

УДК 519.237, 550.385.3

## ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОЛИТОНОВ ОГИБАЮЩЕЙ В ВАРИАЦИЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.В. Панасенко, Л.Ф. Черногор

## DETECTION AND ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF ENVELOPE SOLITON IN THE GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS

S.V. Panasenko, L.F. Chernogor

Применены алгоритмы теории оптимального обнаружения и оптимального оценивания для выявления экспериментально зарегистрированных вариаций горизонтальных компонент геомагнитного поля в виде солитонов огибающей на фоне гауссовского шума. Получены аналитические выражения для критерия обнаружения, вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала. Обнаружен солитоноподобный отклик в обоих горизонтальных компонентах геомагнитного поля в период сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. Показано, что период колебания был около 13 мин, его амплитуда составила 17.3 и 35.3 нТл для  $H$ - и  $D$ -компоненты соответственно.

The algorithms of optimal detection and optimal estimation theory were applied to detect experimentally recorded variations in horizontal components of geomagnetic field in the form of envelope solitons in the presence of Gaussian noise. The analytical expressions were obtained for detection criterion, the probabilities of false alarm and signal omission. The soliton-like response was detected in both horizontal components of geomagnetic field during the severe geospace storm on November 7–10, 2004. The oscillation period was shown to be near 13 min, its amplitude was equal to 17.3 and 35.3 nT for  $H$ - and  $D$ - component, respectively.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке эффективных устройств и методов генерации, приема и анализа нелинейных сигналов, которые описываются решением модельных нелинейных дифференциальных уравнений Бюргерса, Кортевега–де Вриза, Кадомцева–Петвиашвили и др. [Уизем, 1977]. Такие сигналы могут генерироваться высокоэнергичными процессами, происходящими на Солнце, в атмосфере и на Земле (выбросы корональной массы, геокосмические бури, циклоны, землетрясения, старты и полеты ракет, мощные взрывы, воздействие мощного радиоизлучения и т. д.), и служат их индикатором [Черногор, 2006].

При выявлении и оценке параметров нелинейных сигналов и процессов возникла необходимость введения оптимальных критериев, позволяющих с заданной вероятностью обнаруживать такой сигнал, с известными погрешностями оценивать его параметры и тем самым формализовать процедуру обнаружения и оценки. Применение классических и современных методов спектрального анализа (см. например, [Лазоренко и др., 2005; Черногор, 2008]) позволяет получить лишь качественную картину, поскольку решение о наличии сигнала часто принимается либо визуально, либо путем введения ряда субъективных критериев.

Целью настоящей работы является описание результатов применения статистического подхода, основанного на теории оптимального обнаружения и оптимального оценивания, к солитону огибающей, обнаруженному в вариациях горизонтальных компонент геомагнитного поля.

### Описание алгоритмов оптимального обнаружения и оценивания солитона огибающей

#### Модель солитона огибающей

Нелинейное уравнение Шредингера имеет вид (см., например, [Уизем, 1977])

$$i \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \beta v |v|^2 = 0,$$

где  $i$  – мнимая единица,  $v(t, x)$  – комплексная функция,  $t$  и  $x$  – безразмерные время и координата соответственно,  $\beta$  – безразмерный коэффициент. Одним из решений данного уравнения является солитон огибающей, выражение для действительной части которого при фиксированной координате имеет вид [Гуляев и др., 2011]

$$v(t) = \frac{A}{\operatorname{ch}[\alpha(t - \tau)]} \cos[\omega(t - \tau) - \varphi_0].$$

Здесь  $b = \sqrt{(u_1 - 2u_2)u_1}$ ,  $u_1$  и  $u_2$  – соответственно скорости распространения огибающей и фазы,  $A = b/\sqrt{2\beta}$ ,  $\alpha = bu_1/2$ ,  $\omega = u_1u_2/2$ ,  $\tau$  – временной сдвиг максимума  $A$ . По аналогии с узкополосными радиосигналами будем называть  $\varphi_0$  безразмерной начальной фазой, а  $\omega$  – безразмерной циклической частотой. Тогда  $T = 2\pi/\omega = 4\pi/(u_1u_2)$  является безразмерным периодом. В качестве длительности солитона огибающей  $t_s$  выберем интервал между двумя точками на временной оси, в которых огибающая уменьшается в  $e$  раз. Тогда  $t_s = 2vT \approx 3.32/\alpha$ ,  $v$  – число периодов, укладывающихся на половине длительности солитона огибающей [Гуляев и др., 2011].

