

УДК 550.385.37:550.388

О ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЯХ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН

© 2021 г. С. А. Рябова^{1,2,*}, С. Л. Шалимов^{2,3,**}

¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

**E-mail: pmsk7@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

После доработки 28.07.2020 г.

Принята к публикации 28.07.2020 г.

Работа посвящена анализу спектров геомагнитных вариаций, вычисленных в диапазонах периодов, близких к периодам планетарных волн: 5, 10 и 16 сут. Используются результаты регистрации геомагнитного поля на Геофизической обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер РАН. Спектральное оценивание на основе параметрического подхода выполнено в зимний и летний периоды времени для 2009 г. (низкая солнечная активность) и 2015 г. (высокая солнечная активность). Впервые установлено, что гармоники, непосредственно связанные с проявлением атмосферных планетарных волн во всем диапазоне 4–17 сут, наблюдаются только в зимний период, причем изменения атмосферного давления независимо от солнечной активности опережают изменения геомагнитного поля примерно на месяц. В спектрах вариаций геомагнитного поля в диапазоне 4–17 сут выделены гармоники 27-суточной геомагнитной периодичности и гармоники, связанные с модуляционным воздействием на них 11-летним циклом, годовой и полугодовой вариаций, а в спектрах в диапазоне периодов от 12 до 17 сут удалось идентифицировать гармоники с периодами, близкими к периодам приливных волн M_f и M_{sf} .

Ключевые слова: планетарные волны, вариации магнитного поля Земли, модуляция, лунно-солнечный прилив.

DOI: 10.31857/S0002333721010075

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные вариации, наблюдаемые на земной поверхности, регистрируются в достаточно широком диапазоне периодов: от вековых вариаций (длительностью десятки–сотни лет) до вариаций длительностью несколько минут – доли секунд. В частности, обычными источниками последних (так называемый диапазон ультранизких частот, 0.01–30 Гц) считают геомагнитные пульсации $Pc1/Pi1$, шумановские резонансы, ионосферный альвеновский резонатор, шумовой сигнал увеличенной амплитуды вблизи грозовых фронтов и квазипериодические сигналы после спрайтов, прохождение внутренних атмосферных волн через ионосферу [Троицкая, Гульельми, 1969; Belyaev et al., 1990; Fraser-Smith, 1993; Fullekrug et al., 1998; Shalimov, Bosinger, 2006; Куницын, Шалимов, 2011]. Во всех названных исследованиях источником магнитных сигналов считают магнитосферу, ионосферу или атмосферу.

Наибольшую интенсивность в геомагнитных вариациях имеют приливные гармоники, которые проявляются во всех геосферах (от внутреннего ядра до ионосферы) [Рябова, Спивак, 2019], причем во внешних геосферах (атмосфера, ионосфера) воздействие обусловлено в основном термическими приливами (т.е. воздействием на внешние геосферы со стороны Солнца) [Шалимов, 2018]. Анализ показывает, однако, что достаточно часто происхождение интенсивных спектральных пиков трудно связать с гармониками приливов. При этом они оказываются достаточно близкими к периодам в 5, 10 и 16 дней. В свою очередь эти периоды соответствуют так называемым планетарным волнам или волнам Россби в атмосфере Земли, посредством которых осуществляется связь между различными внешними оболочками.

Наиболее разработанный теоретический подход для описания планетарных волн в атмосфере основан на поиске решений линеаризованных однородных уравнений для неподвижной изотер-

мической атмосферы на вращающейся сфере (эти решения иногда называют “нормальные моды волн Россби”). Каждая мода представляется упорядоченной парой целых чисел $(m, n - m)$, где m – зональное волновое число, n – индекс меридиональной структуры (связанный с индексом функции Хафа). Для возмущений геопотенциала меридиональная структура будет симметричной относительно экватора для нечетных $n - m$ и антисимметричной для четных. Обычно регистрируют возмущения атмосферных параметров в диапазоне периодов $T \approx 4.5$ – 6.2 дня, $T \approx 7.5$ – 12 дней, $T \approx 11$ – 21 день. В соответствии с теоретическим подходом эти возмущения принято называть квази-5-дневными, квази-10-дневными и квази-16-дневными волнами и обозначать как (1,1), (1,2), (1,3). Наиболее интенсивными в спектре являются квази-16-дневные волны.

Атмосферные планетарные волны имеют отличную от нуля вертикальную скорость [Hirota, Niigooka, 1984], которая, однако, невелика (2–10 км/день). В результате ожидаемая их связь с ионосферой может (в зависимости от условий прохождения) либо отсутствовать, либо наблюдаться со значительной задержкой во времени.

Следствием проникновения энергии атмосферных планетарных волн на высоты ионосферы стало бы либо непосредственное обнаружение вариаций ионосферных параметров в диапазоне периодов этих волн, либо наземная регистрация вариаций геомагнитного поля в указанном диапазоне. В последнем случае вариации были бы обусловлены воздействием планетарных волн на ионосферные токи (текущие в нижней ионосфере, на высотах слоя E). Причина воздействия – соударения нейтральных и заряженных частиц в слабоионизованной плазме ионосферы.

