточно-западной  $H_{В-З}$  компоненты магнитного поля.)
2. Наземная заглубленная экранированная петля-рамка радиусом 250 м; число витков  $n = 18$  (вертикальная компонента магнитного поля  $H_Z$ ).
3. два ортогональных датчика теллурических токов, для измерения горизонтальных электрических полей ( $E_{C-Ю}$ ,  $E_{В-З}$ ).
4. Емкостный датчик вертикального электрического поля  $E_Z$ .
5. Набор рамочных антенн СНЧ-ОНЧ диапазонов ( $H_{C-Ю}$ ,  $H_{В-З}$ ).
6. Портативный двухкомпонентный индукционный магнитометр с чувствительностью  $0,1$  пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$  на частоте 1 Гц.
7. Многоканальный комплекс аналого-цифровой анализирующей и регистрирующей аппаратуры.
8. Персональный компьютер IBM AT 486 DX 50 HDD 520 с многоканальным АЦП (200 кГц) и стриммером с емкостью ленты 120 Мбт Jumbo-120. Программное обеспечение для спектрального, корреляционного и когерентного анализов входных сигналов.

Методика обработки данных заключалась в усреднении неза-

висимых спектральных реализаций с необходимым для выделения структуры разрешением по частоте  $\sim \Delta f = 0,1$  Гц. Как правило, усреднение проводилось для числа реализаций  $n = 64 \div 128$  (анализаторы спектра СКЧ-72,  $\tau = (10 \div 20)$  мин.,  $\tau$  – время усреднения), что позволяет понизить дисперсию флюктуаций огибающей спектра до  $\sim 1/\sqrt{n} \simeq (10 \div 15)\%$  и четко регистрировать наблюдаемый эффект.

$\Delta F(\Gamma_{II})$

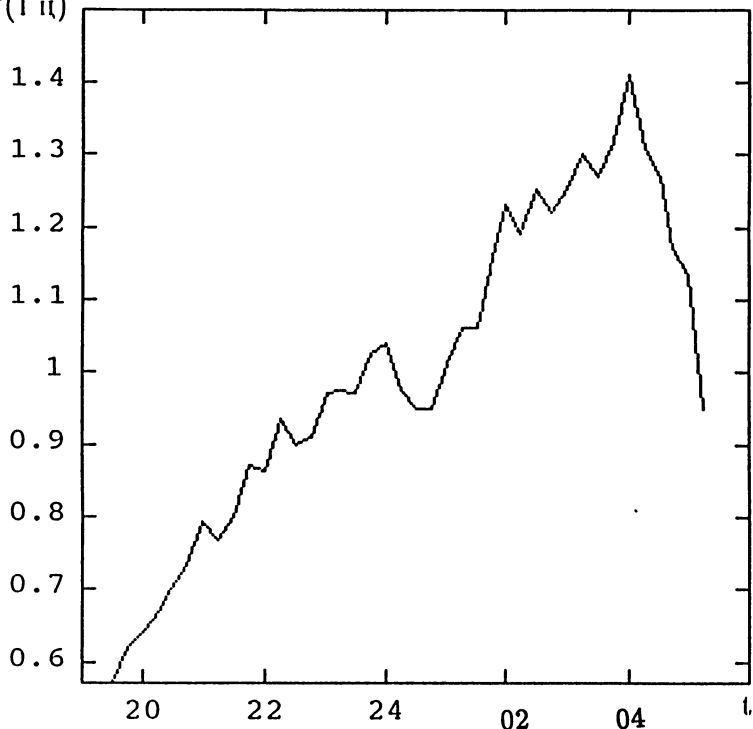


рис.1 Суточный ход резонансной частоты  $\Delta F$  низкочастотного электромагнитного шума, 4-5 апреля 1995 г.

**3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ** В настоящей работе использовались данные многолетнего ряда наблюдений РСС в средних широтах, проведенных в с 1985 г. по 1995г. для двух ортогональных компонент магнитного поля  $H_{C-Ю}(H)$  и  $H_{B-З}(D)$ . Анализ

результатов проводился методом глазомерной оценки усредненных спектральных форм шума, регистрация которых при выводе данных на двухкоординатный графопостроитель проводилась с интервалом времени  $10 \div 20$  мин.

