

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.01.068>УДК 550.2, 555.385.2,  
550.385.4

PACS number: 94.30.Ms

М. И. РЯБОВ<sup>1</sup>, А. Л. СУХАРЕВ<sup>1</sup>, М. И. ОРЛЮК<sup>2</sup>,  
Л. И. СОБИТНЯК<sup>1</sup>, А. А. РОМЕНЕЦ<sup>2</sup><sup>1</sup> Обсерватория “УРАН-4”, Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Пушкинская 37, г. Одесса, 65011, Украина  
E-mail: ryabov-uran@ukr.net<sup>2</sup> Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины,  
пр. Палладина, 32, г. Киев, 03142, Украина  
E-mail: earth@igph.kiev.ua

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНОЙ ВОЗМУЩЕННОСТИ В ЗОНЕ ОДЕССКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Предмет и цель работы: *Изучаются основные периоды колебаний уровня возмущенности геомагнитного поля в зоне Одесской магнитной аномалии по данным наблюдений в геомагнитной обсерватории “Одесса” в 24-м цикле солнечной активности. Целью работы является поиск различий и подобия в проявлении и свойствах кратковременных и долговременных геомагнитных квазипериодических колебаний в условиях аномального в геомагнитной обсерватории “Одесса” и слабоаномального в геомагнитной обсерватории “Киев” геомагнитного поля.*

Методы и методология: *Использовались данные цифровых магнитометров с высоким временным разрешением. Поиск периодов колебаний выполнялся с помощью быстрого непрерывного вейвлет-преобразования и кратковременного фурье-преобразования (STFT). Для выделения и последующего раздельного анализа колебаний, соответствующих разным периодам и спектральным областям, применялась полосовая фурье-фильтрация.*

Результаты: *Определено изменение периодов солнечно-суточных вариаций геомагнитного поля (24, 12, 8, 6 ч) во время магнитных бурь. Самые короткие периоды, 2 ч и меньше, проявлялись в данных геомагнитной обсерватории “Одесса”. По наблюдениям в обсерватории “Одесса” отмечается увеличение амплитуды коротких периодов (4 ÷ 5 ч) со временем в течение 2008–2013 гг. Колебания с периодами 6, 8 ч реагируют на геомагнитные возмущения плавным увеличением амплитуды. Периоды 4 ÷ 5 ч регистрируются во время сильных магнитных бурь, а слабые колебания с периодами меньше 4 ч часто возникают во время слабых магнитных бурь. Период около 27 сут преобладает в данных геомагнитной обсерватории “Киев”, и около 37 сут – в данных геомагнитной обсерватории “Одесса”. Определены изменения амплитуды солнечно-суточных вариаций геомагнитного поля в течение 2015 г. по данным обсерватории “Одесса” для последующего сравнения с проявлениями солнечной активности.*

Заключение: *Обобщение результатов показывает отличия в проявлении основных периодов геомагнитной активности в зоне Одесской магнитной аномалии (обсерватория “Одесса”) и в условиях слабоаномального геомагнитного поля (обсерватория “Киев”). В обсерватории “Одесса” заметнее проявляются короткие периоды, меньше 6 ч. В обсерватории “Киев” преобладают долговременные периоды (от нескольких суток до нескольких десятков суток).*

Ключевые слова: *космическая погода, солнечная активность, геомагнитное поле, магнитные бури, солнечно-суточные колебания, магнитная аномалия, магнитосфера, ионосфера, вейвлет-анализ*

### 1. Введение

Новым и важным направлением в исследованиях проявления космической погоды является изучение возможного влияния внутреннего магнитного поля Земли и интенсивных региональных магнитных аномалий на характер геомагнитной возмущенности при различных состояниях солнечной активности. Магнитными аномалиями на поверхности Земли называются области, где значение и направление вектора индукции магнитного поля

существенно отличается от его значений и направления в соседних областях. Региональные магнитные аномалии могут достигать размеров в сотни квадратных километров, и они связаны с магнитной неоднородностью литосферы Земли.

В Украине одной из самых крупных аномалий является Одесская региональная магнитная аномалия, занимающая большую часть Одесской области и имеющая интенсивность около 700 нТл [1]. В соответствии с расчетами эффект от этой магнитной аномалии сохраняется на высотах формирования ионосферных и магнитосферных источников [2, 3]. В связи с этим можно предполагать наличие особой реакции Одесской ре-

© М. И. Рябов, А. Л. Сухарев, М. И. Орлюк,  
Л. И. Собишняк, А. А. Роменец, 2019

гиональной аномалии на процессы повышенной солнечной и геомагнитной активности.

Наблюдаемые в магнитных обсерваториях геомагнитные возмущения являются суммой вкладов разных источников, которые представляют сложные системы ионосферных и магнитосферных электрических токов. Переменная составляющая геомагнитного поля накладывается на квазипостоянную составляющую, которая может очень медленно изменяться с характерным временем в десятки, сотни и тысячи лет. Эта часть поля связана как с глобальным полем Земли, генерируемым в ядре планеты, так и с полем намагниченных участков земной коры [4, 5].

Целью настоящей работы является сравнение параметров геомагнитных колебаний и их отклик на проявления солнечной активности в области аномалии (геомагнитная обсерватория “Одесса”) и в области со слабоаномальным магнитным полем (геомагнитная обсерватория “Киев”).

## 2. Наблюдения и методы обработки

В работе использовались данные долговременного мониторинга возмущенности геомагнитного поля в геомагнитных обсерваториях (ГО) “Одесса” и “Киев”, выполненные в Институте геофизики им. Субботина НАН Украины с 2008 по 2015 гг. Для вычисления значений модуля индукции геомагнитного поля  $B$  с интервалом 1 мин были использованы 1-секундные измерения вариаций его северной ( $\delta B_x$ ), восточной ( $\delta B_y$ ) и вертикальной ( $\delta B_z$ ) компонент, а также базовые их значения. С помощью усреднения данные приводились к 1-минутным интервалам. В работе анализировались 1-минутные значения полного вектора магнитной индукции в нанотеслах [6, 7]. Поскольку исходные данные содержат незначительные разрывы, связанные с профилактикой измерительной аппаратуры, выполнялась предварительная интерполяция, позволяющая заполнять разрывы в данных. Для данных, полученных с 2008 по 2013 гг., использовалась тригонометрическая интерполяция [8]. Для более поздних данных применялась интерполяция кубическими сплайнами, обеспечивающая высокую скорость вычислений методом, описанном в работе [9].

Поскольку ряды данных состоят из нескольких миллионов отсчетов, для поиска периодов использовались несколько математических методов, наиболее подходящих для обработки больших объемов данных. Для анализа данных по отдельным годам применялся непрерывный вейвлет-анализ (“быстрый” вариант на основе анализирующей функции Морле, использующий быстрое преобразование Фурье (FFT), [10]). Для большого массива данных, полученного с 2008 по 2013 гг. в ГО “Одесса”, применялся кратковременный (оконный) фурье-анализ (STFT) [11], поскольку его скорость вычисления спектрограмм намного превосходит скорость вычисления методом непрерывного вейвлет-преобразования.

Для раздельного анализа отдельных квазигармонических колебаний применялся метод частотно-уровневой фурье-фильтрации [12]. Эти колебания обладают сильной амплитудной модуляцией, представляющей дополнительный научный интерес. Для исследования этой модуляции применялось выделение огибающей с использованием преобразования Гильберта.

## 3. Общий вид записей геомагнитных вариаций

В общем виде вариации геомагнитного поля обладают ярко выраженной сезонной зависимостью с минимумом в зимние месяцы, последующим увеличением амплитуды колебаний с максимумом в летние месяцы и последующим спадом. На магнитных записях, полученных в двух обсерваториях, “Одесса” и “Киев”, проявляется линейный тренд – увеличение геомагнитной индукции со временем на протяжении нескольких лет. Пример записи полной индукции геомагнитного поля, зарегистрированной в ГО “Одесса” показан на рис. 1. Резкие выбросы на графике обычно соответствуют сильным магнитным бурям. Аналогичный вид имеют годовые записи, зарегистрированные в ГО “Киев”.