Типичные для атмосферных планетарных волн периоды были сначала обнаружены в вариациях ионосферного поглощения радиоволн (D-область), причем эти периоды ассоциировались с одновременными 5-дневными волнами в стратосфере [Frazer, 1977]. Позднее по наземным наблюдениям были зарегистрированы квази-16-дневные осцилляции горизонтальной компоненты магнитного поля и, с опережением в 1 мес., осцилляции давления на высотах стратосферы [Kohsiek et al., 1995].

В настоящей работе с использованием результатов геомагнитного мониторинга на геофизической обсерватории “Михнево” и методов спектрального анализа исследованы спектральные гармоники геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 4 до 17 сут.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Исследование основано на анализе спектров геомагнитных вариаций, зарегистрированных на

Геофизической обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер РАН. Регистрация геомагнитных вариаций на обсерватории выполняется с дискретизацией 1 с с помощью цифрового трехкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018, размещенного в специально оборудованном павильоне. Магнитометр LEMI-018 имеет высокую разрешающую способность – 10 пТл, низкий уровень шумов на 1 Гц – < 10 ср. кв. пТл, что позволяет достоверно зарегистрировать даже слабые изменения в магнитном поле Земли.

При выполнении спектрального оценивания в настоящих исследованиях применяется параметрический подход, подразумевающий создание математической модели для аппроксимации порождающего процесса исследуемого временного ряда. При этом спектральная плотность мощности (СПМ) становится функцией параметров такой модели [Гольденберг и др., 1985]. Применение параметрических методов не требует создания окон, подавляющих растекание спектра, и, следовательно, позволяет повысить разрешающую способность. Качество оценки определяется соответствием выбранной модели рассматриваемому процессу [Бычков и др., 2017].

При вычислении спектров геомагнитных вариаций используется авторегрессионная (АР) модель, которая представляет собой уравнение, предсказывающее k -й член последовательности по p предыдущим [Рабинер, Гоулд, 1978]:

$$x(k) = -\sum_{n=1}^p a_n x(k-n) + \varepsilon(k),$$

где: a_n – коэффициенты авторегрессии; $\varepsilon(k)$ – остаточный член регрессии; p – порядок модели.

СПМ определяется по следующему выражению [Марпл, 1990]:

$$S = \frac{1}{2\pi \left| 1 + \sum_1^p a_n e^{-i\omega n} \right|^2}.$$

При построении АР-модели для определения коэффициентов используется система уравнений Юла–Уокера [Сергиенко, 2011], для решения этой системы используется рекуррентная процедура – метод Левинсона–Дурбина [Durbin, 1960; Levinson, 1946].

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Остановимся подробнее на анализе спектров геомагнитных вариаций в диапазоне, близком к периоду 5-суточной планетарной волны. На рис. 1 приведены спектры за периоды: с декабря 2008 г. по февраль 2009 г. (зимний период, низкая солнечная активность), с июня 2009 г. по август 2009 г. (летний период, низкая солнечная активность), с

декабря 2014 г. по февраль 2015 г. (зимний период, высокая солнечная активность), с июня 2015 г. по август 2015 г. (летний период, высокая солнечная активность). Анализ спектров, приведенных на рис. 1, показывает, что во всех спектрах присутствует спектральная составляющая, которую можно отождествить с одной из гармоник 27-суточной геомагнитной вариации (приблизительно 6 сут). Напомним, что 27-суточные вариации связывают с периодом обращения видимой поверхности Солнца относительно земного наблюдателя (периодичность обусловлена неравномерным распределением активных областей на Солнце). Кроме того, в спектрах можно идентифицировать целый ряд спектральных гармоник, обусловленных так называемым модуляционным воздействием длиннопериодных вариаций на более короткопериодные [Рябова, Спивак, 2019], т.е. в спектрах присутствуют гармоники с частотами ω_0 (основная гармоника), $\omega_0 + \Omega$ (верхняя боковая гармоника) и $\omega_0 - \Omega$ (нижняя боковая гармоника), где ω_0 – круговая частота немодулированного несущего колебания, Ω – частота модуляции амплитуды несущего колебания [Андреев, 1982]. Например, в спектре за зимний период 2009 г. пик с периодом 6 сут – гармоника 27-суточной периодичности; пики с периодами ~5.98 и ~6.02 сут – модуляционное воздействие на эту гармонику 11-летним циклом; пики с периодами ~5.9 и ~6.1 сут – модуляционное воздействие на эту гармонику годовой вариации; пики с периодами 5.81 и 6.21 сут – модуляционное воздействие на эту гармонику полугодовой вариации. Как видно из рис. 1, такие же пики хорошо идентифицируются в спектре и в другие временные промежутки. Однако в целом они лучше проявляются в период сильной солнечной активности.