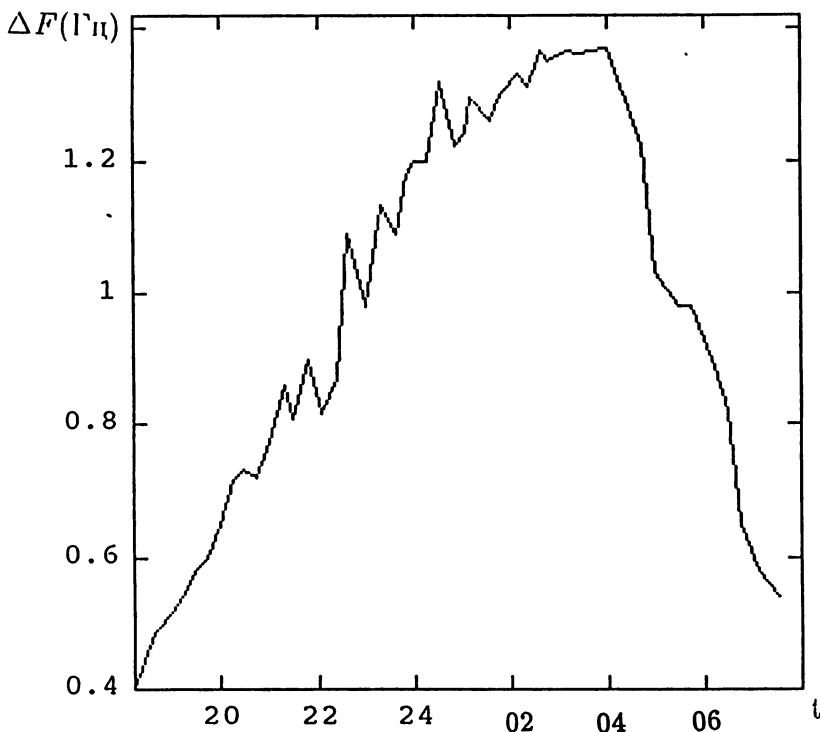


рис.2 Суточный ход резонансной частоты  $\Delta F$  низкочастотного электромагнитного шума, 3-4 октября 1993 г.

При этом считалось, что РСС присутствует, если наблюдается явная гармоническая форма модуляции спектра шума.

На рис. 1 и 2 приведены временные зависимости резонансной частоты атмосферного шумового фона для периодов наблюдений 4-5 апреля 1995 г. ((4-5).04.95) и 3-4 октября 1993г. ((3-4).10.93). На графиках отчетливо видны вариации частоты  $\Delta F$ , которые

появляются в заходные часы. Для установления факта существования волновых возмущений был использован спектральный метод анализа данных.

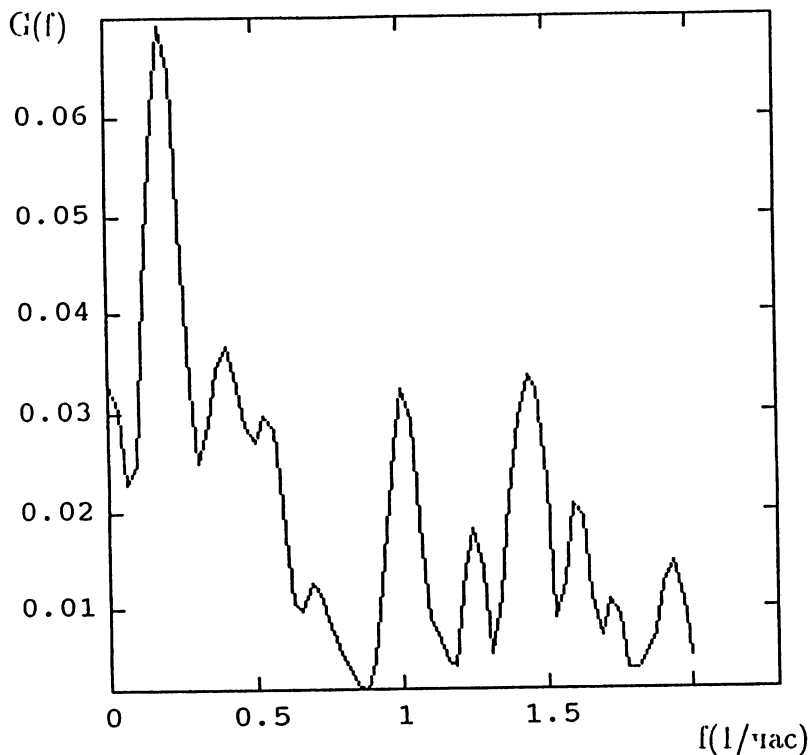


рис.3 Спектр амплитуды вариаций  $\Delta F$  для периода наблюдений (4-5).04.95

На рис.3 приведен спектр амплитуды вариаций  $\Delta F$  для периода наблюдений (4-5).04.95. Перед спектральной обработкой устранялся низкочастотный тренд с периодами  $\geq 8$  час. Мелкопериодным вариациям, которые хорошо видны на рис.1, соответствуют спектральные максимумы с периодами  $\sim 1$  часа и 40 мин. Относительная амплитуда этих вариаций  $\Delta F$  колеблется в пределах (2-5)%.



