УДК: 551.510 DOI: 10.26907/rwp29.2025.603-606

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО И СЛАБОНАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА МНОГОПОЗИЦИОННОМ ЛЧМ-ИОНОЗОНДЕ ИСЗФ СО РАН

**И.А. Зотова, А.В. Ойнац**

*Институт солнечно – земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

*E-mail: zotova@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Работа носит методический характер и посвящена моделированию характеристик КВ-сигналов, наблюдаемых на многопозиционном ЛЧМ-ионозонде в режиме диагностики параметров перемещающихся ионосферных возмущений.

**Ключевые слова:** перемещающиеся ионосферные возмущения; внутренние гравитационные волны

# NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECTS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES BASED ON VERTICAL AND QUASI-VERTICAL SOUNDING BY THE ISTP SB RAS MULTIPOINT CHIRP IONOSONDE

**I.A. Zotova, A.V. Oinats**

**Abstract.** The work is of a methodological nature and is devoted to simulation of HF wave characteristics observed by multipoint chirp ionosonde in the mode of diagnostics of traveling ionospheric disturbances.

**Keywords:** travelling ionospheric disturbances; gravity waves

## Введение

Развитие методов мониторинга перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) является актуальной задачей. Диагностика ПИВ позволит в перспективе оперативно оценивать их влияние на радиосвязь, радионавигацию и радиолокацию. С другой стороны, она даст возможность лучше понять физику самих возмущений и их источников. В ИСЗФ СО РАН для мониторинга динамики ионосферы разработан многопозиционный ЛЧМ-ионозонд, реализующий вертикальное (ВЗ) и слабонаклонное зондирование (СНЗ) на трех близко-расположенных трассах.

Целью доклада является разработка имитатора работы многопозиционного ЛЧМ-ионозонда, а также тестирование алгоритмов диагностики ПИВ.

## Модель ПИВ

Для математического моделирования ПИВ, распространяющихся в F2-слое ионосферы, используется модель внутренних гравитационных волн (ВГВ) в виде плоской волны [1], параметры которой определяются дисперсионным соотношением Хайнса [2]. Результирующие движения нейтрального газа на высотах ионосферы вызывают возмущения в фоновой плазме, дающие добавку к фазе волны и амплитудный множитель, зависящие от поглощения ВГВ, фоновой электронной концентрации и вектора геомагнитного поля.

Возмущения фоновой электронной концентрации в точке $\vec{r}$ в момент времени $t$ имеет вид

$$N_e'(\vec{r},t) = |N_e'|e^{(i\varphi)}, \quad (1)$$

где $|N_e'|$ и $\varphi$ – амплитуда и фаза возмущения. Выражение для фазы

$$\varphi = \omega t - \vec{k}\cdot\vec{r} + arctg\left[\frac{\sin I}{k_{br}}\left(\frac{1}{N_e}\frac{\partial N_e}{\partial z} + k_{iz}\right)\right], \quad (2)$$

где $\vec{k}$ и $\omega$ – волновой вектор и угловая частота возмущений, $I$ – наклонение магнитного поля, $k_{br}$ – реальная часть проекции волнового вектора на направление магнитного поля, $k_{iz}$ – мнимая часть вертикальной компоненты волнового вектора. При отсутствии поглощения $k_{iz} = 1/2H$, где $H$ – масштабная высота атмосферы. Амплитуда возмущения определяется выражением

$$|N_e'| = N_e U_b(z_0) e^{[k_{iz}(z-z_0)-Exp[k_{iz}(z-z_0)-1]]} \omega^{-1} \sin I \cdot \left[\left(\frac{1}{N_e}\frac{\partial N_e}{\partial z} + k_{iz}\right)^2 + \left(\frac{k_{br}}{\sin I}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где $N_e$ – фоновая электронная концентрация, $U_b(z_0)$ – проекция скорости нейтрального газа на направление магнитного поля, $z_0$ – высота центра ВГВ. В отличие от [1] в (3) добавлено экспоненциальное затухание за счет постоянной динамической вязкости [3]. Вертикальная и горизонтальная компоненты волнового вектора ВГВ, $m$ и $k$, связаны дисперсионным соотношением Хайнса [2]

$$m^2 = k^2\left(\frac{\omega_b^2}{\omega'^2} - 1\right) + \frac{\omega'^2 - \omega_a^2}{C^2}, \quad (4)$$