### Характеристики обнаружения и оценивания параметров сигнала

В качестве критерия обнаружения солитона огибающей на фоне гауссовского белого шума возьмем величину

$$\tilde{Z} = \sqrt{\tilde{X}^2 + \tilde{Y}^2},$$

где

$$\tilde{X} = \sum_k a_k [X_k \cos(\omega_k \tau) + Y_k \sin(\omega_k \tau)],$$

$$\tilde{Y} = \sum_k b_k [X_k \sin(\omega_k \tau) - Y_k \cos(\omega_k \tau)],$$

$$a_k = \frac{\pi}{\alpha t_0} \left[ \operatorname{sch} \frac{\pi(\omega - \omega_k)}{2\alpha} + \operatorname{sch} \frac{\pi(\omega + \omega_k)}{2\alpha} \right],$$

$$b_k = \frac{\pi}{\alpha t_0} \left[ \operatorname{sch} \frac{\pi(\omega - \omega_k)}{2\alpha} - \operatorname{sch} \frac{\pi(\omega + \omega_k)}{2\alpha} \right],$$

$X_k$  и  $Y_k$  – оценки амплитуд квадратурных составляющих сигнала  $x(t)$  [Гуляев и др., 2011]. Выражения для вероятностей ложной тревоги  $p_{fa}$  и пропуска сигнала  $p_{so}$  при этом примут вид

$$p_{fa} = \exp\left(-\frac{k_A^2}{2\kappa\mu}\right),$$

$$p_{so} = \Theta\left(\frac{k_A}{\sqrt{\kappa\mu}}, \sqrt{\frac{mq}{2\mu}}\right),$$

$$\Theta(u, v) = \int_0^u \xi \exp\left(-\frac{\xi^2 + v^2}{2}\right) I_0(\xi v) d\xi,$$

где  $I_0$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка,  $\mu = t_0 / t_s$ ,  $t_0$  – интервал времени наблюдения,  $k_A = \alpha Z_{th} / A_n$ ,  $Z_{th}$  – пороговое значение  $\tilde{Z}$ ,  $A_n$  – амплитуда гармоник белого шума,  $q$  – отношение сигнал/шум [Гуляев и др., 2011].

Оптимальные оценки параметров  $\tau$  и  $\nu$  можно получить через максимум функции  $\Lambda(\tau, \nu) = \alpha(\nu)\tilde{Z}^2(\tau, \nu)$ . Оптимальные оценки других параметров получим из выражений [Гуляев и др., 2011]

$$\varphi_0 = \arctg\left(\frac{\tilde{Y}}{\tilde{X}}\right), \beta = \frac{1}{2\omega\tilde{Z}^2},$$

$$\alpha = \frac{\kappa}{\nu T}, A = \alpha\tilde{Z},$$

где  $\kappa \approx 1.66$ .

### Результаты анализа магнитометрических сигналов

Были проанализированы временные вариации  $H$ - и  $D$ -компонент геомагнитного поля, полученные с помощью магнитометра-флюксметра ХНУ им. В.Н. Каразина (географические координаты 49°39' N, 36°56' E, геомагнитные координаты +45°20' широты и 119°20' долготы), в течение геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. Эта буря относилась к крайне сильным по классификации [Черногор, 2006]. Максимальное значение  $K_p$  равнялось 9, минимальный  $D_{st}$ -индекс составил –383 нТл. Некоторые сведения о геокосмической обстановке приведены на рис. 1. Более подробное описание космической погоды в период данной бури изложено в работе [Панасенко, Черногор, 2007].

