

УДК 550.385.37:550.388

АТМОСФЕРНЫЕ ПЛАНЕТАРНЫЕ ВОЛНЫ НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ МОСКВА (ИЗМИРАН)

© 2023 г. С. А. Рябова^{a, b, *}, С. Л. Шалимов^a

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^bИнститут динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,
ул. Ленинский проспект, 38, корпус 1, Москва, 119334 Россия

*e-mail: ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2023 г.

После доработки 08.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

По данным мониторинга горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля и высотно-частотного зондирования критической частоты F-слоя ионосферы на обсерватории “Москва” исследованы вариации ионосферного тока в нижней ионосфере и плотности плазмы верхней ионосферы. Показано, что в спектрах временных вариаций геомагнитного поля и критической частоты F2-слоя в диапазоне планетарных волн в зимний период присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие квази-5, 10 и 16-дневным планетарным волнам. Привлечение данных регистрации геомагнитного поля за двадцатилетний временной интервал (с 2001 по 2020 гг.) позволило выделить более тонкие эффекты, а именно, выделены гармоники, связанные с модуляционным воздействием более длиннопериодных вариаций и приливным воздействием.

Ключевые слова: планетарные волны, вариации плотности ионосферной плазмы, вариации магнитного поля Земли, модуляция, лунно-солнечный прилив

DOI: 10.31857/S0002351523060081, **EDN:** OQSNVN

ВВЕДЕНИЕ

К планетарным волнам относят любые возмущения метеорологических параметров (температуры, ветра, плотности и давления), периодические по долготе или по времени, имеющие зональный (вдоль широты) масштаб порядка радиуса Земли и временной масштаб заметно превышающий период обращения Земли вокруг своей оси [Дикий, 1969]. Обычно регистрируют возмущения атмосферных параметров в диапазоне периодов $T \approx 4.5\text{--}6.2$ дня, $T \approx 7.5\text{--}12$ дней, $T \approx 11\text{--}21$ день. В соответствии с теоретическим подходом эти возмущения принято называть квази-5-дневными, квази-10-дневными и квази-16-дневными волнами. Наиболее интенсивными в спектре являются квази-16-дневные волны.

По-видимому, первыми наблюдениями ионосферных вариаций с периодами, типичными для атмосферных планетарных волн (5, 10 и 16 дней) можно считать обнаружение 5-дневных вариаций

ионосферного поглощения радиоволн (D-область), которые ассоциировались с одновременными 5-дневными волнами в стратосфере [Fraser, 1977]. Позднее по наземным наблюдениям были зарегистрированы квази-16-дневные осцилляции горизонтальной компоненты магнитного поля и одновременные осцилляции критической частоты ионосферного слоя F [Forbes and Leveroni, 1992]. Эти осцилляции предлагалось рассматривать как следствие проникновения энергии планетарных волн на высоты ионосферы. Также по наземным наблюдениям были зарегистрированы квази-16-дневные осцилляции горизонтальной компоненты магнитного поля, которым с опережением в 1 мес. предшествовали осцилляции давления на высотах стратосферы [Kohsiek et al., 1995].

Вместе с тем, моделирование распространения планетарных волн в верхнюю атмосферу [Hagan et al., 1993] и эксперимент [Deng et al., 1997] показывают невозможность проникновения этих возмущений существенно выше 100 км. Поэтому появлению определенности в вопросе о передаче энергии планетарных волн на высоты ионосферы могут способствовать только дальнейшие экспериментальные исследования с обнаружением вари-

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

аций ионосферных параметров в диапазоне периодов этих волн, либо наземная регистрация вариаций геомагнитного поля в указанном диапазоне. В последнем случае вариации обусловлены воздействием планетарных волн на токи, протекающие в нижней ионосфере.

В настоящей работе с использованием результатов геомагнитного мониторинга и вертикального зондирования на обсерватории “Москва”, а также методов спектрального анализа исследованы спектральные гармоники в диапазоне периодов от 4 до 40 сут. Кроме того, выполнен детальный анализ спектра в диапазоне периодов от 12.5 до 17 сут по данным регистрации магнитного поля Земли с 2001 по 2020 гг.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

При проведении настоящих исследований привлекались данные геомагнитного мониторинга и высотно-частотного зондирования на обсерватории “Москва”. Обсерватория расположена в 18 км от города Москвы, в селе Красная Пахра (Московская область), на территории Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН). Географические координаты: 55.47° с.ш., 37.32° в.д.

В качестве исходных данных, отражающих вариации ионосферного тока на высотах нижней ионосферы около 100 км (Е слой), использовались результаты инструментальных наблюдений за вариациями горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля. Нами была выбрана эта компонента, поскольку результаты наших предыдущих исследований с привлечением данных инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями на Геофизической обсерватории “Михнево” Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук [Riabova and Shalimov, 2020; Рябова и Шалимов, 2021б] и на Центральной геофизической обсерватории “Бельск” Геофизического института Польской академии наук [Рябова и Шалимов, 2022] свидетельствуют о проявлении влияния атмосферных волн на ионосферную плазму именно в спектре горизонтальной компоненты геомагнитного поля.

Обсерватория “Москва” обладает широким техническим оснащением для измерения компонент магнитного поля Земли. Использовались данные, представленные на сайте международного проекта SuperMag [Gjerloev, 2012]. По результатам данных геомагнитного мониторинга были сформированы цифровые ряды вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля с дискретизацией 1 час (как средние арифме-

тические значения 1-минутных данных за 1 час) за двадцатилетний период (с 2001 по 2020 гг.) и с дискретизацией 1 мин за два временных интервала (декабрь 2014 г.—февраль 2015 г., декабрь 2018 г.—февраль 2019 г.).

В качестве параметра, отражающего вариации плотности плазмы F-слоя ионосферы, использовались данные о вариациях критической частоты F2-слоя, полученные в ходе вертикального зондирования цифровым ионозондом DPS-4. Технические характеристики ионозонда: импульсный доплеровский радиолокатор, мощность 300 Вт, длительность зондирующего импульса 533 мкс. Зондирование выполняется каждые 15 мин. Ионограммы с результатами их автоматической обработки размещены на сайте ИЗМИРАН [<http://www.dsp.izmiran.ru>].

При проведении настоящих исследований в процессе анализа экспериментальных данных каждая ионограмма подвергалась ручной обработке и интерпретации по методике URSI [Руководство, 1977]. Следует отметить, что определение ионосферных характеристик, в том числе критической частоты F2-слоя, часто было затруднительно. При анализе ионограмм отсутствие измерений или сомнительность в правильности определения критической частоты F2-слоя (при дальнейшей обработке и анализе были исключены) помечались в соответствии с принятыми обозначениями [Wakai et al., 1987].

В результате обработки ионограмм были сформированы неэквидистантные цифровые ряды значений критической частоты F2-слоя с дискретизацией 15 мин за два временных интервала (декабрь 2014 г.—февраль 2015 г., декабрь 2018 г.—февраль 2019 г.).

С целью получения информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов в настоящей работе использовался метод спектрального оценивания неэквидистантных рядов, предложенный Ломбом [Lomb, 1976] и впоследствии модернизированный Скарглом [Scargle, 1982]. В основе метода Ломба-Скаргла лежит аппроксимация методом наименьших квадратов ((МНК)-аппроксимация) сигнала гармоническими функциями, при этом спектральная оценка данных происходит по самим точкам отсчетов, а не по временным промежуткам, что позволяет сигналу иметь переменный шаг дискретизации. Подробно метод Ломба-Скаргла описан в работе [Рябова и Шалимов, 2021а].

С целью получения детальной информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов мы использовали спектральный анализ на основе построения авторегрессионной модели с решением уравнений Юла-Уокера [Сергиенко, 2011] методом Левинсона-Дурбина [Durbin, 1960; Levinson, 1946]. Этот метод подбирает авторегрессионную модель к

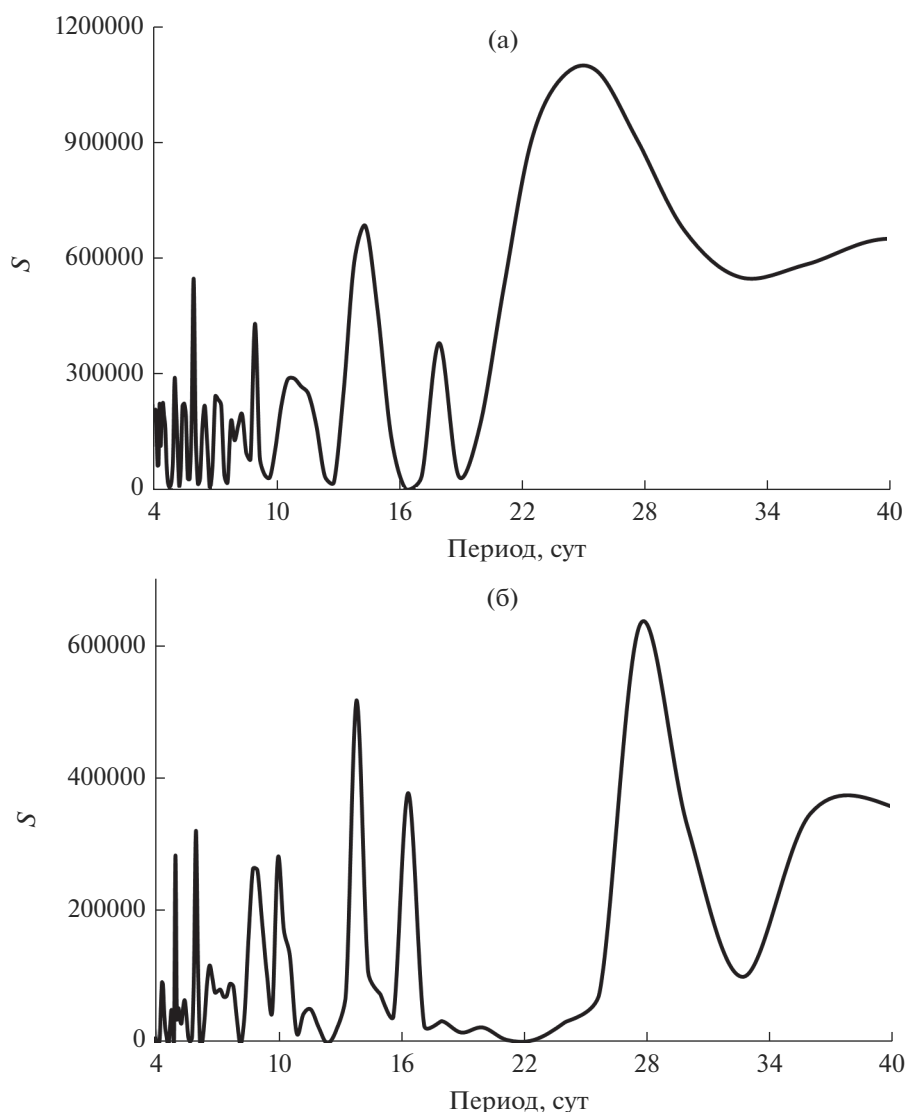


Рис. 1. Периодограммы вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля, зарегистрированных на обсерватории “Москва” с 01.12.2014 г. по 28.02.2015 г. (а) и с 01.12.2018 г. по 28.02.2019 г. (б), в диапазоне периодов от 4 до 40 сут.

входным данным путем минимизации ошибки предсказания методом наименьших квадратов, в итоге мы получаем систему уравнений Юла-Уокера. Подробно алгоритм параметрического оценивания описан в работах [Рябова и Спивак, 2018; Riabova and Shalimov, 2020; Рябова и Шалимов, 2021б].

Представление результатов спектрального анализа оформлено в виде периодограмм (зависимость спектральной плотности мощности S от периода).

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В ходе настоящих исследований были оценены спектры вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля и значений ча-

стоты F2-слоя за периоды с 01.12.2014 г. по 28.02.2015 г. и с 01.12.2018 г. по 28.02.2019 г.

Фрагменты спектров вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля H для зимних периодов 2018–2019 гг. (низкая солнечная активность) и 2014–2015 гг. (высокая солнечная активность) представлены на рис. 1. Как видно из данных, приведенных на рис. 1, спектр геомагнитных вариаций за зимний период 2018–2019 гг. характеризуется рядом спектральных гармоник в диапазоне периодов от 4 до 40 сут. Самая большая по амплитуде спектральная гармоника с периодом ~ 24 сут соответствует 27-суточной периодичности (период Каррингтона). В спектре удалось идентифицировать спектральные пики с периодами ~ 14.4 , 9 и 6 сут, соответствующими периодам первой, второй и третьей гармоник 27-суточ-

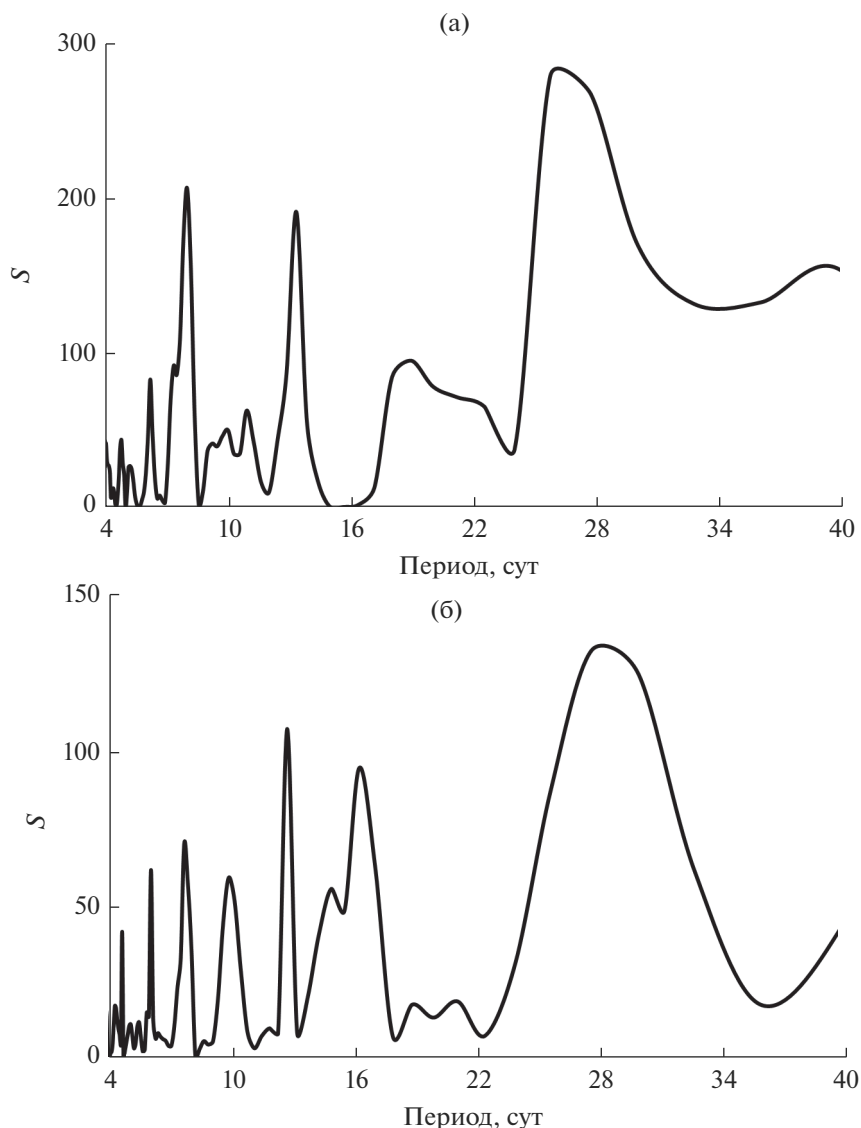


Рис. 2. Периодограммы вариаций f_0F_2 , определенных по ионограммам, полученным с ионозонда на обсерватории “Москва” с 01.12.2014 г. по 28.02.2015 г. (а) и с 01.12.2018 г. по 28.02.2019 г. (б), в диапазоне периодов от 4 до 40 сут.

ной периодичности, а также пики с периодами ~ 18 , 10 и 5 сут, близкие к периодам квази-16-дневной, квази-10-дневной и квази-5-дневной планетарным волнам соответственно.

Анализ результатов спектрального оценивания геомагнитных вариаций, зарегистрированных в период с декабря 2014 г. по февраль 2015 г., демонстрирует, что в спектре в период максимума 24-ого цикла солнечных пятен в целом проявляются те же гармоники, что и в спектре, рассчитанном за период с декабря 2018 г. по февраль 2019 г. По сравнению со спектром, вычисленным по данным за зимний период 2018–2019 гг., в спектре за зимний период 2014–2015 гг. значительнее проявление 27-суточной периодичности и ее двух гармоник. Интенсивность спектральных гармоник, соответствующих квази-16-дневной,

квази-10-дневной и квази-5-дневной планетарным волнам практически не зависит от уровня солнечной активности.

Фрагменты спектров вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы для зимних периодов 2018–2019 гг. (низкая солнечная активность) и 2014–2015 гг. (высокая солнечная активность) представлены на рис. 2. Спектральный анализ цифрового ряда значений критической частоты F2-слоя за зимний период 2018–2019 гг. выявил следующие спектральные пики: пик (~ 27.7 сут), соответствующий 27-суточной периодичности; пики (~ 13.3 , 7.8 и 6.2 сут), обусловленные гармониками 27-суточной периодичности; пики с периодами ~ 16.4 , 10.2 и 4.8 сут, соответствующие квази-16-дневной, квази-10-дневной и квази-5-дневной планетарным волнам.

Аналогичные результаты были получены при спектральном анализе временных вариаций f_oF_2 за период с декабря 2014 г. по февраль 2015 г. В отличие от спектра за зимний период 2018–2019 гг. в спектре за зимний период 2014–2015 гг. пики, соответствующие 27-суточной периодичности и ее гармоникам, проявляются ярче. Как и в случае спектров вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля, интенсивность спектральных пиков квази-16-дневной и квази-10-дневной планетарных волн не зависит от солнечной активности.

Отметим, что зависимость интенсивности 27-суточных вариаций плотности плазмы в верхней ионосфере от уровня солнечной активности (максимуму солнечной активности соответствуют более интенсивные вариации) отмечалась ранее в работах [Афраймович и др., 2008; Носке, 2008]. В настоящей работе аналогичная зависимость устанавливается и для магнитных вариаций.

В целом, результаты спектрального анализа, выполненного на основе метода Ломба-Скаргла, показали, что временные вариации параметров H и f_oF_2 демонстрируют наличие волновых процессов с периодом порядка 5–6 сут, а также более длительных – с периодом ~10–13 и 23–30 сут. В спектрах присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие планетарным волнам Россби.

Кроме рассмотренных процессов на формирование вариаций могут оказывать влияние и другие процессы, например, такие как, приливное воздействие (широко известны, в диапазоне 12.5–17 сут, деклинационная волна, приливная волна M_{sf}) [Адушкин и др., 2021; Riabova, 2018].

С целью получения детальной информации о частотном составе вариаций геомагнитного поля был проведен параметрический спектральный анализ данных мониторинга геомагнитного поля за двадцатилетний период наблюдений в диапазоне от 12.5 до 17 сут.

Вычисленный спектр горизонтальной компоненты геомагнитного поля за период с 2001 по 2020 г. в диапазоне квази-16-дневной периодичности приведен в диапазоне периодов от 12.5 до 14 сут (рис. 3а) и от 14 до 17 сут (рис. 3б). Как видно из рис. 3, спектр геомагнитных вариаций характеризуется очень широким рядом спектральных гармоник в диапазоне периодов от 12.5 до 17 сут. Проведем интерпретацию частотного состава геомагнитных вариаций. Самая большая по амплитуде спектральная гармоника (рис. 3а) с периодом 13.66 сут соответствует первой гармонике 27 суточной периодичности с периодом примерно две недели (полупериод Каррингтона). В спектре удается идентифицировать следующие большие по амплитуде гармоники: две гармоники с периодами 13.79 и 14.70 сут, соответствующими периодам

приливных волн; гармонику с периодом 16.26 сут, близкую к периоду квази-16-дневной планетарной волны (рис. 3б).

Учитывая, что одни колебания могут накладываться на другие, можно ожидать, что в спектре могут присутствовать спектральные гармоники, обусловленные модуляционным воздействием длиннопериодных циклов на короткопериодные вариации. Если привлечь формулу для амплитудно-модулируемого сигнала [Андреев, 1982; Рябова и Спивак, 2018], то получаем, что колебание с амплитудной модуляцией представляет собой сумму трех колебаний.

Исходя из этого, можно объяснить наличие в спектре, приведенном на рис. 3, спектральных гармоник, равноотстоящих от центральной гармоники с периодом ~13.66 сут (двухнедельной гармоники 27-суточной периодичности), с периодами ~12.67 и 14.72 сут – модуляцией двухнедельной гармоники полугодовой вариацией; с периодами ~13.14 и 14.17 сут – модуляцией двухнедельной гармоники годовой вариацией; с периодами ~13.61 и 13.68 сут – модуляцией двухнедельной гармоники 11-летним циклом. Кроме того, в спектре, представленном на рис. 3, хорошо выделяются спектральные гармоники, которые по периодам соответствуют модуляционному воздействию длиннопериодных циклов на приливные волны и 16-дневную планетарную волну. Гармоники, равноотстоящие от гармоники с периодом ~13.79 сут (деклинационная приливная волна), с периодами ~12.82 и 14.84 сут можно объяснить модуляцией приливной волны полугодовой вариацией; с периодами ~13.28 и 14.31 сут – модуляцией приливной волны годовой вариацией; с периодами ~13.72 и 13.84 сут – модуляцией приливной волны 11-летним циклом. Для M_{sf} приливной волны (14.7 сут) также удастся выделить значимые спектральные гармоники, которые соответствуют модуляционному влиянию на M_{sf} приливную волну полугодовой вариацией (13.63 и 15.92 сут), годовой вариацией (15.47 и 14.14 сут) и 11-летним циклом (14.79 и 14.55). В спектре удалось идентифицировать гармоники, соответствующие модуляции планетарной волны (рис. 3б): гармонику с периодами ~14.94 сут – модуляция полугодовой вариацией; гармоники с периодами ~15.56 и 16.98 сут – модуляцией годовой вариацией и гармоники с периодами ~16.15 и 16.32 сут – 11-летним циклом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученные в настоящей работе результаты, указывающие на существование вариаций ионосферных параметров в диапазоне планетарных волн (квази-5, 10 и 16-дневных) как в нижней, так и в верхней ионосфере, на первый взгляд пред-

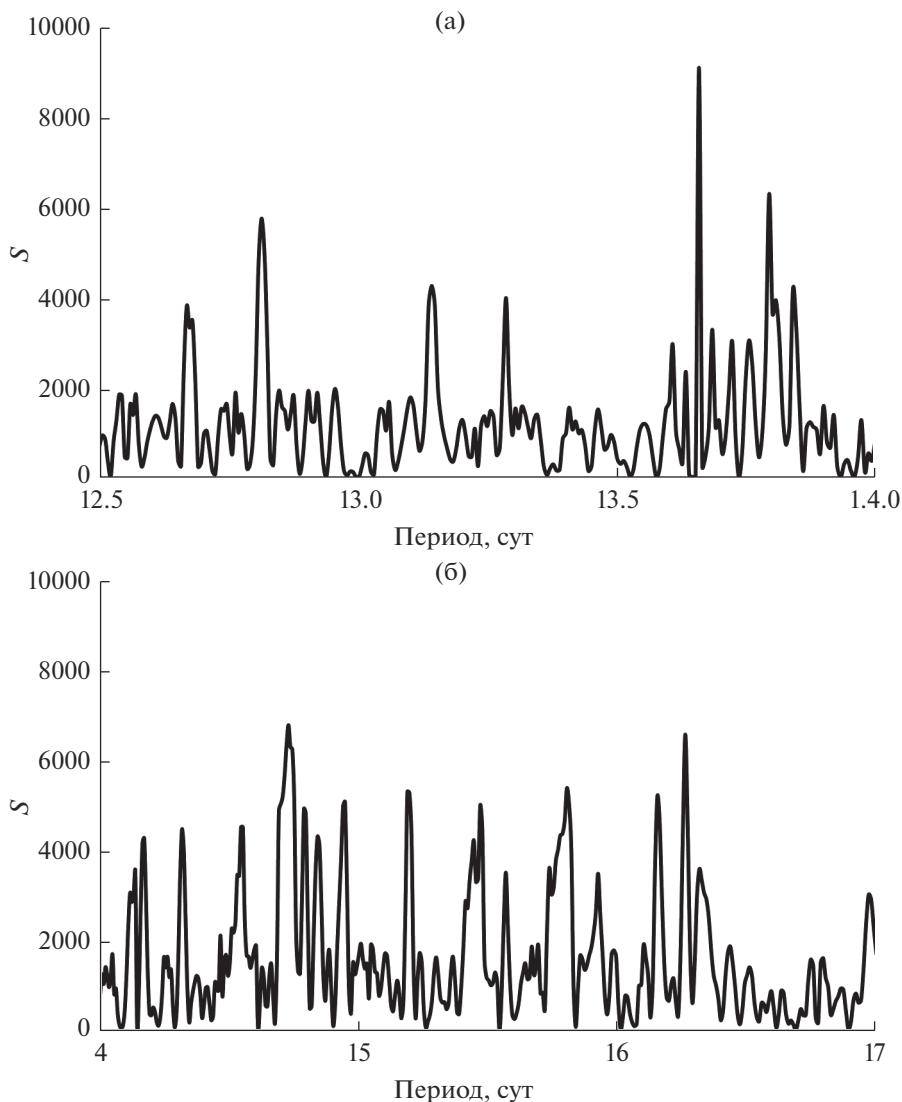


Рис. 3. Периодограммы вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля, зарегистрированных на обсерватории “Москва” с 2001 г. по 2020 г. в диапазоне периодов от 12.5 до 14 сут (а) и от 14 до 17 сут (б).

ставляются необъяснимыми, если учесть, что моделирование распространения планетарных волн в верхнюю атмосферу [Hagan et al., 1993] и эксперимент [Deng et al., 1997] указывают на невозможность проникновения этих возмущений существенно выше 100 км.

Вместе с тем, само появление планетарных волн, зарождающихся в нижней и средней атмосфере, на высотах мезосферы в зимний период можно объяснить, учитывая различное влияние восточных и западных ветров на распространение планетарной волны [Charney and Drazin, 1961]. В частности, стационарные планетарные волны могут переносить энергию вверх, но только при наличии западных зональных ветров в стратосфере, имеющих скорость меньше определенного порога (если это не так, то наличие волн даже большой

амплитуды в атмосфере ещё не гарантирует их появление на высотах ионосферы). Подобная ситуация имеет место в периоды равноденствия, но ослабляющее действие радиационных и фотохимических процессов сдвигает период наблюдения максимальных амплитуд волн в средней атмосфере на зимний период [Данилов и др., 1987]. Численное моделирование (см., например, [Salby, 1984; Koval et al., 2022]), также показывает, что амплитуда квази-16-дневных планетарных волн должна быть больше в период местной зимы. Летом же зональные ветры в стратосфере восточные, так что проникновение планетарных волн в этот период выше стратосферы затруднено.

Рассмотрим возможные физические процессы, которые могли бы объяснить появление вариаций ионосферных параметров в диапазоне пла-

нетарных волн. Заметим, что регистрируемый на земле магнитный сигнал может зависеть не только от скорости нейтрального ветра, но и от проводимости. Действительно, регистрируемые наземными станциями вариации H -компоненты магнитного поля δH пропорциональны (в пренебрежении продольным током [Rishbath and Garriott, 1969]) плотности ионосферного тока, поэтому можно написать, что:

$$\delta H \sim (\delta \sigma_c E_\lambda + \sigma_c \delta E_\lambda) h,$$

где σ_c — проводимость Каулинга, E_λ — зональная компонента электрического поля, h — эффективная толщина токового слоя. Поскольку $\sigma_c = \sigma_p (1 + \sigma_H^2 / \sigma_p^2)$, где $\sigma_{p,H}$ — соответственно педерсеновская и холловская проводимости, и обычно в нижней ионосфере $\sigma_H \gg \sigma_p$, а педерсеновская проводимость пропорциональна электронной плотности $\sigma_p \sim n$, где n — плотность плазмы, то получим $\delta \sigma_c \sim -\delta n / n^2$. В то же время, в зональное поле вносят вклад внешнее, поляризационное и индукционное поля (полное поле E_t равно $E_t = (E + U \times B)$, где U — скорость ветра) и можно принять, что $\delta E_\lambda \sim \delta U$. Таким образом, вариации H -компоненты магнитного поля могут быть обусловлены преобладающим изменением либо проводимости, либо скорости ветра.

Для спокойных условий вариации электростатического поля в нижней ионосфере (Е-области), обусловленные изменениями скорости ветра, могут отображаться в области F (с точностью до неоднородностей порядка нескольких км [Kelley, 1989]; это тем более верно для масштабов планетарных волн). В свою очередь, электрические поля в области F вызывают дрейф заряженных частиц. Если плазма дрейфует вверх, высота максимума слоя повышается, а поскольку по мере увеличения высоты уменьшается скорость рекомбинации ионов, то равновесная концентрация электронов будет увеличиваться. Обратная картина будет наблюдаться при дрейфе плазмы, направленном вниз. Таким образом, посредством электромагнитной связи в этом случае могут происходить практически синхронные вариации в нижней и верхней ионосфере.

Следует отметить, что, несмотря на установленную в настоящей работе слабую зависимость интенсивности вариаций магнитного поля и плотности плазмы в диапазоне периодов планетарных волн от уровня солнечной активности, полностью влияние солнечного воздействия нельзя исключать (например, посредством магнитных бурь или вариаций параметров солнечного ветра). В частности, корреляционный анализ одновременных наблюдений со спутников GPS и на магнитных наземных станциях [Шалимов и Лапшин, 2008]

показал присутствие практически синхронных вариаций в указанном диапазоне периодов компонент геомагнитного поля и полного электронного содержания в ионосфере как в спокойный, так и возмущенный периоды. Соответственно, исследования по влиянию солнечного воздействия на возмущения ионосферы в диапазоне планетарных волн, по-видимому, необходимо продолжить.

Другой механизм, который способен объяснить появление вариаций плотности плазмы с периодами планетарных волн в ионосфере, затрагивает модуляцию планетарными волнами приливов, способных распространяться на ионосферных высотах. Подобный механизм был предложен для объяснения модуляции приливов 10-дневной планетарной волной [Lawrence and Jarvis, 2001].

Перечисленные механизмы, скорее всего, не исчерпывают все возможности передачи энергии планетарных волн в ионосферу. В частности, такие экспериментальные результаты, как появление в летней ионосфере квази-2-дневных и квази-5-дневных вариаций ионосферных параметров, а также различие зональных волновых чисел волн одного периода, регистрируемых в мезосфере и в ионосферном слое E (см., например, обзор [Шалимов, 2018]) рассмотренные механизмы не описывают.

Подводя итог, отметим: результаты проведенных в настоящей работе исследований показывают, что в спектрах временных вариаций геомагнитного поля (наблюдаемых на земной поверхности и обусловленных вариациями ионосферных токов) и критической частоты F2-слоя в диапазоне планетарных волн в зимний период времени присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие квази-5, 10 и 16-дневным планетарным волнам. Кроме того, в спектре вариаций горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля, зарегистрированных с 2001 по 2020 г., в диапазоне периодов от 12.5 до 17 сут выделены гармоники, связанные с модуляционным воздействием более длиннопериодных вариаций и приливным воздействием. Это свидетельствует о важности переноса энергии атмосферными волнами на ионосферные высоты и влиянии их на динамические и электродинамические процессы в ионосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
- Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1982. 280 с.
- Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В., Ойнац А.В., Ясюкевич Ю.В. Глобальное электронное

- содержание в 23-м цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 2. С. 195–208.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.
- Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 192 с.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
- Рябова С.А., Спивак А.А. Исследование атмосферного прилива по данным регистрации барических вариаций на среднеширотной обсерватории “Михнево” // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2018. № 4. 1840406.
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О вариациях параметров плазмы ионосферы, наблюдаемых посредством ионозонда и на магнитной станции в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021а. № 6. С. 122–130.
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021б. № 16. С. 51–60.
- Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ Петербург. 2011. 756 с.
- Шалимов С.Л., Лапшин В.М. Планетарные волны по одновременным наблюдениям со спутников GPS и на магнитных наземных станциях // Космич. исслед. 2008. Т. 46. № 3. С. 195–200.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы. М.: ИФЗ РАН, 2018. 390 с.
- Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophysical Research. 1961. V. 66. № 1. P. 83–109.
- Deng W., Salah J.E., Clar R.R. et al. Coordinated global radar observations of tidal and planetary waves in the mesosphere and lower thermosphere during January 20–30, 1993 // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. № A4. P. 7307–7318.
- Durbin J. The fitting of time series models // Rev. Intern. Stat. Inst. 1960. V. 28. P. 233–244.
- Forbes J.M., Leveroni S. Quasi 16-day oscillation of the ionosphere // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. P. 981–984.
- Fraser G. The 5-day wave and ionospheric absorption // J. Atmospheric and Terrestrial Physics. 1977. V. 39. P. 121–124.
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2012. V. 117. № A9. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Hagan M.E., Forbes J.M., Vial F. Numerical investigation of the propagation of the quasi-two-day wave into the lower thermosphere // J. Geophysical Research. 1993. V. 98. P. 23193–23205.
- Hocke K. Oscillations of global mean TEC // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A04302. <https://doi.org/10.1029/2007JA012798>
- Kelley M.C. The Earth's ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, Academic Press. 1989. 487 p.
- Kohsiek A., Glassmeier K.H., Hirooka T. Periods of planetary waves in geomagnetic variations // Annales Geophysicae. 1995. V. 13. P. 168–176.
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Didenko K.A., Ermakova T.S., Savenkova E.N. Sensitivity of the 4–10-Day Planetary Wave Structures in the Middle Atmosphere to the Solar Activity Effects in the Thermosphere. Atmosphere 2022. V. 13. P. 1325. <https://doi.org/10.3390/atmos13081325>
- Lawrence A.R., Jarvis M.J. Initial comparisons of planetary waves in the stratosphere, mesosphere and ionosphere over Antarctica // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. P. 203–206.
- Levinson N. The Wiener RMS (root mean square) error criterion infilter design and prediction // J. Math. Phys. 1946. V. 25. P. 261–278.
- Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophysical and Space Science. 1976. V. 39. P. 447–462.
- 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>.
- Riabova S.A. 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. Conference Paper. 2018. <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=94171>.
- Riabova S.A., Shalimov S.L. Features of geomagnetic variations in the period range from 12 to 17 days according to the Mikhnevo Observatory // Proceedings SPIE. Vol. 11560. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115607J (12 November 2020). <https://doi.org/10.1117/12.2575699>
- Rishbeth H., Garriott O.K. Introduction to ionospheric physics. 1st edn. N.Y.: Academic press, 1969. 304 p.
- Salby M.L. Survey of planetary-scale traveling waves: the state of theory and observations // Reviews of Geophysics and Space Physics. 1984. V. 22. P. 209–236.
- Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data // Astrophysical Journal. 1982. V. 263(2). P. 835–853.
- Wakai N., Ohyama H., Koizumi T. Manual of ionogram scaling. 3rd edn. Japan: Radio Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, 1987. 119 p. <http://www.dsp.izmiran.ru>

Atmospheric Planetary Waves at Ionospheric Heights Measured at the Moscow Observatory (IZMIRAN)

S. A. Riabova^{1, 2, *} and S. L. Shalimov¹

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya, 10, build. 1, Moscow, 123242 Russia*

²*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences,
Leninsky prospect, 38, build. 1, Moscow, 119334 Russia*

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

The variations of the ionospheric current in the lower ionosphere and the plasma density of the upper ionosphere have been studied based on the monitoring of the horizontal component of the geomagnetic field induction and high-frequency sounding of the critical frequency of the ionosphere F-layer at the Moscow Observatory. It is shown that in the spectra of time variations of the geomagnetic field and the critical frequency of the F2 layer in the range of planetary waves in winter, there are both harmonics associated with solar activity and harmonics corresponding to quasi-5, 10, and 16-day planetary waves. Involvement of geomagnetic field registration data for a twenty-year time interval (from 2001 to 2020) made it possible to identify more subtle effects, namely, the harmonics associated with the modulation effect of longer-period variations and tidal effects were identified.

Keywords: planetary waves, ionospheric plasma density variations, Earth's magnetic field variations, modulation, lunisolar tide