где $\omega_b = \frac{\sqrt{\gamma-1}g}{C}$ – частота Брента–Вяйсяля, $H = C^2/\gamma g$, $\omega_a = C/2H$ – частота акустической отсечки, $C = \sqrt{\gamma RT/M}$ – скорость звука, $T$ – температура, $g$ – ускорение свободного падения, $M$ – молекулярная масса атмосферы, $R$ – универсальная газовая постоянная, $\gamma$ – отношение удельной теплоемкости сухого воздуха при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме. В формуле (4) $\omega'$ – это внутренняя частота ВГВ в системе координат горизонтального нейтрального ветра. Связь между наблюдаемой и внутренней частотой ВГВ определяется доплеровским смещением для заданного вектора нейтрального ветра $\vec{U}$

$$\omega' = \omega - \vec{k}\cdot\vec{U}. \quad (5)$$

Тестовые расчеты проводились для ВГВ с периодом 40 минут, горизонтальной длиной волны 200 км и азимутом направления распространения 150°. Центр ВГВ находится на высоте 170 км, вертикальная скорость нейтрального газа 2.5 м/с. Атмосферные и ионосферные параметры в (3) и (4) рассчитывались по моделям NRLMSISE и IRI-2020, а вектор геомагнитного поля по модели IGRF. Скорость нейтрального ветра (5) рассчитывалась по модели горизонтального нейтрального ветра HWM14. Все параметры рассчитывались для 5UT 02.01.2022. Производные параметры ВГВ на высоте центра составили: полная (вертикальная и горизонтальная) фазовая скорость 37.4 м/с (-41.9 м/с и 83.3 м/с), полная (вертикальная) длина волны 89.8 км (-100.6 км), внутренний период 22.1 мин, угол наклона волнового вектора к горизонтали -63.3°.

На рис. 1а показана динамика электронной концентрации в п. Торы, а на рис. 1б приведено ее пространственное распределение в плоскости волнового вектора. Черные линии соответствуют фазовому фронту ВГВ. Видно, что возмущение сосредоточено в интервале высот ~150-350 км. Амплитуда ПИВ соответствует 4%. Наклон фазового фронта ВГВ не совпадает с наклоном фронта ПИВ. Кроме того, фазовый фронт ПИВ не является плоским, его угол наклона зависит от высоты. На рис. 1в синей линией показана зависимость угла наклона волнового вектора ПИВ от высоты, а пунктиром соответствующий угол для ВГВ. Видно, что фазовый фронт ПИВ сильнее прижат к горизонтали, чем фронт ВГВ. Отличие составляет в среднем 2-3° и увеличивается с ростом высоты до максимума слоя, а далее уменьшается.

**Моделирование эффектов ПИВ на ВЧХ и ДЧХ**

Моделирование распространения радиоволн при ВЗ ионосферы для модельных возмущенных профилей электронной концентрации проводилось в приближении геометрической оптики и плоскослоистой ионосферы. Действующая высота отражения декаметрового сигнала рассчитывалась по формуле [4]

$$h' = c\frac{d}{df}\int_0^{h_r} f\cdot n(f,h)dh, \quad (6)$$

где $\mathrm{n}(f,h)$ – показатель преломления Эпплтона-Хартри без учета поглощения [4], $\mathrm{c}$ – скорость света в вакууме, $f$ – рабочая частота, $\mathrm{h_r}$ – геометрооптическая точка поворота $\mathrm{n}(f,\mathrm{h_r}) = 0$.

На рис. 2 сплошными линиями приведены расчетные ВЧХ для обыкновенной и необыкновенной компонент в случае возмущенных профилей электронной концентрации. Рис. 2а и 2б соответствуют фазам максимума и минимума возмущения соответственно. Пунктирная линия соответствует ВЧХ для невозмущенной ионосферы. Фиолетовой линией показан возмущенный профиль электронной концентрации. Из рис. 2 видно, что возмущение вносит вклад не только в значение критической частоты, но и искажает среднюю часть треков.