В интервале времени 18:00–23:00 UT 9 ноября 2004 г. были зарегистрированы солитоноподобные вариации обоих горизонтальных компонент геомагнитного поля. Результаты анализа этих вариаций с использованием описанных выше алгоритмов представлены на рис. 2, а, оцененные параметры сигналов приведены в таблице. Как видно из рисунка, нами действительно был зарегистрирован солитон огибающей, который имел место практически в одно и то же время (около 20:30 UT) как в  $H$ -, так и в

Параметры выявленных солитонов огибающей

Параметр	$H$ -компонента	$D$ -компонента
$T$ , мин	13	13
$\tau$ , UT	20:31	20:26
$\nu$	3.0	1.9
$A$ , нТл	17.3	35.3

$D$ -компоненте. Из таблицы видно, что период солитона огибающей был одинаковым для обеих компонент. Его длительность для  $H$ -компоненты была больше, а амплитуда – меньше, чем для  $D$ -компоненты геомагнитного поля.

### Обсуждение

Использование алгоритмов теории оптимального обнаружения и оптимального оценивания путем введения вероятностных критериев позволило автоматизировать обнаружение и оценку параметров сигналов и практически полностью исключить субъективизм при принятии решений. Это очень важно при решении ряда радиофизических и геофизических задач.

Описанные алгоритмы давно и успешно используются при анализе квазигармонических радиосигналов, для которых удалось получить сравнительно простые точные выражения для критерия обнаружения, вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала (см., например, [Гришин и др., 1990]). Однако, как показано в работе [Трифонов, Руднев, 2009], уже для сигналов с огибающей, зависящей от времени, нахождение точных выражений этих характеристик связано с численным решением интегральных уравнений, что затрудняет обработку в режиме реального времени. Нами получены приближенные выражения характеристик обнаружения и оценки параметров солитона огибающей. Это дало возможность не только получить их в аналитическом виде и существенно сократить время вычислений, но и использовать те же устройства обнаружения и оценки, что и для радиосигналов, основанные на квадратурном приеме.

Применение этих алгоритмов к экспериментальным данным продемонстрировало их эффективность. С их помощью удалось идентифицировать солитоны огибающей и при этом отфильтровать визуально похожий на солитон огибающей сигнал, который имел место в вариациях  $H$ -компоненты около 23:00 UT (см. рис. 2).

Обнаруженные сигналы, скорее всего, имеют один источник происхождения. Некоторые различия в их параметрах можно объяснить анизотропным распространением колебаний геомагнитного поля во взаимно-перпендикулярных направлениях. Эти сигналы наблюдались на фоне существенных вариаций параметров частиц солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Они, скорее всего, вызваны увеличением притока энергии в магнитосферу Земли.

### Выводы

1. Описана теоретическая модель и приведено совместное решение задач оптимального обнаружения и оптимального оценивания для солитона огибающей.

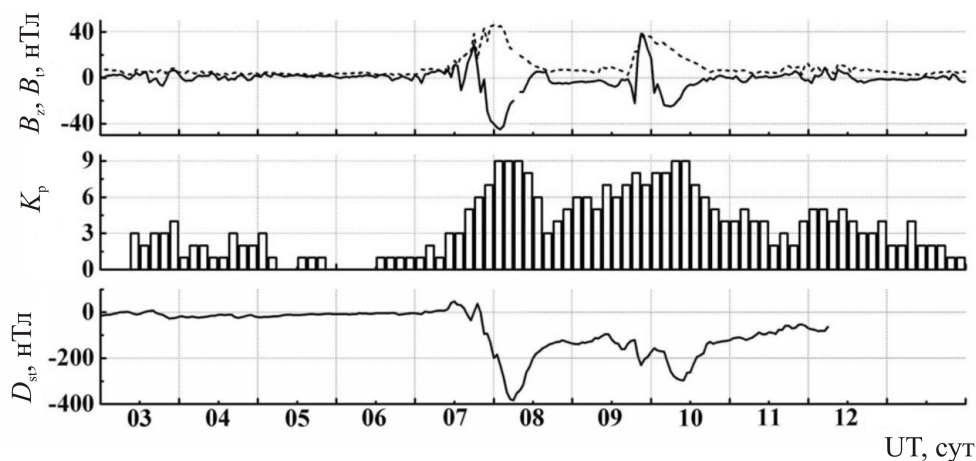


Рис. 1. Временные зависимости  $B_z$  и  $B_t$  ММП, а также  $K_p$ - и  $D_{st}$ -индексов в течение 3–13 ноября 2004 г.