Спектральный состав данных, полученных в этих двух обсерваториях, заметно отличается. На рис. 2 показан частотно-временной фурье-спектр, построенный по данным ГО “Одесса”, зарегистрированным в 2008–2013 гг. Хорошо видны сезонные геомагнитные вариации. Значения основных периодов, дающих наибольший вклад в наблюдаемые вариации геомагнитного поля, – 24,

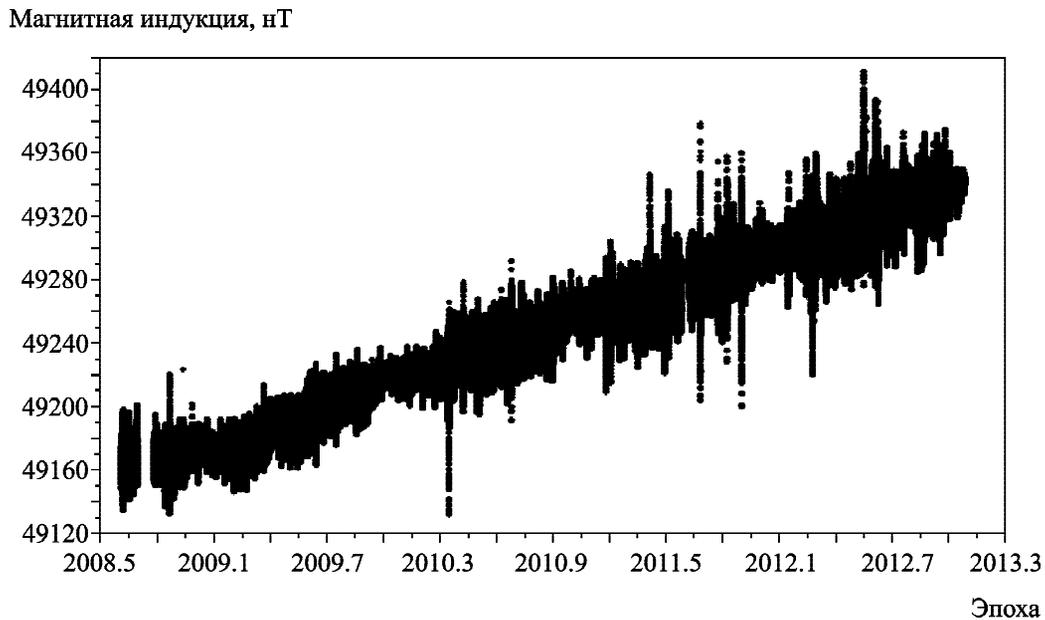


Рис. 1. Долговременные изменения индукции геомагнитного поля, зарегистрированные в ГО “Одесса” в 2008–2013 гг., (исходные данные без предварительной обработки)

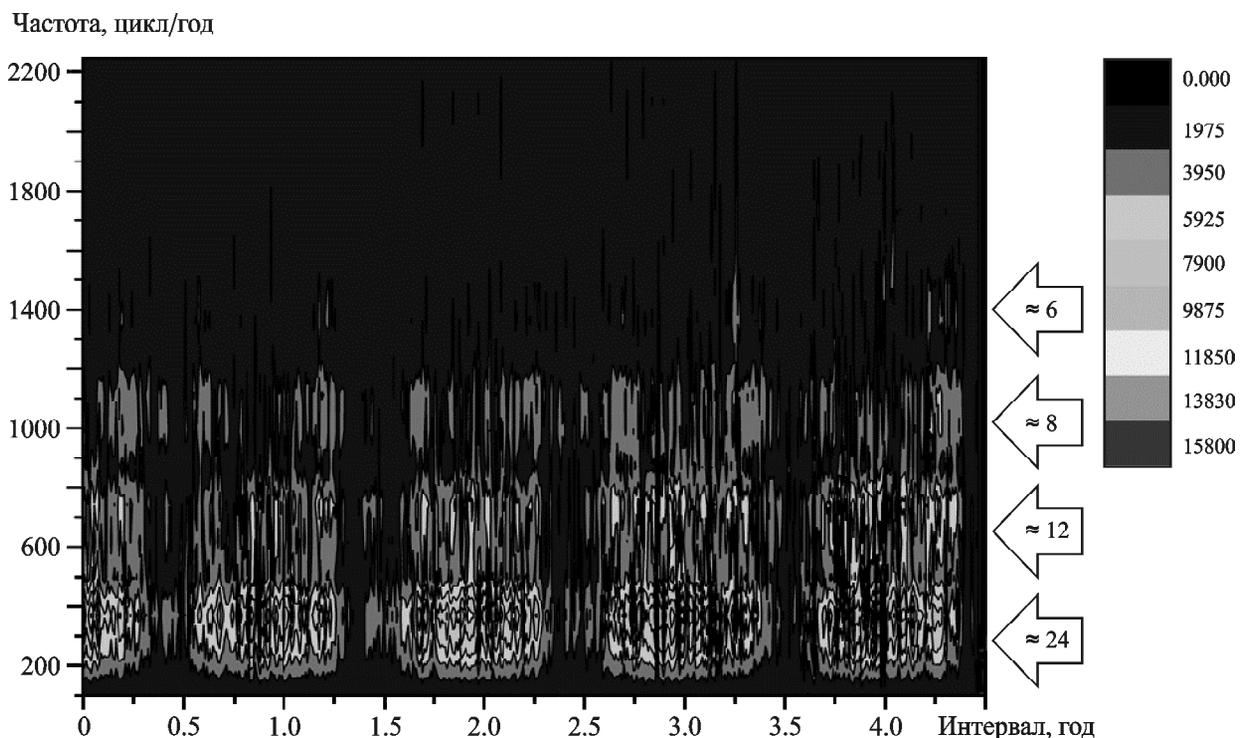


Рис. 2. Фурье-спектр для 5-летнего ряда данных (шкала вверху справа), построенный по данным ГО “Одесса” (справа в стрелках указаны периоды в часах)

12, 8 и 6 ч. Это так называемые солнечно-суточные вариации геомагнитного поля, которые связаны с волновым излучением Солнца на дневной

стороне Земли и с токовой системой  $S_q$  в ионосфере на высотах  $\approx 100$  км. Генерация в ионосфере на средних широтах электрических токов,

которые формируют эти геомагнитные вариации, обеспечивается приливными ионосферными ветрами, а также ветрами, источником которых являются магнитосферная конвекция и переход электрического поля полярной области в область средних широт [13]. Однако периоды солнечно-суточных колебаний распределены неравномерно, и их значения изменяются со временем. Этот эффект особенно заметно проявляется во время магнитных бурь.

В настоящей работе проведено сравнение распределения во времени амплитуд и периодов этих колебаний для выявления отличий, характерных для области магнитной аномалии. Кроме преобладающих солнечно-суточных колебаний, в записях геомагнитного поля есть долговременные вариации в диапазоне периодов от приблизительно недели до нескольких десятков дней. Есть также колебания с периодами меньше 6 ч, которые появляются и исчезают нерегулярно в течение года и отдельных месяцев и имеют различную длительность. Поэтому в дальнейшем представлены результаты отдельно для короткопериодных (периоды  $24 \div 6$  ч и меньше) и долгопериодных (десятки дней) вариаций геомагнитного поля, зарегистрированных в ГО “Одесса” и ГО “Киев”. Следует отметить, что вариации геомагнитного поля являются квазипериодическими процессами, не строго гармоническими, и их амплитуды и частоты (периоды) изменяются со временем, далее в статье для краткости используется слово “период”.