4. ОБСУЖДЕНИЕ Как показано в [7,8], наиболее вероятной причиной формирования резонансной структуры является влияние резонансных свойств ионосферы (Ионосферного Альвеновского Резонатора) на грозовой электромагнитный шум. ИАР существует благодаря наличию в ионосфере двух областей (по высоте) нарушения геометрической оптики для альвеновских волн в диапазоне частот  $\sim 0.1-10$  Гц: в нижней ионосфере (высоты  $\sim 100$  км) и в области выше максимума F-слоя на спаде альвеновского показателя преломления (высоты  $\sim 1000-2000$  км). Спектр собственных частот ИАР довольно сложно выражается через параметры E и F-слоев ионосферы. Анализ теоретических исследований, проведенный в работах [11,12] позволит нам воспользоваться упрощенной формулой для собственных частот ИАР, которая будет приведена ниже. В этих работах установлено, что солнечный терминатор может служить источником волновых возмущений как на высотах E-слоя ионосферы, так и на высотах F-слоя и выше. Волновые возмущения, генерируемые на высотах  $\sim 120$  км имеют горизонтальные масштабы  $L_x \sim 100 - 150$  км, вертикальные масштабы  $L_z \sim 15 - 20$  км, периоды  $T \sim 5$  мин. [11]. В области F-слоя ионосферы на высотах  $\geq 200$  км терминатор может генерировать внутренние гравитационные волны с  $L_x \sim 1000$  км и  $T \geq 30$  мин., кроме того на высотах 300-600 км могут генерироваться модифицированные ВГВ ( $L_z \sim 200$  км), характер которых определяется не только нейтральным ветром, создаваемым терминатором (как это происходит на высотах E-слоя), но и магнитоионным торможением [12]. Поэтому вариации  $\Delta F$  с периодами  $T \sim 1$  часа и 40 мин. скорее всего могут быть связаны с ВГВ, генерируемыми на высотах F-слоя ионосферы и выше с характерными  $L_z \geq 100$  км. В этом случае (генерация на высотах F-слоя, масштабы возмущений сравнимы с эффективной толщиной F-слоя) можно пользоваться упрощенной формулой для собственных частот ИАР:

$$f_k = k \frac{c}{2n_a L} \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света,  $L$  – эффективная толщина F-слоя,  $n_a$  – альвеновский показатель преломления на высоте максимума F-слоя. В свою очередь  $n_a$  выражается следующей формулой:

$$n_a = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{H_0} \sim N_e^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

где  $H_0$  – напряженность земного магнитного поля,  $\rho$  – плотность плазмы,  $N_e$  – электронная концентрация. Как следует из (1) и (2) вариации  $\Delta F$  могут быть связаны с вариациями электронной плотности в F-слое ионосферы. Поскольку вариации  $\Delta F$  появляются в заходные часы, мы можем говорить о влиянии солнечного терминатора на волновые возмущения в ионосфере, а именно рассматривать терминатор, как источник для ВГВ, приводящих к возмущениям электронной концентрации. Экспериментальное исследование волновых возмущений, возникающих во время прохождения солнечного терминатора, проводилось и раньше ионограмным и доплеровским методами [9,10]. При ионограмном методе существенное увеличение амплитуды возмущений наблюдается редко, так как чувствительность этого метода мала. В то же время доплеровские записи часто показывают увеличение амплитуды колебаний  $N_e$  на периодах  $\sim 30$  мин. [10].