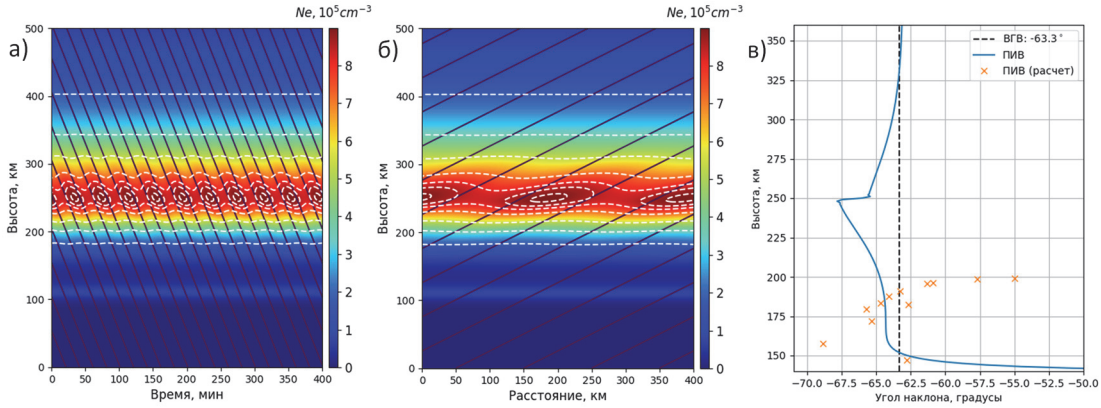


Рис. 1. Результаты расчета электронной концентрации: а) динамика вертикального профиля в п. Торы, б) пространственное распределение в плоскости волнового вектора, в) зависимость угла наклона волнового вектора от высоты: пунктир – угол наклона для ВГВ, синяя линия – угол наклона для ПИВ (локальный), крестики – результат расчета по методике

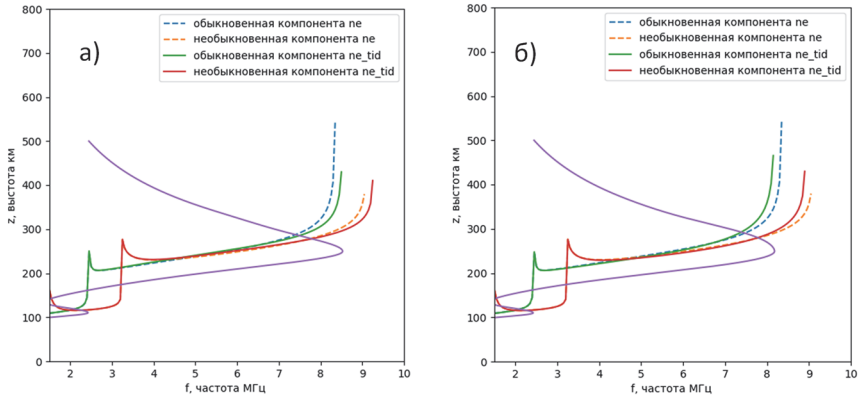


Рис. 2. ВЧХ для обыкновенной и необыкновенной компонент в максимуме (а) и минимуме (б) критической частоты для профиля электронной концентрации на рис. 1а. Пунктирной линией показаны ВЧХ для невозмущенного профиля

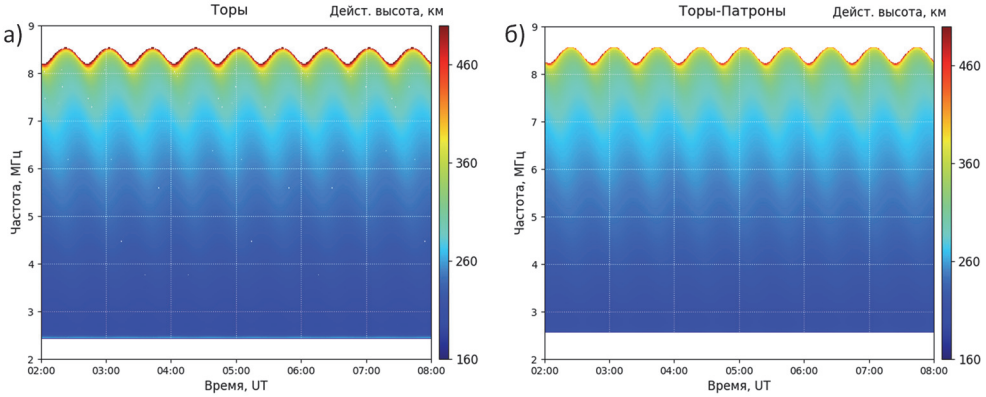


Рис. 3. Результаты расчета ВЧХ и ДЧХ: а) карта действующих высот при ВЗ п. Торы (для распределения на рис. 1а), б) карта действующих высот при СНЗ Торы – Патроны

На рис. 3а и 3б показаны карты действующих высот при ВЗ в п. Торы и СНЗ на трассе Торы-Патроны. Дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) при СНЗ ионосферы восстанавливались из ВЧХ для средней точки трассы методом Смита [4] с учетом дальности между передатчиком и приемником. На картах хорошо видны наклонные полосы увеличенной и пониженной действующей высоты, которые возникли из-за влияния возмущения. Вариации критической частоты и максимальной наблюдаемой частоты (в случае СНЗ), а также сами полосы, немного сдвинуты по времени на двух картах из-за разности фаз возмущения в соответствующих точках пространства.