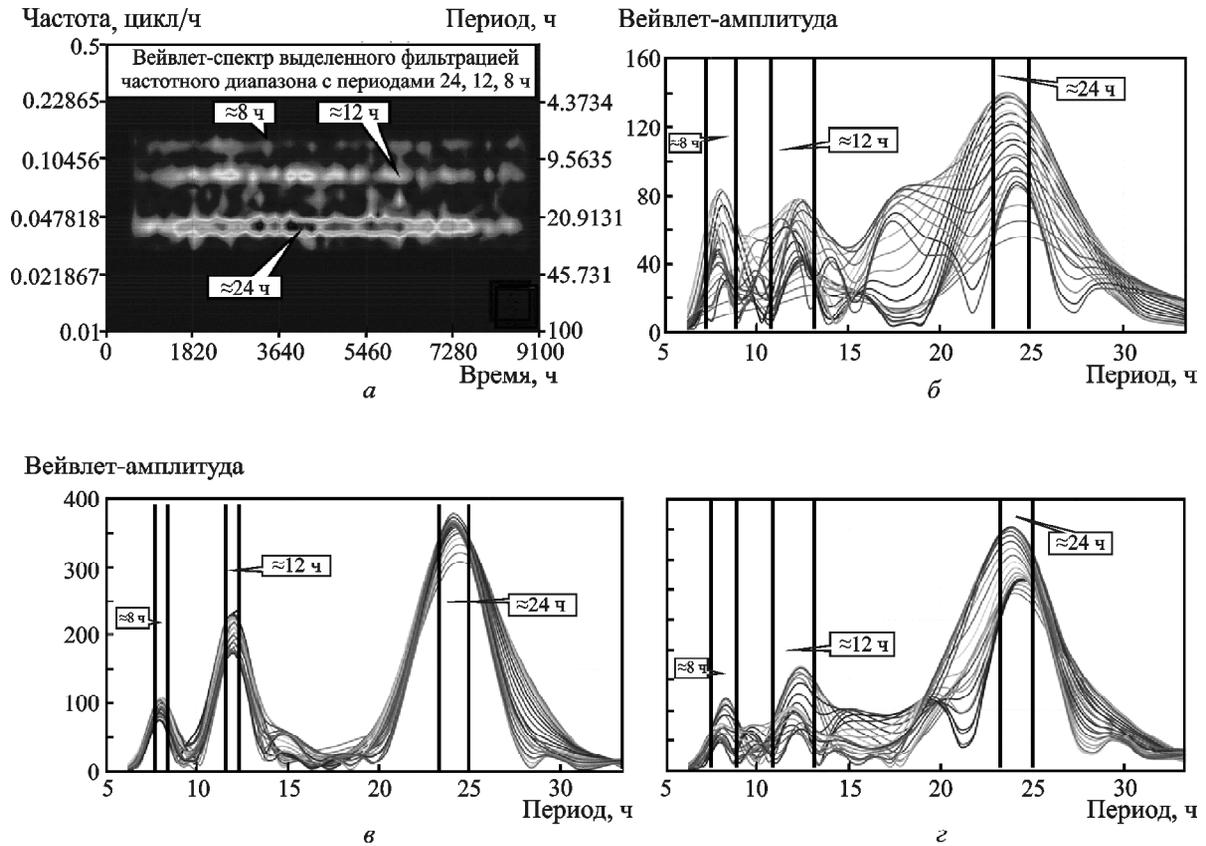
#### 4. Короткопериодные составляющие геомагнитного поля

##### 4.1. Основные периоды и их изменения (ГО “Одесса”)

Пример вейвлет-спектра геомагнитных вариаций, зарегистрированных в ГО “Одесса” в 2015 г., на котором проявляются гармоники солнечно-суточных колебаний с периодами 8, 12 и 24 ч, показан на рис. 3, а. Для лучшей визуализации динамики изменения периодов построены локальные вейвлет-спектры. Такой вариант визуализации является более информативным и позволяет наглядно показать изменение периодов во время геомагнитных возмущений в течение небольшого промежутка времени (приблизительно неделя в показанном примере). На рис 3, б продемонстриро-

ван локальный вейвлет-спектр, полученный для 4-й недели года, когда наблюдались геомагнитные возмущения. Вертикальными линиями показаны полосы периодов. Линии спектра, следующие через  $\approx 7$  ч, показывают изменение периодов в течение приблизительно одной недели. Значения периодов изменяются на  $\approx 0.8$  ч (период 8 ч),  $\approx 1.5$  ч (период 12 ч) и  $\approx 1.3$  ч (период 24 ч). На рис 3, в показан локальный вейвлет-спектр, построенный для 10-й недели года, когда геомагнитное поле было относительно спокойным. Видно, что максимумы периодов узкие и периоды в течение недели практически не изменяются. На рис 3, г показан локальный вейвлет-спектр, построенный для 40-й недели, когда наблюдались слабые геомагнитные возмущения. Изменения периодов составили  $\approx 0.5$  ч (период 8 ч),  $\approx 0.8$  ч (период 12 ч),  $\approx 1$  ч (период 24 ч).

В спокойные дни, без геомагнитных возмущений, солнечно-суточные вариации устойчивы и обладают строгой периодичностью. Однако во время геомагнитных возмущений форма солнечно-суточных колебаний на магнитограммах существенно искажается, и на вейвлет-спектрах видно изменение как самих значений периодов, так и их амплитуд колебаний. Особенно заметны искажения во время сильных магнитных бурь, когда происходит разделение периодов на дополнительные гармоники. Предварительное сопоставление изменений периодов, найденных с помощью построенных вейвлет-спектров, с каталогом магнитных бурь [14] показало, что суточный период во время наиболее сильных бурь изменяется в интервале  $\approx 21 \div 24.5$  ч. Полусуточный период изменяется в интервале  $\approx 11 \div 13.5$  ч, а также иногда появляется гармоника с периодом  $\approx 15 \div 16$  ч. Периоды 8 ч и меньше изменяются не более чем на 1 ч. В данных ГО “Одесса”, полученных с 2008 по 2013 гг., а также в отдельные годы, кроме периода 6 ч, различимы дополнительные периоды  $\approx 5$  и  $\approx 4.14$  ч. Амплитуда колебаний с этими периодами скачкообразно увеличивается во время начала магнитной бури и так же резко падает, когда буря заканчивается. Амплитуда колебаний с периодом 6 ч возрастает плавно, без резких выбросов. Она постепенно увеличивается во время развития магнитной бури, затем так же постепенно падает. Рассмотрение долговременного изменения коле-



**Рис 3.** Вейвлет-спектры геомагнитных вариаций, построенные по данным ГО “Одесса”, полученным в 2015 г.: а – вейвлет-спектр геомагнитных вариаций после выделения полосовой фильтрацией данных, соответствующих полосам периодов вблизи 24, 12, 8 ч; б – локальный вейвлет-спектр, построенный для 4-й недели года (период геомагнитных возмущений); в – локальный вейвлет-спектр, построенный для 10-й недели года (период относительно спокойного геомагнитного поля); г – локальный вейвлет-спектр для 40-й недели (период слабых геомагнитных возмущений)

баний с периодом 6 ч на протяжении пяти лет показывает медленный рост их амплитуды от года к году.

#### 4.2. Анализ амплитудной модуляции возмущенности геомагнитного поля (ГО “Одесса”)

Вейвлет анализ позволяет выделять колебания в полосах отдельных периодов. Результаты обработки показывают, что они подвержены значительной амплитудной модуляции. На рис. 4 показано наличие амплитудной модуляции геомагнитных колебаний с периодами 12 и 8 ч. Представляет интерес выявить цикличность изменения амплитуд отдельных колебаний. Для выделения огибающей этих колебаний использовался метод Гильберта [15]. Эта процедура проведена пока только для данных наблюдений в ГО “Одесса” в 2015 г.

Получены следующие результаты. Амплитуда колебаний с периодом 24 ч изменяется в течение года с цикличностью 72, 32, 15 сут, амплитуда колебаний с периодом 12 ч – 71, 15, 9 сут, амплитуда колебаний с периодом 8 ч – 195, 51, 15 сут, амплитуда колебаний с периодом 6 ч – 70, 11, 6 сут. В данных 2015 г. проявлялась низкоамплитудная вариация геомагнитного поля с периодом, изменяющимся в течение года в интервале  $\approx 2.3 \div 1.9$  ч. Резкие всплески амплитуды этой вариации предположительно обусловлены магнитными бурями, а изменение амплитуды огибающей в течение года происходит с цикличностью 29, 13, 7 сут и 24 ч.

