

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАСТУПЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ БУРИ ПО ДАННЫМ ОЦЕНОК ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.С. Шапкин

ОИПИ НАН Беларуси

al_shapkin@newman.bas-net.by

Процессы, происходящие в ионосфере, взаимосвязаны с геофизическими полями, в частности с внешним магнитным полем Земли. Так, вспышки на Солнце помимо ионизации верхней атмосферы Земли приводят к многочисленным геофизическим последствиям: магнитным бурям, полярным сияниям и т.д. Изменение геомагнитного поля оказывают влияние на жизнедеятельность человека, в том числе на функционирование аппаратуры и систем связи. Для прогноза сильных возмущений, влияющих на технологические системы, важно иметь представление о повторяемости и характерных особенностях возмущений магнитного поля. Целью работы является анализ взаимосвязи оценок полного электронного содержания (ПЭС) и величины полного вектора индукции (ПВИ) внешнего магнитного поля, что представляет интерес для мониторинга ситуации вокруг критически важных объектов, таких как АЭС, ЛЭП и т.д.

Основной характеристикой при изучении ионосферы является ПЭС, определяемое как интеграл от электронной плотности по пути распространения волны с поперечным сечением 1 м^2 между спутником и наземной станцией:

$$TEC = \int_{L_0}^L n_e(l) dl, \quad (1)$$

где L_0 и L – нижняя и верхняя точки прохождения ионосферы; $n_e(l)$ – электронная концентрация на трассе l .

Проводя измерения спутниковых радиосигналов на двух различных частотах, можно получить оценки ПЭС по дальностным и фазовым измерениям [1]. ПЭС, рассчитанное по фазовым измерениям, обеспечивает высокую точность, но является относительным, а рассчитанное по дальностным измерениям позволяет получить абсолютное значение, но с большой шумовой составляющей и с частотнозависимой дифференциальной кодовой задержкой (ДКЗ) аппаратуры спутника и приемника [1]. Для получения оценки абсолютного ПЭС был синтезирован алгоритм [2] на основании результатов двухчастотных фазовых и дальностных измерений, упрощенная схема которого представлена на рисунке 1.

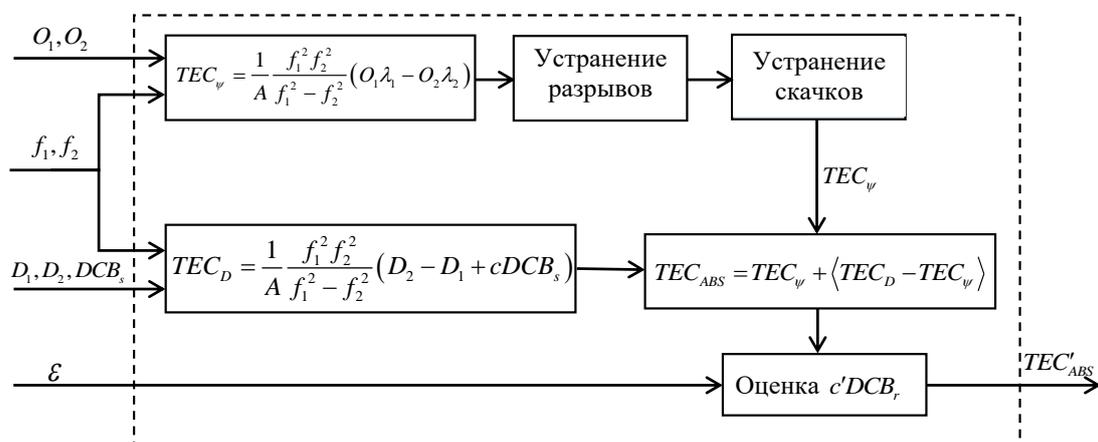


Рисунок 1 – Упрощенная блок-схема алгоритма оценки абсолютного ПЭС

Используя данный алгоритм, был получен график вертикального ПЭС за полгода наблюдений (рисунок 2).

В то же время, Национальной системой мониторинга окружающей среды Республики Беларусь регистрируются изменения во времени горизонтальных (x и y) и вертикальной (z) составляющих ПВИ внешнего геомагнитного поля. Для анализа будем использовать величину ПВИ магнитного поля:

$$V = |\vec{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (2)$$

где \vec{B} – ПВИ магнитного поля.

График величины ПВИ за полгода наблюдений представлен на рисунке 2.