Таблица 1. Результаты тестирования (Г – горизонтальная, В – вертикальная, П – полная)

| **Высота, км** | **Период, мин.** | **Угол наклона,°** | **Азимут, °** | **Фазовая скорость, м/с** | | | **Длина волны, км** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | **В** | **Г** | **П** | **В** | **Г** | **П** |
| 147.3 | 40.0 | -62.8 | 152.9 | -43.1 | 83.7 | 38.3 | -103.4 | 200.9 | 91.7 |
| 157.5 | 40.0 | -68.9 | 153.6 | -30.6 | 79.2 | 28.5 | -73.4 | 190.0 | 68.5 |
| 171.9 | 40.0 | -65.3 | 150.8 | -36.8 | 80.1 | 33.5 | -88.4 | 192.2 | 80.3 |
| 179.5 | 40.0 | -65.7 | 150.0 | -37.8 | 83.7 | 34.4 | -90.6 | 200.9 | 82.6 |
| 190.9 | 39.0 | -63.3 | 149.6 | -42.8 | 84.9 | 38.2 | -100.0 | 198.3 | 89.3 |
| 198.8 | 40.0 | -55.0 | 148.2 | -61.0 | 87.0 | 49.9 | -146.3 | 208.8 | 119.8 |
| **Все** | **39.5** | **-62.7** | **150.1** | **-43.7** | **83.9** | **38.5** | **-103.7** | **199.0** | **91.3** |

Разработанная технология моделирования эффектов ВГВ в данных многопозиционного ЛЧМ-ионозонда была использована для тестирования методики определения полного волнового вектора ПИВ (подробнее см. А.В. Ойнац и др. «Методика определения полного волнового вектора перемещающихся ионосферных возмущений по данным многопозиционного ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН» - текущий сборник). Для этой цели расчетные карты высот ВЗ в Торах и СНЗ на трассах Торы-Патроны, Усолье-Торы, Усолье-Патроны приводились к сетке, с которой получаются ионограммы на ЛЧМ-ионозонде (шаг сетки по высоте 1.25 км, по частоте 20 кГц). Карты подавались на вход программы расчета параметров ПИВ, результатом которой был набор параметров ПИВ для разных моментов времени и высот. Расчеты проводились для 16-ти значений фазы возмущения с охватом его полного периода.

В табл. 1 выборочно приведены средние за период значения параметров ПИВ в зависимости от высоты, а также средние по всем высотам (нижняя строка). В среднем все параметры возмущения определены достаточно точно. При этом «горизонтальные» параметры восстановлены точнее, чем «вертикальные». На рис. 1в крестиками отмечены углы наклона, полученные в результате тестирования. Как видим, на высотах выше 190 км углы наклона существенно отличаются от истинных. Возможных причин может быть несколько. Во-первых, сами по себе вертикальные параметры ПИВ меняются с высотой (см. рис. 1). Во-вторых, анализируемый в каждом расчете диапазон истинных высот ~10 км. Увеличение диапазона высот может способствовать улучшению стабильности определения угла наклона. Третья причина в том, что с увеличением высоты увеличивается влияние возмущения на результирующую задержку распространения радиоволны, поэтому высотная зависимость фаз ПИВ и вариаций действующих высот должны всё меньше коррелировать друг с другом.

## Заключение

В заключении отметим, что при расчетах, как высотного профиля возмущения, так и ВЧХ, используется большое количество приближений, в этом смысле методика, представленная в докладе, не претендует на получение детальной картины эффектов ПИВ в данных ВЗ и СНЗ. Однако, хоть и в упрощенном виде, она позволяет увидеть всю картину полностью и протестировать разрабатываемые алгоритмы диагностики возмущений.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Результаты получены с использованием оборудования ИСЗФ СО РАН, входящего в Центр коллективного пользования «Ангара» (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/).

## Список литературы

1. Hooke W.H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves // J. Atmos. Terr. Phys. – 1968. – Vol. 30. – P. 795–823.
2. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. – 1960. – Vol. 38. – P. 1441–1481.
3. Zhou Q. A simplified approach to internal gravity wave damping by viscous dissipation // J. Atmo. Terr. Phys. – 1995. – Vol. 57. – P. 1009.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973.