Как следует из выше сказанного, ВГВ, имеющими  $L_z > 100$  км и  $T \geq 30$  мин. источником которых является солнечный терминатор, могут приводить к вариациям  $\Delta F$ , полученным при обработке спектров низкочастотного электромагнитного шума, т.е. регистрироваться методом ИАР, при этом область генерации этих волн находится на высотах F-слоя и выше. Как следует из (1) и (2) относительная амплитуда вариаций  $\Delta F - \delta(\Delta F) = \Delta N_e / 2N_e$ . Таким образом для генерации вариаций  $\Delta F$  с относительной амплитудой (2-5)% необходимы достаточно интенсивные ВГВ, которые приводят к возмущениям электронной плотности с  $\Delta N_e / N_e \sim (5 - 10)\%$ . Волновые возмущения с такими  $\Delta N_e / N_e$  наблюдаются достаточно часто [1]. Оценим пространственные масштабы ВГВ, которые могут приводить к вариациям

$\Delta F$  с наблюдаемыми периодами  $\sim 40$  мин. и 1 часа после прохождения солнечного терминатора, исходя из следующих простых соображений – дисперсионное соотношение для ВГВ, генерируемых терминатором имеет следующий вид:  $\omega = k_x v_0$ , где  $v_0$  – скорость движения терминатора на высоте F-слоя ионосферы ( $h$ );  $v_0 = \omega_3(R_3 + h)$ ,  $\omega/\omega_B = k_x/k_z = \lambda_z/\lambda_x$ , где  $\omega_B$  – частота Бранта-Вяйсяля,  $R_3$  – радиус Земли,  $\omega_3$  – частота вращения Земли. Для наблюдаемых периодов отношение  $\omega/\omega_B \sim 0,25$  и  $0,15$ , отсюда мы получаем следующие значения  $L_x \sim 1000$  км и  $1600$  км,  $L_z \sim 250$  км и  $240$  км. Значения  $L_x$  и  $L_z$  получились завышенными из-за грубой оценки  $v_0$ . Более точные расчеты  $v_0$  приведены в [5].

В настоящем препринте приведены первые данные по регистрации вариаций собственных частот атмосферного шумового фона. В дальнейшем необходимо провести статистический анализ полученных данных с целью выявления, например, зависимости появляемости вариаций  $\Delta F$  от сезона (временные периоды, далекие и близкие к равноденствию), провести сравнение описанного выше метода ИАР с данными о присутствии ВГВ в ионосфере, полученными другими методами за те же периоды наблюдений.

Исследования были проведены при поддержке РФФИ в рамках Гранта N 96-02-18632, N 97-02-17298.

ЛИТЕРАТУРА 1. Дробжев В.И., Куделин Г.М., Нургожин В.И. и др., Волновые возмущения в ионосфере, 1975, Алма-Ата, "Наука" с.7–17.

2. Oliver W.L., Fukao S., Sato M. et. al., Middle and upper atmosphere radar observations of the dispersion relation for ionospheric gravity waves, J. Geophys. Res., v.100, N A12, p. 23,763–23,768, 1995.

3. Bristow W.A. and Greenwald R.A., Multiradar observations of medium – scale acoustic gravity waves using the Super Dual Auroral Radar Network, J. Geophys. Res., v.101, N A11, p. 24,499–24,511, 1996.

4. Saksman E., Nygren T., Markkanen M., Ionospheric structures

invisible in satellite radiotomography, *Radio Sci.*, v.32, N 2, p. 605–616, 1997.

5. Сомсиков В.М., Солнечный терминатор и динамика атмосферы, Алма-Ата, "Наука", 1983.

6. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю., Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций, *ДАН СССР*, 1987, 297, с. 840-843.

7. Beljaev P. P., Poljakov S. V., Rapoport V. O., Trakhtengerts V. Yu., The ionospheric Alfen resonator, *J. Atm. Terr. Phys.*, 1990, 52, p. 781–787.

8. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю., Теория формирования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций, *Изв. вузов, Радиофизика*, 1989, 32, с.802.

9. Авакян С.В., Дробжев В.И., Краснов В.М., Волны и излучения верхней атмосферы, Алма-Ата, 1981, с.168.

10. Авакян С.В., Дробжев В.И., Краснов В.М., О влиянии терминатора на волновые возмущения в ионосфере, *Геомагнетизм и аэрономия*, 1979, т.19, с.568–570.

11. Сомсиков В.М., Троицкий Б.В., Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора, *Геомагнетизм и аэрономия*, 1975, т. 15, с. 856–860.

12. Водяников В.В., Сомсиков В.М., Волны, генерируемые в верхней ионосфере стационарным движущимся источником, *Изв. вузов Радиофизика*, 1982, т.25, с.855–859.