Для исследования проявлений планетарных волн в геомагнитных вариациях интерес представляет наличие в спектре гармоник с периодом, близким к пяти суткам. Как показывает анализ вычисленных спектров (рис. 1), такого рода гармоника отчетливо идентифицируется только в зимний период времени. При этом установлено, что интенсивность гармоник с периодом, близким к 5-суточной планетарной волне (в отличие от модуляционных гармоник), слабо зависит от солнечной активности, причем при переходе от низкой к высокой солнечной активности положение пика интенсивности квази-5-дневной волны достаточно стабильно.

Анализ спектров геомагнитных вариаций в диапазоне, близком к периоду 10-суточной планетарной волны (рис. 2), таким же образом демонстрирует наличие спектральных гармоник. Часть из них, как и в случае спектров в диапазоне периодов от 4 до 7 сут, можно объяснить модуляционным воздействием: 11-летнего цикла, годо-

вой и полугодовой вариаций. В этом диапазоне обнаруживается та же зависимость спектрального состава от сезона и солнечной активности: присутствие в спектре 10-суточной планетарной волны только в случае зимнего периода времени (приблизительно с одинаковой интенсивностью вне зависимости от уровня солнечной активности); увеличение интенсивности гармоник, обусловленных амплитудно-модулируемым воздействием в период сильной солнечной активности. Также можно отметить небольшой сдвиг пика квази-10-дневной волны в длиннопериодную область при переходе от низкой к высокой солнечной активности.

Кроме того, в настоящей работе выполнен анализ спектров геомагнитных вариаций в двухнедельном диапазоне (16-суточная планетарная волна). Из рис. 3 видно, что в спектре можно идентифицировать двухнедельную гармонику 27-суточной периодичности и пики, обусловленные модуляционным воздействием 11-летнего цикла, годовой и полугодовой вариаций. Наблюдается увеличение интенсивности вариаций в периоды высокой солнечной активности.

Здесь следует отметить, что в спектрах удается идентифицировать несколько гармоник. Наличие в спектрах пиков с периодами ~13.66 и ~14.76 сут и в зимний, и летний период в периоды высокой и низкой солнечной активности можно объяснить проявлением в спектре воздействия лунно-солнечного прилива [Адушкин и др., 2017; Шереметьева, 2011], поскольку периоды этих гармоник близки к периодам приливных волн M_f и M_{sf} [Riabova, 2018]. Причем в период низкой солнечной активности проявление этих гармоник значительнее.

Детальный анализ спектров в двухнедельном диапазоне выявил в спектрах геомагнитного поля в зимний период гармоники с квази-16-суточным периодом, которые можно интерпретировать как проявление атмосферной планетарной 16-суточной волны. В летний период не удается идентифицировать такую гармонику. Можно отметить также небольшой сдвиг пика квази-16-дневной волны в длиннопериодную область при переходе от низкой к высокой солнечной активности и независимость интенсивности вариации от уровня солнечной активности.

Все полученные результаты суммированы в табл. 1–табл. 3. Как видно из приведенных в табл. 1–табл. 3 данных, исследование спектров в диапазонах, близких к периодам планетарных волн (5, 10 и 16 сут), позволяет сделать следующие выводы.

Большая часть спектральных пиков обусловлена гармониками 27-суточной геомагнитной вариации и модуляционным воздействием на них 11-летним циклом, годовой и полугодовой вари-

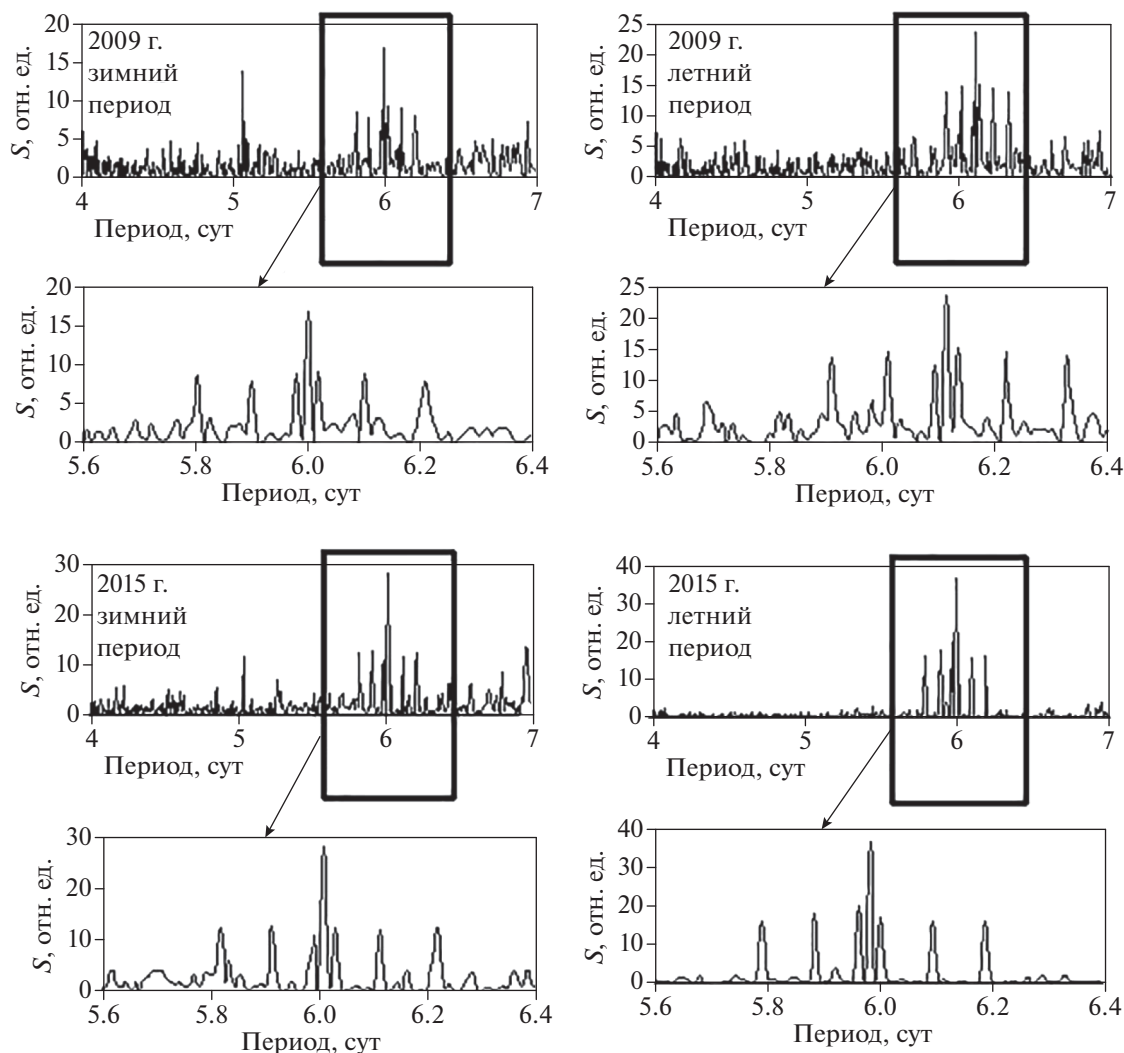


Рис. 1. Спектры геомагнитных вариаций в диапазоне от 4 до 7 сут (в поле рисунка указан временной промежуток, за который использовались данные при вычислении).

ций. В двухнедельном диапазоне присутствуют гармоники с периодами, близкими к периодам приливных волн M_f и M_{sf} . При этом спектральные пики, которые можно связать непосредственно с проявлением атмосферных планетарных волн, идентифицируются только в зимний период времени. Заметим, что интенсивности всех указанных спектральных пиков оказываются сопоставимыми.

С привлечением данных регистрации атмосферного давления, выполненной автоматизированной метеорологической станцией Davis Vantage Pro2, был проведен анализ кросскорреляционной связи между вариациями магнитного поля и атмосферного давления в приземном слое атмосферы. При вычислении кросскорреляграммы выполнялась фильтрация цифровых рядов в диапазонах, близких к периодам планетарных

волн: от 4 до 5.5 сут, от 10 до 11 сут и от 15.5 до 17 сут. В качестве примера на рис. 4 приведена кросскорреляграмма между вариациями геомагнитного поля и атмосферного давления, зарегистрированными с декабря 2008 г. по февраль 2009 г. (цифровые ряды предварительно отфильтрованы в диапазоне от 15.5 до 17 сут). Как видно из рис. 4, максимальный коэффициент корреляции наблюдается на лаге ~ 30 сут и равен 0.82, что свидетельствует о том, что изменения атмосферного давления опережают изменения геомагнитного поля примерно на месяц. Аналогичные результаты получены при вычислении кросскорреляграмм при использовании данных, отфильтрованных в других диапазонах в зимний период (табл. 4). Следует отметить, что в летний период времени коэффициент корреляции не превышает 0.2 при любом временном лаге. Таким образом, исходя из получен-

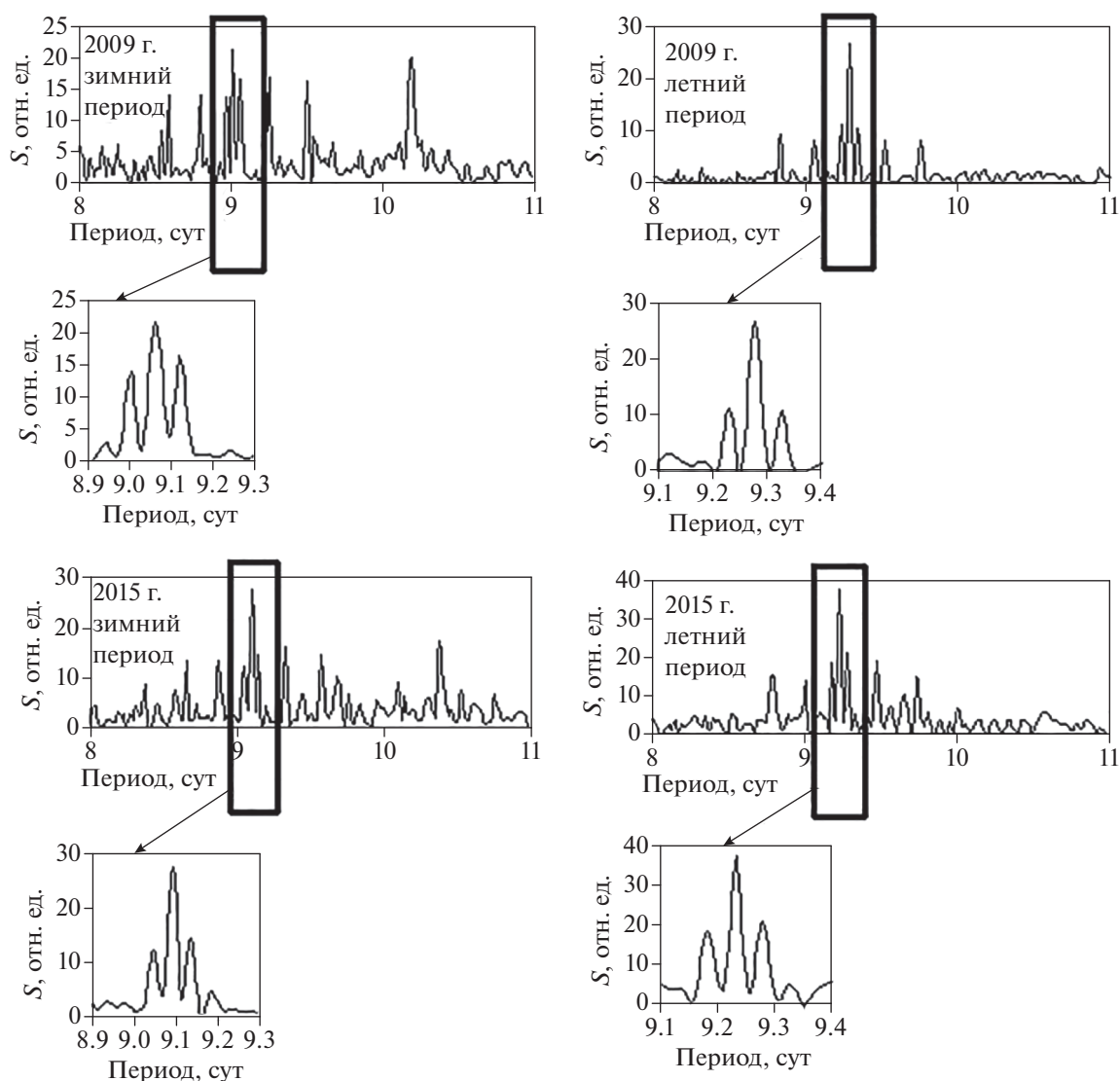


Рис. 2. Спектры геомагнитных вариаций в диапазоне от 8 до 11 сут (в поле рисунка указан временной промежуток, за который использовались данные при вычислении).

ных результатов, можно утверждать, что в зимний период изменения атмосферного давления в рассматриваемых диапазонах периодов независимо от солнечной активности опережают изменения геомагнитного поля примерно на месяц.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ спектров геомагнитных вариаций, проведенный в настоящей работе в диапазонах периодов, близких к периодам планетарных волн (5, 10 и 16 сут), показал, что кроме периодов планетарных волн указанный диапазон содержит гармоники 27-дневных вариаций и их модуляцию, обусловленную воздействием на них 11-летним циклом, годовой и полугодовой вариаций, а в спектрах в диапазоне периодов от 12 до 17 сут

идентифицированы гармоники с периодами, близкими к периодам приливных волн M_f и M_{sf} . Помимо названных наиболее интенсивных гармоник присутствуют также пики небольшой интенсивности, обусловленные возможными волновыми взаимодействиями, но для их идентификации необходимо провести дополнительное исследование.

Непосредственное проявление в геомагнитных вариациях периодов планетарных волн, как установлено в настоящей работе, демонстрирует следующие особенности: 1) гармоники атмосферных планетарных волн в геомагнитных вариациях (5, 10 и 16 сут) наблюдаются только в зимний период; 2) вариации атмосферного давления для этих периодов независимо от солнечной ак-

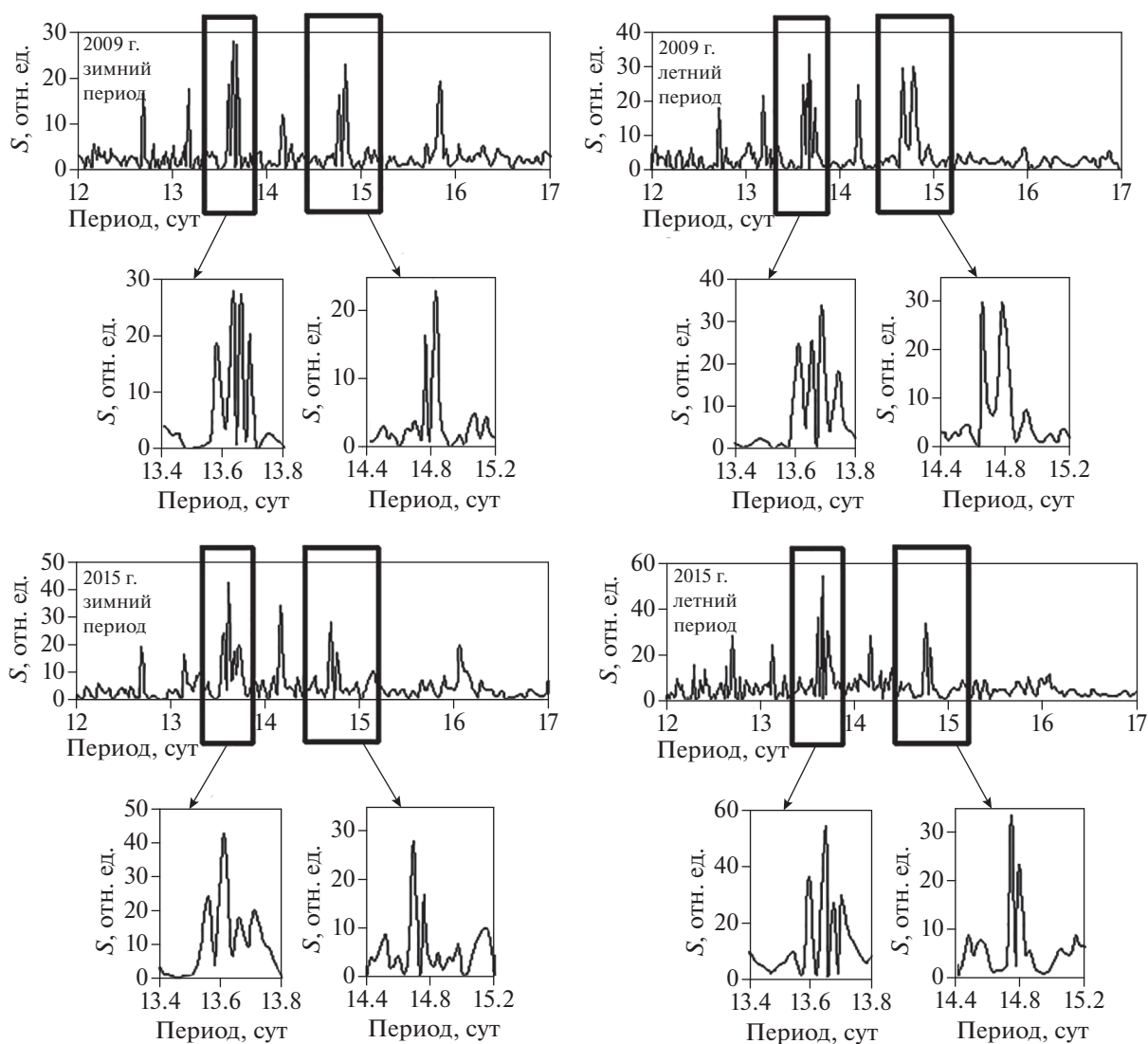


Рис. 3. Спектры геомагнитных вариаций в диапазоне от 12 до 17 сут (в поле рисунка указан временной промежуток, за который использовались данные при вычислении).

тивности опережают вариации геомагнитного поля приблизительно на месяц.

Известно, что для вертикально распространяющихся планетарных волн имеет место критерий Чарни–Драйзина [Charney, Drazin, 1960], согласно которому эти волны не могут проникать через летние системы восточных ветров. Волны не могут распространяться и через сильные зимние западные ветры. Этот критерий позволяет понять, почему планетарные волны могут достигать ионосферы (и, следовательно, возбуждать геомагнитные вариации) только в зимний период.

Следует отметить, однако, что существуют наблюдения [Шалимов и др., 2006], которые свидетельствуют о вариациях ионосферных параметров в диапазоне периодов планетарных волн и в летний период (в частности, с квазипериодами 2

и 7 дней). Их исследование будет проведено в специальной работе.

Используя результаты настоящего исследования (табл. 4 и рис. 4), можно оценить вертикальную скорость распространения планетарных волн. В предположении, что источник волн находится в тропосфере, получаем, что волна, достигающая нижней ионосферы за 30 дней, распространяется с вертикальной скоростью приблизительно 3 км/день.

Таким образом, проведенные наземные измерения геомагнитных вариаций на средних широтах и их спектральный анализ показывают, что воздействие на ионосферу (приводящее к наблюдаемым геомагнитным вариациям) осуществляется как со стороны Солнца, так и со стороны атмосферы (посредством планетарных волн). Возбуждаемые при этом геомагнитные вариации

Таблица 1. Выделенные спектральные гармоники в спектре геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 4 до 7 сут

Возможное Объяснение	Спектральные составляющие			
	с декабря 2008 г. по февраль 2009 г.	с июня 2009 г. по август 2009 г.	с декабря 2014 г. по февраль 2015 г.	с июня 2015 г. по август 2015 г.
Планетарная волна	5.07 сут	—	5.03 сут	—
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	5.81 сут	5.91 сут	5.81 сут	5.79 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	5.9 сут	6.01 сут	5.91 сут	5.88 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	5.98 сут	6.09 сут	5.99 сут	5.96 сут
Гармоника 27-суточной периодичности магнитного поля	6 сут	6.11 сут	6.01 сут	5.98 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	6.02 сут	6.13 сут	6.03 сут	6 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	6.1 сут	6.22 сут	6.11 сут	6.09 сут
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	6.21 сут	6.33 сут	6.22 сут	6.19 сут

Таблица 2. Выделенные спектральные гармоники в спектре геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 8 до 11 сут

Возможное объяснение	Спектральные составляющие			
	с декабря 2008 г. по февраль 2009 г.	с июня 2009 г. по август 2009 г.	с декабря 2014 г. по февраль 2015 г.	с июня 2015 г. по август 2015 г.
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	8.59 сут	8.82 сут	8.66 сут	8.78 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	8.8 сут	9.05 сут	8.87 сут	9 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	8.96 сут	9.23 сут	9.05 сут	9.18 сут
Гармоника 27-суточной периодичности магнитного поля	9.02 сут	9.27 сут	9.09 сут	9.23 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	9.07 сут	9.33 сут	9.14 сут	9.28 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	9.25 сут	9.52 сут	9.33 сут	9.48 сут
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	9.49 сут	9.76 сут	9.58 сут	9.73 сут
Планетарная волна	10.2 сут	—	10.38 сут	—

Таблица 3. Выделенные спектральные гармоники в спектре геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 12 до 17 сут

Возможное объяснение	Спектральные составляющие			
	с декабря 2008 г. по февраль 2009 г.	с июня 2009 г. по август 2009 г.	с декабря 2014 г. по февраль 2015 г.	с июня 2015 г. по август 2015 г.
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	12.67 сут	12.72 сут	12.67 сут	12.69 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	13.16 сут	13.19 сут	13.14 сут	13.13 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	13.58 сут	13.61 сут	13.56 сут	13.6 сут
Гармоника 27-суточной периодичности магнитного поля	13.63 сут	13.69 сут	13.61 сут	13.65 сут
Деклинационная волна M_f	13.66 сут	13.66 сут	13.66 сут	13.67 сут
Модуляционное воздействие 11-летнего цикла	13.69 сут	13.74 сут	13.71 сут	13.7 сут
Модуляционное воздействие годовой вариации	14.14 сут	14.20 сут	14.14 сут	14.16 сут
Модуляционное воздействие полугодовой вариации	14.72 сут	14.81 сут	14.69 сут	14.73 сут
Приливная волна M_{sf}	14.78 сут	14.75 сут	14.75 сут	14.8 сут
Планетарная волна	15.82 сут	–	16.07 сут	–

Таблица 4. Результаты вычисления кросскоррелограммы: лаг с максимальным коэффициентом корреляции (lag) и значение максимального коэффициента корреляции (R)

Параметр	Период времени			
	с декабря 2008 г. по февраль 2009 г.	с июня 2009 г. по август 2009 г.	с декабря 2014 г. по февраль 2015 г.	с июня 2015 г. по август 2015 г.
Данные отфильтрованы в диапазоне от 4 до 5.5 сут				
lag	29 сут	–	28 сут	–
R	0.85	–	0.9	–
Данные отфильтрованы в диапазоне от 10 до 11 сут				
lag	27 сут	–	31 сут	–
R	0.76	–	0.86	–
Данные отфильтрованы в диапазоне от 15.5 до 17 сут				
lag	30 сут	–	32 сут	–
R	0.82	–	0.82	–

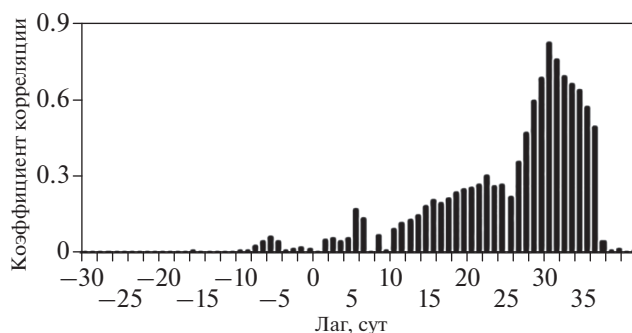


Рис. 4. Кросс-коррелограмма между вариациями геомагнитного поля и атмосферного давления (декабрь 2008 г. — февраль 2009 г.).

имеют вполне сопоставимые интенсивности в спектре. Однако атмосферные волны в исследованном диапазоне периодов 4–17 сут достигают высот ионосферы только в зимний период. Этот вывод ранее был надежно известен только для квази-16-дневной волны [Kohsiek et al., 1995]. Именно эта волна, как считают, ответственна за нарушение симметрии приполюсного вихря и внезапные стратосферные потепления в зимнем полушарии [Шалимов, 2018]. Результаты настоящей работы позволяют сделать вывод о том, что атмосферные волны с зональными числами $m = 1$ во всем диапазоне периодов 4–17 сут могут давать вклад в развитие стратосферных потеплений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рябова С.А., Харламов В.А. Приливные эффекты в геомагнитных вариациях // Докл. РАН. 2017. Т. 474. № 2. С. 226–229.
- Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь. 1982. 280 с.
- Бычков Б.И., Кудряшов Н.И., Гуренко В.В. Качественная оценка некоторых методов спектрального анализа // Радиостроение. 2017. № 1. С. 34–46.
- Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов. Справочник. М.: Радио и связь. 1985. 312 с.
- Куницын В.Е., Шалимов С.Л. Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2011. № 5. С. 75–78.
- Марпл-младший С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир. 1990. 265 с.
- Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир. 1978. 835 с.
- Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные вариации в приземной зоне Земли. М.: Графитекс. 2019. 150 с.
- Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ Петербург. 2011. 756 с.
- Троцкая В.А., Гильельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // УФН. 1969. Т. 97. С. 453–494.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН. 2018. 390 с.
- Шалимов С.Л., Лапшин В.М., Халдонис Х. Структура планетарных возмущений среднеширотной ионосферы по наблюдениям со спутников GPS // Космические исследования. 2006. Т. 44. № 6. С. 483–487.
- Шереметьева О.В. Составляющие геомагнитных вариаций с частотами приливных волн // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51. № 2. С. 224–228.
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V. 1990. The ionospheric Alfvén resonator // J. Atm. Terr. Phys. 1990. V. 52. P. 781–788.
- Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 83.
- Durbin J. The fitting of time series models // Rev. Intern. Stat. Inst. 1960. V. 28. P. 233–244.
- Fraser G. The 5-day wave and ionospheric absorption // J. Atm. Terr. Phys. 1977. V. 39. P. 121–124.
- Fullekrug M., Fraser-Smith A.C., Reising S.S. Ultraslow tails of sprite-associated lightning flashes // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 3497–3500.
- Hirota I., Hirooka T. Normal mode Rossby waves observed in the upper stratosphere. Part I: first symmetric modes of zonal wavenumbers 1 and 2 // J. Atm. Sci. 1984. V. 41. P. 1253–1267.
- Kohsiek A., Glassmeier K.H., Hirooka T. Periods of planetary waves in geomagnetic variations // Ann. Geophys. 1995. V. 13. P. 168–176.
- Levinson N. The Wiener RMS (root mean square) error criterion infilter design and prediction // J. Math. Phys. 1946. V. 25. P. 261–278.
- Riabova S. Features of geomagnetic field variations mid-latitude observatories in range of period and half-period of Carrington. 20th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development “Geomodel 2018”. <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=94171>
- Shalimov S., Bosinger T. An alternative explanation for the ultra-slow tail of sprite-associated lightning discharge // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 814–820.

On the Geomagnetic Variations Observed on the Earth's Surface in the Period Range of Planetary Waves

S. A. Riabova^{a, b, *} and S. L. Shalimov^{b, c, **}

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^c*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: riabovasa@mail.ru*

***e-mail: pmsk7@mail.ru*

The spectra of geomagnetic variations calculated in the period range close to planetary waves—5, 10, and 16 days are analyzed. The records of the geomagnetic field at the Geophysical Observatory “Mikhnevo” of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences are used. Spectral estimation based on the parametric approach is carried out for the winter and summer periods of 2009 (low solar activity) and 2015 (high solar activity). For the first time, it is established that the harmonics directly related to the manifestation of the atmospheric planetary waves in the entire period range from 4 to 17 days are only observed in winter and, irrespective of solar activity, the changes in the atmospheric pressure are about a month ahead of the changes in the geomagnetic field. In the spectra of variations of the geomagnetic field in the period range of 4–17 days, harmonics of the 27-day geomagnetic periodicity and harmonics associated with their modulation by the 11-year solar cycle, annual and semiannual variations are revealed. In the spectra for the period range from 12 to 17 days, harmonics with periods close to tidal waves M_f and M_{sf} are identified.

Keywords: planetary waves, variations in the Earth's magnetic field, modulation, lunar–solar tide