Многие из этих циклов амплитудной модуляции основных квазипериодов вариаций геомагнитного поля в области Одесской магнитной аномалии приблизительно равны циклам, найденным ранее в вариациях различных индексов солнеч-

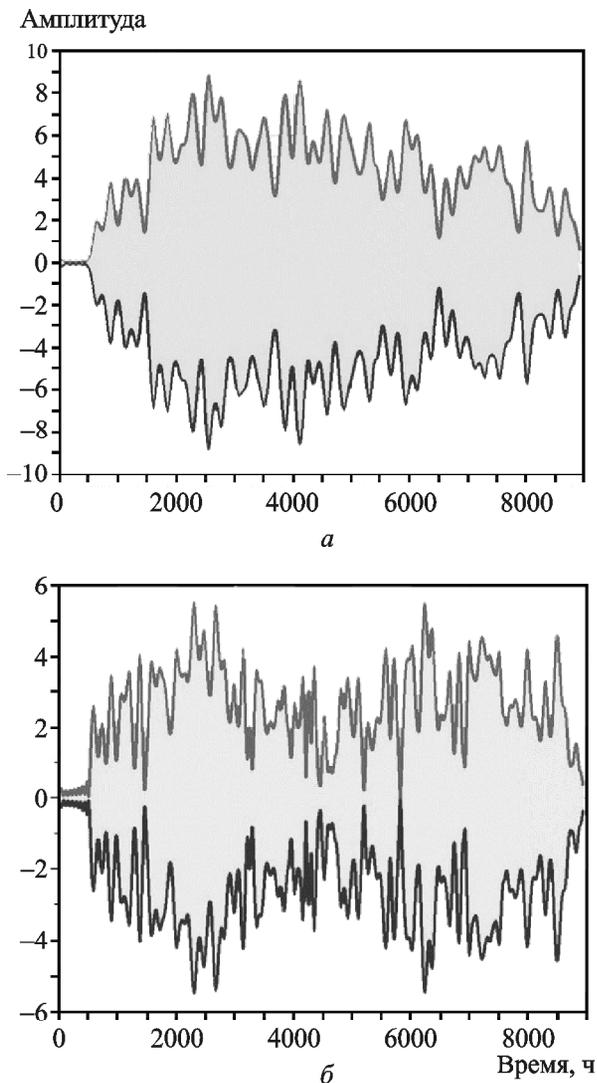


Рис. 4. Пример представления отдельных квазигармонических колебаний с периодами  $\approx 12$  ч (а) и 8 ч (б) с амплитудной модуляцией, выделенных методом фурье-фильтрации (ГО “Одесса”, 2015 г.)

ной и геомагнитной активности. Например, период вариаций  $A_p$ -индекса геомагнитной активности  $\approx 13$  сут, вероятнее всего, связан с высокоскоростными потоками солнечного ветра, а также проявляется в вариациях среднеширотного  $A_p$ -индекса. Ярko выраженный период  $\approx 9$  сут, а также периоды 7 и 5 сут с меньшей амплитудой связаны с потоками солнечного ветра, распределением корональных дыр на Солнце, а также могут быть следствием секторной структуры межпланетного магнитного поля [16]. Периоды около 51, 72 и 195 сут были выявлены при анализе изменений числа солнечных пятен, классифицированных

по разным группам (см. работу [17]). Периоды приблизительно равные 30, 55 и 180 сут обнаружены в вариациях температуры электронов и ионов в верхней ионосфере (на высоте  $\approx 500$  км) по спутниковым наблюдательным данным [18]. Отмечается интересная особенность – у каждого квазипериодического колебания циклы огибающей амплитудной модуляции незначительно отличаются друг от друга. Таким образом, амплитуда основных узкополосных вариаций геомагнитного поля в области Одесской магнитной аномалии модулируется глобальными долговременными циклическими колебаниями, присущими разным индексам солнечной и геомагнитной активности. Вместе с тем физические процессы, формирующие эти циклы, пока еще являются предметом обсуждения.

#### 4.3. Результаты исследований геомагнитной возмущенности (ГО “Киев”)

В данных ГО “Киев” интервал изменений суточного периода во время сильных магнитных бурь составлял  $\approx 21.5 \div 27$  ч, а интервал полусуточного периода –  $\approx 12 \div 13.5$  ч. Изменение более коротких периодов происходит, как и в данных ГО “Одесса”, в пределах 1 ч. По данным ГО “Киев” период 6 ч проявляется слабее, а высокочастотная часть спектра размыта. При рассмотрении вейвлет-спектров, построенных по данным, полученным в отдельные месяцы, обнаруживается интересная закономерность. Так, в течение 2015 г. наблюдалось следующее распределение периодов по месяцам. В апреле, августе, сентябре, декабре отмечались периоды 24, 12, 8, 6 ч. В мае, июне, июле амплитуда периода 6 ч очень низкая и он теряется в шумах (ниже 95 %-го доверительного уровня). В январе, феврале, марте, октябре, ноябре дополнительно проявляется слабо выраженный период  $\approx 4 \div 4.8$  ч, усиливающийся и исчезающий в разные дни месяцев. В 2014 г. были месяцы, например июль, когда короткопериодные вариации с периодом меньше 12 ч были практически незаметны (см. рис. 5). В январе 2014 г. наблюдалась высокая короткопериодная геомагнитная активность, когда, кроме периодов  $\approx 4 \div 5$  ч, появился слабый период  $\approx 3$  ч.

При анализе годовых рядов и данных, полученных в отдельные месяцы в ГО “Киев”, периодов меньше 3 ч не обнаружено.

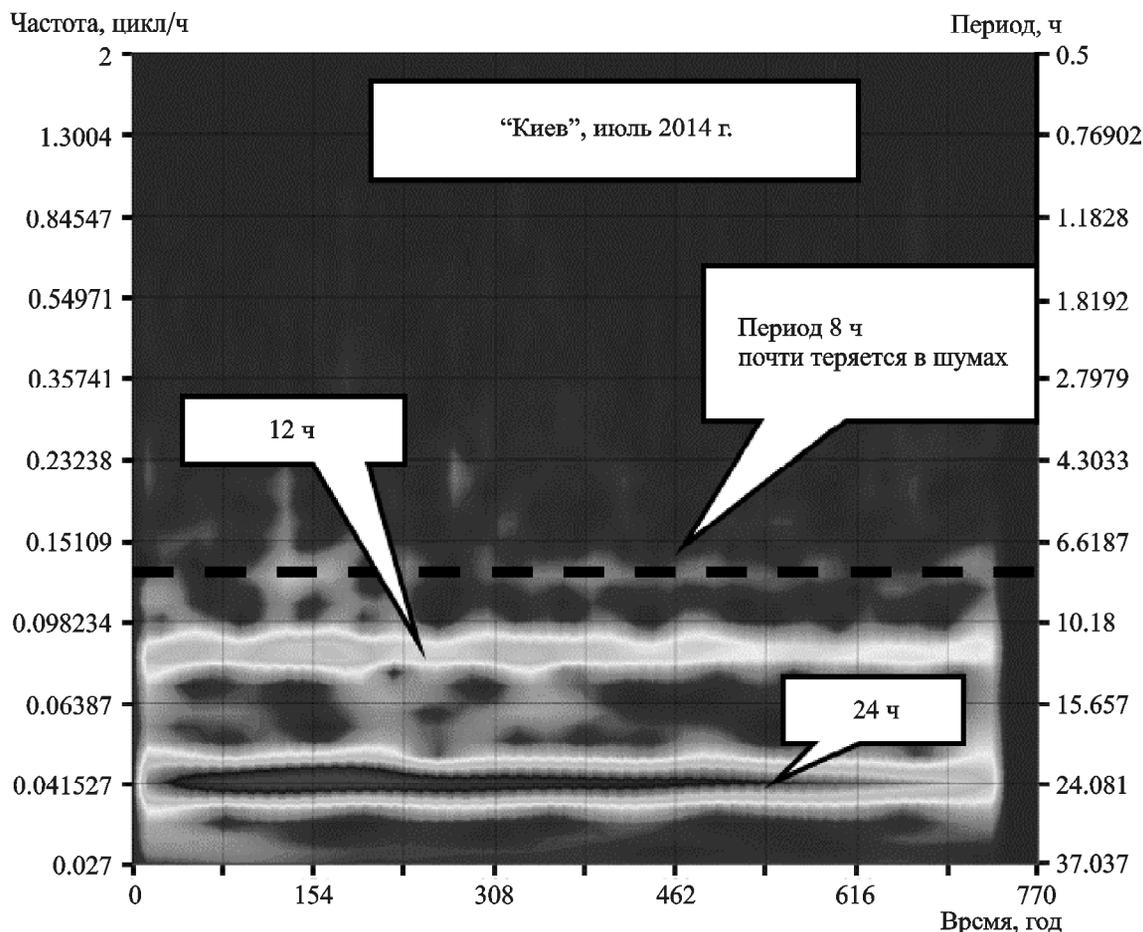


Рис. 5. Пример ослабления быстрых вариаций с периодом меньше 12 ч (по данным ГО “Киев”, зарегистрированным в июле 2014 г.)

## 5. Долгопериодные составляющие геомагнитного поля

### 5.1. Анализ долгопериодных составляющих в данных ГО “Одесса”

Анализ долгопериодных составляющих геомагнитного поля в области Одесской магнитной аномалии проводился по данным, полученным с 2008 по 2013 гг. Предварительно было проведено сглаживание рядов данных полиномиальным скользящим средним [19] с очень большим окном, чтобы удалить часть фурье-спектра с периодами, меньшими 5 сут. В результате на фурье-спектре присутствуют значимые (превышающие 95 %-й доверительный уровень) периоды 84.2, 37.0, 17.6 и 9.5 сут. Периоды с близкими значениями найдены при анализе разных индексов солнечной активности (например, в работах [20, 21]). Особый интерес представляют результаты раздельного анализа дол-

говременных колебаний геомагнитного поля, зарегистрированных в разные годы наблюдений. Так, в 2010 г. преобладающим был период  $\approx 37.2$  сут. В 2015 г. проявился слабый период  $\approx 52$  сут. Следует отметить, что 27-дневный период, который должен быть высокоамплитудным, по данным ГО “Одесса” проявляется слабо. Более явным образом проявляется период  $\approx 32 \div 37$  сут. На вейвлет-спектрах 2010 и 2015 гг. отмечается изменение периода от  $\approx 27$  сут в марте до  $\approx 37$  сут к концу года с ростом амплитуды 37-дневных колебаний.

### 5.2. Анализ долгопериодных составляющих в данных ГО “Киев”

Долговременная переменность геомагнитного поля по данным ГО “Киев” отличается от наблюдаемой в ГО “Одесса”. Периоды близкие к 27-дневному солнечному циклу проявляются в разные годы, например в 2010, 2014, 2015 гг. Кроме

этого, есть периоды, которые изменяются со временем в течение года. Например, в 2014 г. наблюдалось последовательное увеличение периода от  $\approx 11$  до  $\approx 20$  сут. В том же году самый продолжительный период увеличился от  $\approx 70$  до  $\approx 80$  сут, а его амплитуда уменьшилась к концу года. Для периодов  $\approx 23$  и  $\approx 37$  сут наибольшие значения их амплитуды регистрировались зимой и летом. В 2010 г. вейвлет-спектр долговременной переменности был совсем другим. Преобладающим был период  $\approx 84$  сут, а период  $\approx 50$  сут присутствовал в данных с июня по декабрь. Особенно интересным было уменьшение периода с  $\approx 25$  до  $\approx 14$  сут с февраля по сентябрь. Пример показан на рис. 6.

В 2015 г. по данным ГО “Киев” наблюдалась аналогичная картина, но в этот раз период умень-

шался с  $\approx 14$  до  $\approx 10$  сут с марта по сентябрь. В том же году регистрировалось также изменение периода от 26 до 28 сут с марта по май и от 22 до 28 сут с июля по октябрь.

### 6. Обсуждение результатов

Вариации геомагнитного поля, наблюдавшиеся в ГО “Одесса” в зоне интенсивной Одесской региональной магнитной аномалии и в ГО “Киев” в области слабоаномального геомагнитного поля, обладают сложной структурой. Общими для них являются солнечно-суточные вариации с периодами 24, 12, 8 и 6 ч. Несмотря на кажущуюся стабильность, значения этих периодов изменяются со временем во время магнитных бурь.

По данным наблюдений в ГО “Одесса”, кроме этих солнечно-суточных вариаций, есть еще бы-

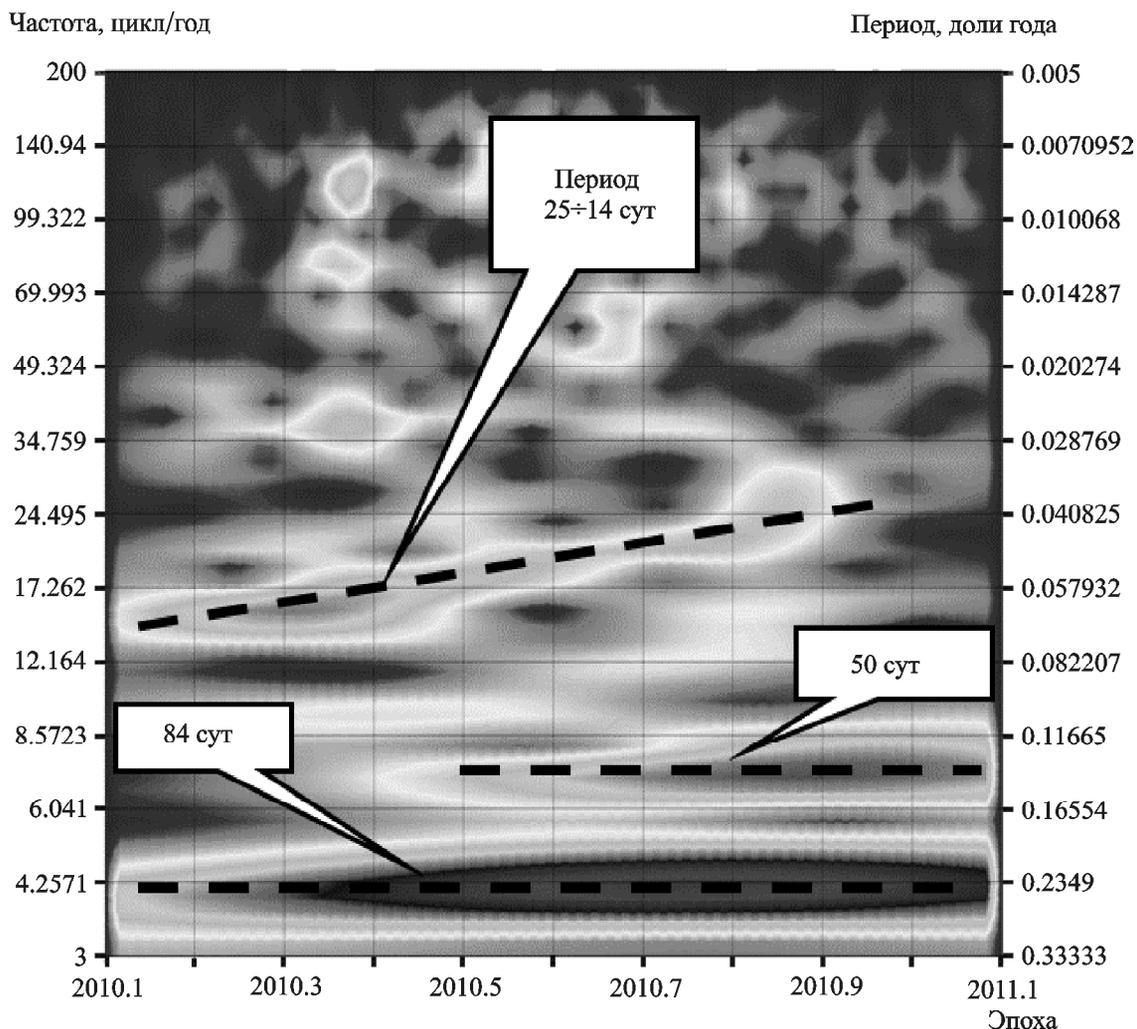


Рис. 6. Основные периоды и изменение одного из них на вейвлет-спектре в полосе периодов  $\approx 12 \div 100$  сут, построенном по данным наблюдений в ГО “Киев” в 2010 г.

стрые колебания с периодами от  $\approx 5$  и 4 ч до  $\approx 2$  ч и менее. Данные наблюдений в ГО “Киев” показывают наличие изменений периодов от  $\approx 5$  до 3 ч в отдельные месяцы года. Продолжительные периоды в диапазоне  $\approx 20 \div 30$  сут вероятно связаны с изменением активных областей на Солнце в 24 цикле солнечной активности. Видна зависимость от 27-дневного солнечного периода. Периоды, близкие к циклам изменений амплитуд солнечно-суточных геомагнитных колебаний, могут быть объяснены изменениями в радиоизлучении Солнца (индекс солнечной активности  $F10.7$ ), которое коррелирует с ультрафиолетовым излучением Солнца. Анализ периодических составляющих этих индексов рассматривается в работах [22, 23].

В то же время на средних широтах проявляются планетарные атмосферные волны с периодами  $2 \div 16$  сут и более [24]. Проникая в ионосферу, эти волны вызывают модуляцию колебаний полного электронного содержания и геомагнитного поля [25]. Наблюдаемые в геомагнитных возмущениях изменения периодов от нескольких дней до десятков дней также могут быть следствием этого процесса [26, 27]. Периоды со значениями приблизительно 50 сут и  $80 \div 90$  сут, наблюдаемые в обеих геомагнитных обсерваториях, присутствуют в вариациях индексов суммарных площадей групп пятен и чисел Вольфа.

Проведенный по данным ГО “Одесса” анализ показывает, что в области Одесской магнитной аномалии усиливаются геомагнитные колебания с короткими периодами и они распределены в течение года равномернее, чем в данных ГО “Киев”. По данным ГО “Одесса” обнаружены также самые кратковременные колебания с периодами приблизительно 2 ч и меньше. В то же время в данных ГО “Киев” продолжительные периоды геомагнитных колебаний изменяются со временем значительнее, чем в данных ГО “Одесса”.

## 7. Выводы

1. Колебания геомагнитного поля по данным геомагнитных обсерваторий “Одесса” и “Киев” в спокойных геомагнитных условиях происходят с периодами 24, 12, 8, 6, 5, 4 ч. Периоды 6, 5 и 4 ч хорошо проявляются в данных ГО “Одесса” в течение всего времени наблюдения, а в данных ГО “Киев” – только в отдельные месяцы. Периоды  $\approx 5$ , 4, 3 ч в 2014 и 2015 гг. проявлялись в данных наблюдений

в ГО “Киев” в осенне-зимние месяцы. Периоды меньше  $\approx 2$  ч достоверно найдены только в данных наблюдений в ГО “Одесса”.

2. Периоды, близкие к 27-дневному солнечному циклу, присутствуют в данных ГО “Киев”, но почти неразличимы в данных ГО “Одесса”. Периоды 84, 37 сут (ГО “Одесса”) и 87, 50 сут (ГО “Киев”) близки к соответствующим периодам в вариациях  $A_p$ -индекса и индексов суммарный площадей групп пятен и чисел Вольфа. В данных ГО “Одесса” есть также периоды 37, 17 и 10 сут (периоды с близкими значениями есть в спектрах индексов  $A_p$  и  $F10.7$ ). По данным ГО “Киев” период 37 сут в некоторые годы практически исчезал.

3. Особый интерес представляет изменение значений и амплитуды длиннопериодных колебаний геомагнитной активности (от нескольких дней до десятков дней), которые есть в данных ГО “Киев” и ГО “Одесса”. Они могут быть связаны как с проявлениями солнечной активности, так и с планетарными волнами.

4. В течение каждого года в данных ГО “Киев” и ГО “Одесса” наблюдаются резкие всплески возмущенности геомагнитного поля во время магнитных бурь, но иногда они появляются и во время отсутствия магнитных бурь. По данным ГО “Одесса” в течение 2008–2013 гг. амплитуда короткопериодных колебаний ( $2 \div 5$  ч) постепенно возрастает.

5. Во время магнитных бурь 24-часовой период по данным ГО “Киев” изменяется в интервале  $21.5 \div 27$  ч, по данным ГО “Одесса” – в интервале  $21 \div 24.5$  ч. Значения 12-часового периода в данных ГО “Одесса” изменяются в пределах  $12 \div 16.7$  ч, а в данных ГО “Киев” –  $12 \div 13.5$  ч. Значения более коротких периодов отклоняются от значений в спокойной геомагнитной обстановке нерегулярным образом приблизительно на 1 ч.

6. Для данных наблюдений в ГО “Одесса” выполнен предварительный анализ циклического изменения огибающих амплитудной модуляции отдельных периодов. Основной цикл модуляции амплитуды периодов 24, 12, 6 ч составляет  $\approx 70$  сут. Самый длительный цикл модуляции амплитуды наблюдается у 8-часового периода и составляет  $\approx 195$  сут, или приблизительно полгода. В последующем будет проведено сравнение этих эффектов в данных ГО “Киев” и ГО “Одесса” и будут рассмотрены их причины.

7. Таким образом, анализ и сравнение данных долговременного мониторинга вариаций геомагнитного поля, полученных в ГО “Одесса” (в зоне интенсивной Одесской региональной магнитной аномалии) и в ГО “Киев” (в области слабоаномального геомагнитного поля) показывает отличия как в короткопериодных, так и в долгопериодных вариациях геомагнитной активности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Орлюк М. И., Марченко А. В., Иващенко И. Н. Расчет компонент геомагнитного поля на примере Одесской магнитной аномалии. *Геодинамика*. 2014. Т. 1, № 16. С. 96–102.
- Marchenko A. and Orliuk M. 3D magnetic model of the East European Craton and its effect at near-surface and satellite heights. *Геофизический журнал*. 2010. Т. 32, № 4. С. 96–98.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Структура и динамика главного магнитного поля Земли на ее поверхности и в ближнем космосе. *Odessa astronomical publications*. 2011. Vol. 24. P. 124–128.
- Аминатов А. С., Зайцев А. Н., Одинцов В. И., Петров В. Г. *Вариации магнитного поля Земли: база цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984–2001 гг. на CD-ROM*. Москва: ИЗМИРАН, 2001. 45 с.
- Orliuk M. I., Romenets A. A., Sumaruk T. P., and Sumaruk Yu. P. Geomagnetic field of Ukraine: estimation of internal and external sources contribution. *Odessa astronomical publications*. 2012. Vol. 25, Is. 2. P. 102–108. DOI: 10.18524/1810-4215.2012.25.83326
- Орлюк М. И., Роменец А. А., Сумарук П. В., Сумарук Ю. П., Сумарук Т. П. Пространственно-временная структура магнитного поля Земли территории Украины: оценка вклада внутренних и внешних источников. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 3. С. 137–144.
- Guglia L. I., Orlyuk M. I., Ryabov M. I., Sukharev A. L., and Orliuk I. M. Daily and short-period changes dynamics of the Earth’s magnetic field in the 24-th cycle of solar activity according to magnetic observatory “Odessa”. *Odessa Astronomical Publications*. 2013. Vol. 26, Is. 2. P. 263–268.
- Newbery A. C. R. Trigonometric interpolation and curve-fitting. *Math. Comput.* 1970. Vol. 24, Is. 112. P. 869–876. DOI: 10.2307/2004621
- Akima H. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. *J. ACM*. 1970. Vol. 17, Is. 4. P. 589–602. DOI: 10.1145/321607.321609
- Büßow R. An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform. *Mech. Syst. Signal Process.* 2007. Vol. 21, Is. 8. P. 2970–2979. DOI: 10.1016/j.ymssp.2007.06.001
- Zakowski K. Detection and time/frequency analysis of electric fields in the ground. *Anti-Corros. Meth. Mater.* 2007. Vol. 54, Is. 5. P. 294–300. DOI: 10.1108/00035590710822143
- Blinchikoff H. J. and Zverev A. I. *Filtering in the Time and Frequency Domains*. Raleigh, NC, USA: SciTech Publishing, Ink., 2001. 520 p.
- Фадеев Б. В., Мишин В. М. Ветры в среднеширотной ионосфере и генерация ими Sq-подобного электрического поля и токов. *Исследования по геомагнетизму, аэронауки и физике Солнца*. Москва: Наука, 1985. Вып. 74. С. 162–170.
- Обридко В. Н., Канониди Х. Д., Митрофанова Т. А., Шельтинг Б. Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2013. Т. 53, № 2. С. 157–166.
- Германович О., Лиференко В., Лебедев С. Преобразование Гильберта в среде LabView. *Компоненты и технологии*. 2012. № 2. P. 122–124.
- Thayer J. P., Lei J., Forbes J. M., Sutton E. K., and Norem R. S. Thermospheric density oscillations due to periodic solar wind high-speed streams. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2008. Vol. 113, Is. A6. id. A06307. DOI: 10.1029/2008JA013190
- Kilcik A., Ozcug A., Yurchyshyn V., and Rozelot J. P. Sunspot Count Periodicities in Different Zurich Sunspot Group Classes Since 1986. *Sol. Phys.* 2014. Vol. 289, Is. 11. P. 4365–4376. DOI: 10.1007/s11207-014-0580-0
- Prabhakaran Nayar S. R., Alexander L. T., Radhika V. N., John T., Subrahmanyam P., Chopra P., Bahl M., Maini H. K., Singh V., Singh D., and Garg S. C. Observation of periodic fluctuations in electron and ion temperatures at the low-latitude upper ionosphere by SROSS-C2 satellite. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, Is. 5. P. 1665–1674. DOI: 10.5194/angeo-22-1665-200
- Гайдышев И. *Анализ и обработка данных: Специальный справочник*. Санкт-Петербург: Питер, 2001. 752 с.
- Pap J., Tobiska W. K., and Bouwer S. D. Periodicities of solar irradiance and solar activity indices, I. *Sol. Phys.* 1990. Vol. 129, Is. 1. P. 165–189. DOI: 10.1007/BF00154372
- Bouwer S. D. Periodicities of solar irradiance and solar activity indices, II. *Sol. Phys.* 1992. Vol. 142, Is. 2. P. 365–389. DOI: 10.1007/BF00151460
- Prabhakaran Nayar S. R. Periodicities in solar activity and their signature in the terrestrial environment. *Proceedings of the ILWS Workshop* (February 19-24, 2006. Goa). Goa, India, 2006. P. 170–177.
- Chakrabarty D., Bagiya M. S., Thampi S. V., and Iyer K. N. Solar EUV flux (0.1-50 nm), F10.7 cm flux, sunspot number and the total electron content in the crest region of equatorial ionization anomaly during the deep minimum between solar cycle 23 and 24. *Indian J. Radio Space Phys.* 2012. Vol. 41. P. 110–120.
- Mitchell N. J., Middleton H. R., Beard A. G., Williams P. J. S., and Muller H. G. The 16-day planetary wave in the mesosphere and lower thermosphere. *Ann. Geophys.* 1999. Vol. 17, Is. 11. P. 1447–1456. DOI: 10.1007/s00585-999-1447-9
- Hoffmann P. and Jacobi C. Analysis of planetary waves seen in ionospheric total electron content (TEC) perturbations. *Wiss. Mittel. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig*. 2006. Vol. 37. P. 29–39.
- Kohsiek A., Glassmeier K. H., and Hirooka T. Periods of planetary waves in geomagnetic variations. *Ann. Geophys.* 1995. Vol. 13, Is. 2. P. 168–176. DOI: 10.1007/s00585-995-0168-y
- Altadill D. and Apostolov E. M. Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere winds. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003. Vol. 108, Is. A11. id. 1403. DOI: 10.1029/2003JA010015

REFERENCES

1. ORLYUK, M. I., MARCHENKO, A. V. and IVASHCHENKO, I. N., 2014 Calculating of the Geomagnetic Field Induction Vector Components on the Odessa Magnetic Anomaly Region. *Geodinamika*. vol. 1, is. 16, pp. 96–102. (in Russian).
2. MARCHENKO, A. and ORLIUK, M., 2010. 3D magnetic model of the East European Craton and its effect at near-surface and satellite heights. *Geofizicheskiy Zhurnal*. vol. 32, is. 4. pp. 96–98.
3. ORLYUK, M. I. and ROMENETS, A. A., 2011. The Structure and Dynamics of the Main Magnetic Field of the Earth on its Surface and in the Near Space. *Odessa Astronomical Publications*. vol. 24, pp. 124–128. (in Russian).
4. AMINATOV, A. S., ZAITZEV, A. N., ODINTSOV, V. I. and PETROV, V. G., 2001. *Earth's magnetic field variations: the magnetic observatories data for period 1984–2001 on CD-ROM*. Moscow, Russia: IZMIRAN Publ. (in Russian).
5. ORLIUK, M. I., ROMENETS, A. A., SUMARUK, T. P. and SUMARUK, YU. P., 2012. Geomagnetic field of Ukraine: estimation of internal and external sources contribution. *Odessa Astronomical Publications*. vol. 25, is. 2, pp. 102–108. DOI: 10.18524/1810-4215.2012.25.83326
6. ORLYUK, M. I., ROMENETS, A. A., SUMARUK, P. V., SUMARUK, YU. P. and SUMARUK, T. P., 2012. The spatial-temporal structure of the magnetic field of Ukraine's territory: assessment of the contribution of internal and external sources. *Geofizicheskiy Zhurnal*. Vol. 34, no. 3, pp. 137–144. (in Russian). DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v34i3.2012.116651
7. GUGLIA, L. I., ORLYUK, M. I., RYABOV, M. I., SUKHAREV, A. L. and ORLIUK, I. M. 2013. Daily and short-period changes dynamics of the Earth's magnetic field in the 24-th cycle of solar activity according to magnetic observatory "Odessa". *Odessa astronomical publications*. vol. 26, is. 2, pp. 263–268.
8. NEWBERY, A. C. R., 1970. Trigonometric interpolation and curve-fitting. *Math. Comput.* vol. 24, is. 112, pp. 869–876. DOI: 10.2307/2004621
9. AKIMA, H., 1970. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. *J. ACM*. vol. 17, is. 4, pp. 589–602. DOI: 10.1145/321607.321609
10. BÜSSOW, R., 2007. An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform. *Mech. Syst. Signal Process.* vol. 21, is. 8, pp. 2970–2979. DOI: 10.1016/j.ymsp.2007.06.001
11. ZAKOWSKI, K., 2007. Detection and time/frequency analysis of electric fields in the ground. *Anti-Corros. Meth. Mater.* vol. 54, is. 5, pp. 294–300. DOI: 10.1108/00035590710822143
12. BLINCHIKOFF, H. J. and ZVEREV, A. I., 2001. *Filtering in the Time and Frequency Domains*. Raleigh, NC, USA: SciTech Publishing, Ink.
13. FADEEV, B. V. and MISHIN, V. M., 1985. Mid-latitude ionospheric winds and generation of Sq-like electric field and currents. *Issledovaniya po Geomagnetizmu, Aeronomii i Fizike Solntsa*. [Research on Geomagnetism, Aeronomy, and Solar Physics.] Moscow, Russia: Nauka Publ. Vol 74, pp. 162–170. (in Russian).
14. OBRIDKO, V. N., KANONIDI, K. D., MITROFANOV, T. A. and SHELTING, B. D., 2013. Solar activity and geomagnetic disturbances. *Geomag. Aeron.* vol. 53, is. 2, pp. 147–156.
15. GERMANOVICH, O., LIFERENKO, V. and LEBEDEV, S., 2012. Hilbert transform algorithm in LabView. *Komponenty I Tekhnologii*. [Components and Technologies]. is. 2, pp.122–124. (in Russian).
16. THAYER, J. P., LEI, J., FORBES, J. M., SUTTON, E. K. and NEREM, R. S., 2008. Thermospheric density oscillations due to periodic solar wind high-speed streams. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 113, is. A6, id. A06307. DOI: 10.1029/2008JA013190
17. KILCIK, A., OZGUC, A., YURCHYSHYN, V. and ROZELOT, J. P., 2014. Sunspot Count Periodicities in Different Zurich Sunspot Group Classes Since 1986. *Sol. Phys.* vol. 289, is. 11, pp. 4365–4376. DOI: 10.1007/s11207-014-0580-0
18. PRABHAKARAN NAYAR, S. R., ALEXANDER, L. T., RADHIKA, V. N., JOHN, T., SUBRAHMANYAM, P., CHOPRA, P., BAHL, M., MAINI, H. K., SINGH, V., SINGH, D. and GARG, S. C., 2004. Observation of periodic fluctuations in electron and ion temperatures at the low-latitude upper ionosphere by SROSS-C2 satellite. *Ann. Geophys.* vol. 22, is. 5, pp. 1665–1674. DOI: 10.5194/angeo-22-1665-200
19. GAIDYSHEV, I., 2001. *Data analysis and processing: Special handbook*. Saint Peterburg, Russia: Piter Publ. (in Russian).
20. PAP, J., TOBISKA, W. K. and BOUWER, S. D., 1990. Periodicities of solar irradiance and solar activity indices. I. *Sol. Phys.* vol. 129, is. 1, pp. 165–189. DOI: 10.1007/BF00154372
21. BOUWER, S. D., 1992. Periodicities of solar irradiance and solar activity indices, II. *Sol. Phys.* vol. 142, is. 2, pp. 365–389. DOI: 10.1007/BF00151460
22. PRABHAKARAN NAYAR, S. R., 2006. Periodicities in solar activity and their signature in the terrestrial environment. In: *ILWS Workshop Proceedings*. Goa, India, February 19-24, 2006. pp. 170–177.
23. CHAKRABARTY, D., BAGIYA, M. S., THAMPI, S. V. and IYER, K. N., 2012. Solar EUV flux (0.1-50 nm), F10.7 cm flux, sunspot number and the total electron content in the crest region of equatorial ionization anomaly during the deep minimum between solar cycle 23 and 24. *Indian J. Radio Space Phys.* vol. 41, pp. 110–120.
24. MITCHELL, N. J., MIDDLETON, H. R., BEARD, A. G., WILLIAMS, P. J. S. and MULLER, H. G., 1999. The 16-day planetary wave in the mesosphere and lower thermosphere. *Ann. Geophys.* vol. 17, is. 11, pp. 1447–1456. DOI: 10.1007/s00585-999-1447-9
25. HOFFMANN, P. and JACOBI, C., 2006. Analysis of planetary waves seen in ionospheric total electron content (TEC) perturbations. *Wiss. Mitteil. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig*. vol. 37, pp. 29–39.
26. KOHSIEK, A., GLASSMEIER, K. H. and HIROOKA, T., 1995. Periods of planetary waves in geomagnetic variations. *Ann. Geophys.* vol. 13, is. 2, pp. 168–176. DOI: 10.1007/s00585-995-0168-y
27. ALTADILL, D. and APOSTOLOV, E. M., 2003. Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere winds. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 108, is. A11, id. 1403. DOI: 10.1029/2003JA010015

M. I. Ryabov<sup>1</sup>, A. L. Sukharev<sup>1</sup>, M. I. Orlyuk<sup>2</sup>,  
L. I. Sobitnyak<sup>1</sup>, and A. A. Romenets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatory "URAN-4", Institute of Radio Astronomy,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
37, Pushkinska St., Odessa, 65011, Ukraine

<sup>2</sup> S. I. Subbotin Institute of Geophysics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
Palladin Av., 32, Kyiv, 03142, Ukraine

#### COMPARATIVE ANALYSIS OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN THE ODESSA MAGNETIC ANOMALY AREA IN THE 24TH SOLAR ACTIVITY CYCLE

*Purpose:* The main oscillation periods of the geomagnetic field perturbation level in the Odessa magnetic anomaly area are studied by the data observed at the "Odessa" geomagnetic observatory within the 24th solar activity cycle. The work is purposed to search for distinctions and similarity in manifestation and properties of short-term and long-term geomagnetic quasi-periodical variations under the conditions of anomalous, at the "Odessa" geomagnetic observatory, and poorly anomalous, at the "Kyiv" geomagnetic observatory, geomagnetic fields.

*Design methodology/approach:* The data of high-time resolution digital magnetometers were used. Search for the fluctuation periods was made by the rapid continuous wavelet transform and the short-term Fourier transform (STFT). For the selection and subsequent separate analysis of fluctuations corresponding to different periods and spectral regions, the band-pass Fourier filtering was used.

*Findings:* The change of periods of solar diurnal variations of geomagnetic field (24, 12, 8, 6 h) during the magnetic storms is determined. The shortest periods, 2 h and less, showed up in the "Odessa" geomagnetic observatory data. By the observations in the "Odessa" observatory, the increase of amplitude of short periods (4–5 h) with time during 2008–2013 has been marked. The variations with periods 6, 8 h react upon geomagnetic disturbances by the smooth increase of amplitude. Periods 4–5 h are recorded during strong magnetic storms, and weak variations with periods less than 4 h often appear during weak magnetic storms. Period about 27 days prevails in the "Kyiv" geomagnetic observatory data, and that of about 37 days – in the "Odessa" geomagnetic observatory data. The changes of amplitude of solar diurnal variations of geomagnetic field during 2015 by the "Odessa" observatory data are determined for the subsequent comparing to the solar activity behavior.

*Conclusions:* Generalization of results shows differences in behavior of the basic periods of geomagnetic activity in the Odessa magnetic anomaly area (the "Odessa" observatory) and under the conditions of the poorly anomalous geomagnetic field (the "Kyiv" observatory). At the "Odessa" observatory, the short periods show up more noticeably, less than 6 h. At the "Kyiv" observatory, the long duration periods prevail (from a few days up to a few tens of days).

*Key words:* space weather, solar activity, geomagnetic field, magnetic storms, solar diurnal variations, magnetic anomaly, magnetosphere, ionosphere, wavelet analysis

M. I. Рябов<sup>1</sup>, А. Л. Сухарев<sup>1</sup>, М. І. Орлюк<sup>2</sup>,  
Л. І. Собітняк<sup>1</sup>, А. А. Роменець<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Обсерваторія "УРАН-4",  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Пушкінська 37, м. Одеса, 65011, Україна.

<sup>2</sup> Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,  
пр. Палладіна, 32, м. Київ, 03142, Україна.

#### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЕОМАГНІТНОЇ ЗБУРЕНОСТІ В ЗОНІ ОДЕСЬКОЇ МАГНІТНОЇ АНОМАЛІЇ В 24 ЦИКЛІ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

*Предмет і мета роботи:* Вивчаються основні періоди коливань рівня збуреності геомагнітного поля в зоні Одеської магнітної аномалії за даними спостережень в геомагнітній обсерваторії "Одеса" в 24 циклі сонячної активності. Метою роботи є пошук відмінностей і подібності у прояві та властивостях короткочасних і довготривалих геомагнітних квазіперіодичних коливань в умовах аномального в геомагнітній обсерваторії "Одеса" і слабоаномального в геомагнітній обсерваторії "Київ" геомагнітного поля.

*Методи та методологія:* Використовувалися дані цифрових магнітометрів з високою часовою роздільною здатністю. Пошук періодів коливань виконувався за допомогою швидкого безперервного вейвлет-перетворення і короткочасного фур'є-перетворення (STFT). Для виділення і подальшого роздільного аналізу коливань, відповідних різним періодам і спектральним областям, застосовувалася смугова фур'є-фільтрація.

*Результати:* Визначено зміну періодів сонячно-добових варіацій геомагнітного поля (24, 12, 8, 6 год) під час магнітних бур. Найкоротші періоди, 2 год і менше, виявлялися в даних геомагнітної обсерваторії "Одеса". За спостереженнями в обсерваторії "Одеса" відзначається збільшення амплітуди коротких періодів (4÷5 год) з часом протягом 2008–2013 рр. Коливання з періодами 6, 8 год реагують на геомагнітні збурення плавним збільшенням амплітуди. Періоди 4÷5 год реєструються під час сильних магнітних бур, а слабкі коливання з періодами менше 4 год часто виникають під час слабких магнітних бур. Період близько 27 діб переважає в даних геомагнітної обсерваторії "Київ", і близько 37 діб – в даних геомагнітної обсерваторії "Одеса". Визначено зміни амплітуди сонячно-добових варіацій геомагнітного поля протягом 2015 р. за даними обсерваторії "Одеса" для подальшого порівняння з проявами сонячної активності.

*Висновки:* Узагальнення результатів показує відмінності у прояві основних періодів геомагнітної активності в зоні Одеської магнітної аномалії (обсерваторія "Одеса") і в умовах слабоаномального геомагнітного поля (обсерваторія "Київ"). В обсерваторії "Одеса" помітніше виявляються короткі періоди, менше 6 год. В обсерваторії "Київ" переважають довготривалі періоди (від декількох діб до декількох десятків діб).

*Ключові слова:* космічна погода, сонячна активність, геомагнітне поле, магнітні бурі, сонячно-добові коливання, магнітна аномалія, магнітосфера, іоносфера, вейвлет-аналіз

Стаття постуила в редакцію 26.01.2019