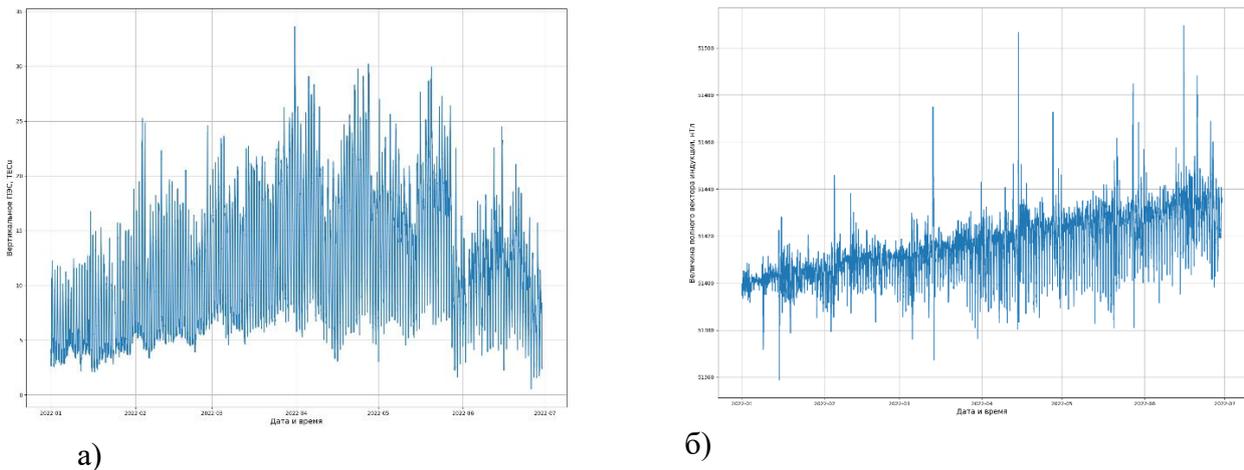


Рисунок 2 – Графики полугодовых наблюдений: а) вертикальное ПЭС; б) величина ПВИ

Получим график зависимости коэффициента корреляции Пирсона от времени задержки ПВИ, представленный на рисунке 3.

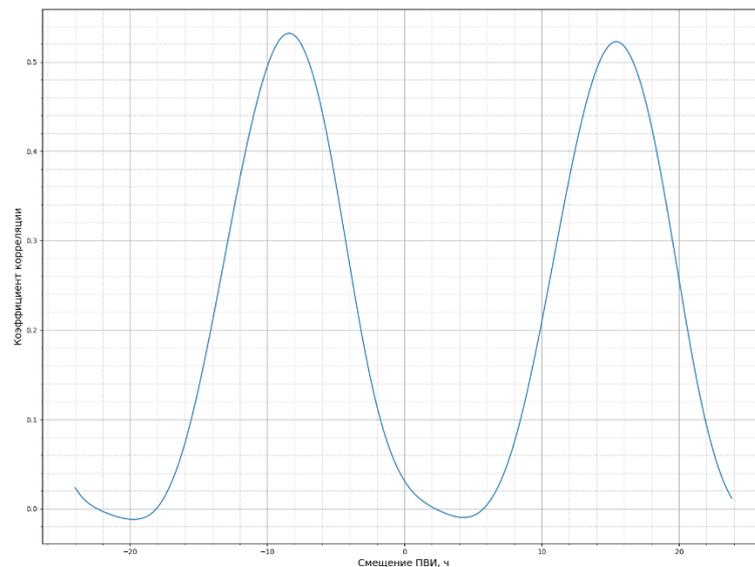


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента корреляции от времени задержки

Можно видеть, что наибольшая корреляция достигается при смещении ПВИ, равным 8 часам 20 минутам, то есть что изменения ПЭС предшествуют значениям ПЭС на 8 часов 20 минут. Оценим вероятность возникновения магнитной бури при существенном изменении ПЭС.

С одной стороны, разделим дни наблюдения ПЭС на две группы: условно «возмущенные» и «спокойные». Найдем значение скользящего среднего вертикального ПЭС по $(M-1)$ предшествующим значениям для определенного момента времени t :

$$\overline{VTEC}(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} VTEC(t - i\Delta t), \quad (3)$$

где $\Delta t = 24$ ч; M – размер окна скользящего среднего.

Для детектирования «возмущенности» будем использовать отклонение критической частоты от скользящего среднего, как предложено в [3]:

$$\delta VTEC = \frac{VTEC - \overline{VTEC}}{\overline{VTEC}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Будем считать, что в определенный день наблюдается «возмущенная» ионосфера, если в любой момент времени отклонение (4) $\delta VTEC > h_1$ или $\delta VTEC < h_2$, где h_1, h_2 – некоторые заданные пороговые значения.

С другой стороны, Центром геофизического мониторинга НАН Беларуси предоставлена информация о зафиксированных магнитных бурях, в том числе о дате и времени начала бурь и их конце. Будем считать, что магнитная буря предсказана правильно, если в день «возмущения» ионосферы или до 12 часов следующего дня зафиксирована магнитная буря.

Проведем измерения вероятности наступления магнитной бури при фиксации «возмущения» ионосферы p_1 , вероятности того, что зафиксированная магнитная буря была предсказана заранее p_2 и произведение указанных вероятностей p , обозначающую долю правильно фиксируемых магнитных бурь вышеописанным методом. Для этого проведем эксперименты для параметров M, h_1, h_2 изменяемых по следующим правилам:

$$\begin{aligned} M &= \overline{2,30}; \\ h_1 &= 40 + 2,5i, i = \overline{0,7}; \\ h_2 &= -60 + 2,5j, j = \overline{0,7}. \end{aligned} \quad (5)$$

На рисунке 4 представлены зависимости вероятностей от величины окна M для лучших комбинаций h_1 и h_2 .

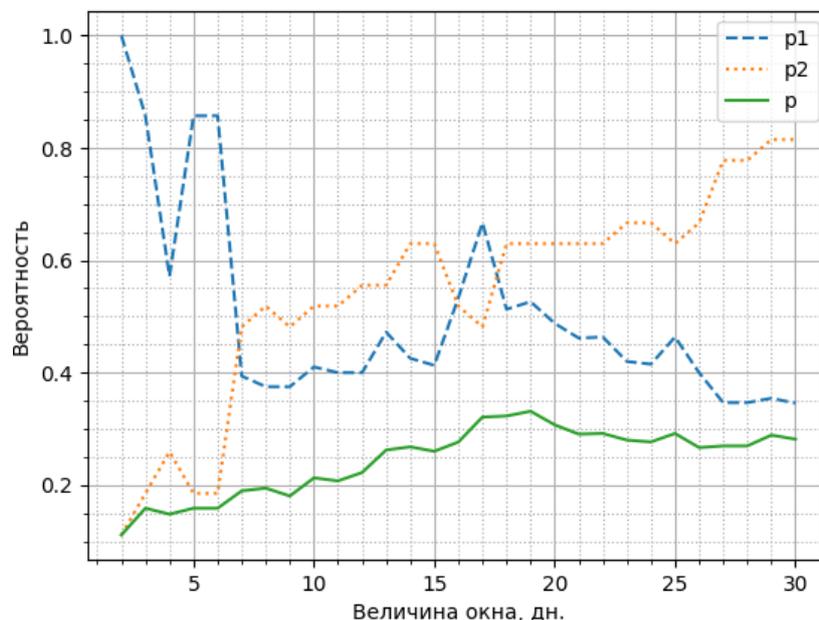


Рисунок 4 – Зависимость вероятностей p_1, p_2, p от величины окна

Из рисунка можно сделать вывод, что наибольшая доля правильно предсказываемых магнитных бурь достигается при $M = 19$. Значения вероятностей и параметров для этого случая приведены в таблице 1.

Таблица 1

| p | p_1 | p_2 | M | h_1 | h_2 |
|-------|-------|-------|-----|-------|-------|
| 0,331 | 0,559 | 0,593 | 19 | 47,5 | -50 |

То есть, после превышения отклонения ПЭС выше заданных пороговых значений с вероятностью 0,559 можно утверждать, что наступит магнитная буря. Таким образом можно предсказать 59,3% от общего числа зафиксированных магнитных бурь.

Таким образом, в работе были собраны измерения ПВИ геомагнитного поля и оценки ПЭС, рассчитанные по алгоритму [2] за полгода наблюдений. График корреляционной функции дает основание полагать, что изменения ПЭС предшествуют изменениям магнитного поля. Получено значение вероятности наступления магнитной бури после детектирования сильного возмущения ПЭС $p = 0.559$, что может быть использовано для дальнейшего построения предсказательных моделей магнитных бурь и других природных событий.

Список литературы:

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
2. Шапкин А.С., Потапов К.О. Алгоритм оценки полного электронного содержания ионосферы // Вычислительные технологии и прикладная математика: Материалы II Международного семинара (12-16 июня 2023 г., Благовещенск). Благовещенск: Изд.-во Амурского гос. Университета, 2023. С. 225–228.
3. Прогноз землетрясений возможен?! / С.А. Пулинец, Д.П. Узунов, Д.В. Давиденко [и др.]. М.: Тривант, 2014. 144 с.