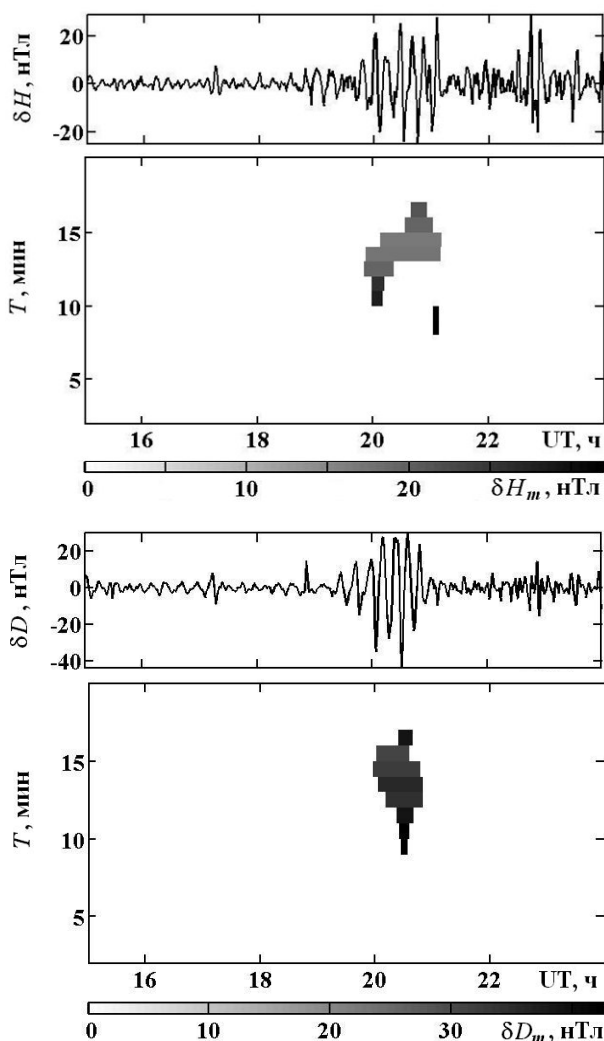


Рис. 2. Результаты применения к вариациям  $H$ -компоненты (а) и  $D$ -компоненты (б) геомагнитного поля алгоритмов теории оптимального обнаружения и оптимального оценивания параметров сигнала.

2. Получены аналитические выражения для характеристик обнаружения, вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала, а также оценок основ-

ных параметров солитона огибающей.

3. Выявлены и оценены параметры геофизических солитоноподобных процессов, сопровождавших сильнейшую геокосмическую бурю 7–10 ноября 2004 г., во временных вариациях флуктуаций  $H$ - и  $D$ -компонент геомагнитного поля.

4. На основании полученных оценок сделано предположение о едином источнике происхождения наблюдаемых солитонов огибающей и анизотропном распространении геомагнитных колебаний. Они, скорее всего, вызваны увеличением притока энергии в магнитосферу Земли.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуляев Ю.В., Панасенко С.В., Потапов А.А., Черногор Л.Ф. Оптимальное обнаружение и оптимальное оценивание параметров солитона огибающей // Доклады академии наук. 2011. Т. 436, № 5. С. 606–610.

Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. и др. Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1990. 496 с.

Лазоренко О.В., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10, № 10. С. 39.

Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Проявления геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47, № 5. С. 646–658.

Трифонов А.П., Руднев П.Е. Обнаружение сверхширокополосного квазирегионального сигнала на фоне случайного шума // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 749–760.

Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977. 624 с.

Черногор Л.Ф. Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655–697.

Черногор Л.Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 5. С. 681–702.

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков