

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.02.118>УДК 537.876.23, 550.388.2 А. И. РЕЗНИЧЕНКО^{1,2}, А. В. КОЛОСКОВ^{2,3},
А. А. СОПИН², Ю. М. ЯМПОЛЬСКИЙ²

PACS number: 94.20.Vv

¹ Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина² Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мыстэцтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина³ Государственное учреждение “Национальный антарктический
научный центр МОН Украины”,
б-р Тараса Шевченко, 16, г. Киев, 01601, Украина

СТАТИСТИКА СЕЗОННЫХ И СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВЧ СИГНАЛОВ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЕ

Предмет и цель работы: Экспериментальное исследование проявлений перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в суточно-сезонных вариациях параметров пробных ВЧ сигналов на наклонной однокачковой радиотрассе РВМ–НЧО, восстановленных по данным полного года мониторинговых наблюдений.

Методы и методология: Длительная цифровая регистрация волновых форм ВЧ радиосигналов станции Службы точного времени и частоты (РВМ, Москва, Россия) осуществлялась в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины (НЧО, с. Мартово, Харьковская обл.). По энергетическим спектрам принятых сигналов оценивалось доплеровское смещение частоты (ДСЧ). Квазипериодические вариации ДСЧ интерпретировались как результат прохождения ПИВ, ассоциируемых с акустико-гравитационными волнами (АГВ), на высотах F-слоя ионосферы. Значение периода вариаций ДСЧ определялось как сумма интервалов времени между соседними нулями двух следующих друг за другом полупериодов, а под амплитудой понимался размах вариаций. Дополнительно учитывались случаи экранирования области F нижележащими ионосферными слоями E_s и E.

Результаты: Для статистического анализа использовались данные о периодах и амплитудах вариаций ДСЧ. Определена вероятность наблюдения вариаций ДСЧ для каждого месяца, которая лежит в диапазоне $81 \div 91\%$ зимой и весной с уменьшением летом и осенью до $52 \div 80\%$. Показано, что рост концентрации электронов в нижних слоях ионосферы E_s и E затрудняет обнаружение ПИВ в F-области. Это приводит к существенному занижению вероятности наблюдения в летний и частично в весенне-осенний сезоны. Определены сезонно-суточные зависимости вероятности наблюдения, периодов и амплитуд вариаций ДСЧ. Формы суточных распределений как амплитуд, так и периодов для всех сезонов в целом сходны. Имеют место максимумы утром и вечером и минимум в послеполуденное время. Что касается сезонных распределений периодов и амплитуд, летом наблюдается более высокое медианное значение периода и более равномерное распределение амплитуды. Дополнительно проведена оценка влияния уровня геомагнитной возмущенности на характеристики вариаций ДСЧ. Выявлено, что с увеличением геомагнитной активности (K -индекс ≥ 2) происходит уменьшение вероятности наблюдения и рост амплитуд и периодов вариаций ДСЧ.

Заключение: Разработанные методики анализа данных доплеровского зондирования ионосферы ВЧ сигналами неспециального типа могут использоваться для диагностики и анализа ионосферных возмущений.

Ключевые слова: перемещающиеся ионосферные возмущения, квазипериодические вариации, доплеровское смещение частоты, радиолиния, период, амплитуда, вероятность наблюдения

1. Введение

В околоземном космическом пространстве существует множество типов волновых процессов различной природы и масштабов (электромагнитные, магнитогидродинамические, плазменные, акустико-гравитационные и другие) [1]. Квазипериодические вариации электронной концентрации в ионосфере с длинами волн от десятков до нескольких тысяч километров и периодами десятки минут – часы принято классифицировать как пе-

ремещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Известно, что большинство ПИВ являются ионосферным проявлением акустико-гравитационных волн (АГВ), возникающих в нейтральной компоненте атмосферного газа [2]. Существует большое количество источников, которые могут возбуждать АГВ/ПИВ. К ним относятся мощные погодные фронты, возмущения электрических полей, зональные ветровые системы [3–5], высыпания энергичных заряженных частиц из магнито-

сферы, солнечный терминатор [6, 7], землетрясения, извержения вулканов [8, 9], мощные взрывы [10], пуски ракет [11, 12] и другие природные и техногенные факторы [13, 14].

Исследование возбуждения и распространения ПИВ важно для лучшего понимания динамики атмосферы и переноса энергии возмущений на высоты геокосмоса [15, 16]. Поскольку ПИВ относятся к числу типичных ионосферных неоднородностей, их влияние необходимо учитывать при разработке и эксплуатации различных наземно-космических радиосистем. Традиционно ПИВ делятся на две категории: крупномасштабные с горизонтальными длинами волн более 1000 км и периодами 60 ÷ 180 мин и среднемасштабные с горизонтальными длинами волн в несколько сотен километров и периодами 15 ÷ 60 мин [17]. Первые связывают с возмущениями, возникающими, по большей части, в высоких широтах во время геомагнитных бурь [18]. Вторые могут генерироваться большим числом естественных и антропогенных источников, перечисленных, например, в [6–14]. Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям проявлений эффектов ПИВ в суточно-сезонных вариациях параметров пробных ВЧ сигналов на однокачковой среднеширотной радиотрассе с использованием годового массива данных наблюдений.

2. Методы получения и обработки данных

2.1. Методика проведения наблюдений

Среднемасштабные ПИВ экспериментально исследуются уже много лет с помощью различных методов и средств дистанционной диагностики, главным образом с использованием доплеровских ВЧ радаров непрерывного излучения [19, 20], ионозондов [21–23], радаров некогерентного рассеяния [24–27], наземных станций глобальных навигационных спутниковых систем [28–30], камер кругового обзора неба [31, 32] и др. В Украине существует несколько ионосферных установок, пригодных для изучения ПИВ. Одной из наиболее эффективных является радар некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы НАН и МОН Украины [33]. К сожалению, из-за больших эксплуатационных затрат радар НР работает эпизодически, а для понимания климатологии ПИВ необходимы данные регуляр-

ного мониторинга ионосферных возмущений. Постоянный патруль ПИВ может быть организован при помощи более простых и дешевых систем диагностики. К их числу относятся появившиеся в последние годы и работающие в мониторинговом режиме активные системы – прототип когерентного ионозонда и трехпозиционная активная система ВЧ доплеровского зондирования [34, 35]. Перспективными для систематической диагностики ионосферных возмущений являются пассивные, и потому менее затратные, системы, основанные на многопозиционных измерениях полного электронного содержания приемниками ГНСС [36, 37], сеть которых в Украине постоянно растет. Эффективным способом диагностики ПИВ является также разработанный в Радиоастрономическом институте метод частотно-углового зондирования ионосферы (ЧУЗИ) [38, 39], основанный на анализе доплеровского смещения частоты (ДСЧ) и углов прихода ВЧ сигналов вещательных радиостанций и исследовательских передатчиков. Для его практической реализации было сконструировано несколько прототипов измерительных установок [40, 41] и проведен ряд успешных измерительных кампаний по диагностике ПИВ в Украине [40], Антарктике [42] и в США [43]. Отметим, что данный метод был адаптирован для использования современными цифровыми ионозондами [44, 45]. Однако эти эксперименты были непродолжительными и не позволили изучить сезонные закономерности поведения ПИВ. Несмотря на отсутствие в РИ НАН Украины постоянно действующих установок ЧУЗИ, некоторые сезонные особенности поведения ионосферных возмущений могут быть оценены путем анализа мониторинговых наблюдений вариаций ДСЧ пробных ВЧ сигналов. Для таких исследований в РИ НАН Украины были разработаны автоматические приемные ВЧ комплексы [46]. Их преимуществами являются малая стоимость, незначительное энергопотребление и интернет-интеграция в единую сеть, что позволяет осуществлять дистанционное управление и онлайн доступ к текущим данным. В настоящее время унифицированные когерентные ВЧ установки непрерывно функционируют в Украине, Антарктике и Арктике, в г. Тромсё (Норвегия) и на о. Свалбард (арх. Шпицберген, Норвегия). Наглядная информация о поведении суточных спектрограмм и

амплитуд ВЧ сигналов на контрольных радиотрассах отображается на веб-странице¹ отдела радиофизики геокосмоса РИ НАН Украины.

Исследования проявлений ионосферных возмущений были проведены по данным долгосрочного мониторинга ВЧ сигналов радиостанции Службы точного времени и частоты (РВМ, Московская область, Россия, координаты: 55°44' с. ш., 38°12' в. д.). Цифровая регистрация волновых форм сигналов в полосе частот ± 500 Гц от несущей частоты осуществлялась в Низкочастотной обсерватории РИ НАН Украины (НЧО, с. Мартовое, Украина, координаты: 49°56' с. ш., 36°57' в. д.). Радиолиния РВМ–НЧО является практически меридиональной, а ее длина составляет около 650 км. Станция РВМ работает круглосуточно. Каждые полчаса излучается следующая циклограмма эталонных сигналов: непрерывный сигнал без модуляции (с 1 по 8 минуту), импульсный сигнал с частотой повторения 1 Гц (с 11 по 20 минуту), импульсный сигнал с частотой повторения 10 Гц (с 21 по 30 минуту). Более полную информацию о режимах работы РВМ можно найти в [47]. Радиостанция излучает сигналы одновременно на трех частотах: 4.996, 9.996 и 14.996 МГц. В настоящей работе проанализированы характеристики излучения на частоте 9.996 МГц, поскольку на этой частоте для исследуемой радиотрассы большую часть времени наблюдений выполнялись условия однократного “зеркального” отражения пробного сигнала от F-слоя ионосферы.

Для анализа были использованы данные, полученные в течение полного года наблюдений, с декабря 2012 г. по ноябрь 2013 г. В качестве основного информационного параметра использовалось ДСЧ радиосигнала относительно несущей, а дополнительной характеристикой являлась спектральная мощность. Для оценок ДСЧ и интенсивности сигнала анализировались спектры принятого излучения. Отметим, что использование в приемной и передающей аппаратуре высокостабильных опорных генераторов позволяло оценивать ДСЧ с точностью до сотых долей герца. Наблюдения осуществлялись в постоянном режиме, за исключением штатных интерва-

лов времени проведения профилактических работ на самой станции, перерывов для технического обслуживания приемного ВЧ комплекса и аварийных остановок регистрирующей аппаратуры (в основном из-за отключений электроэнергии). Общая длительность пропусков не превышает 15 % от полного годового интервала наблюдений.

2.2. Алгоритм оценивания ДСЧ

Оценка ДСЧ проводилась по разработанному авторами алгоритму анализа доплеровских спектров пробных сигналов, реализованному в специальном программном пакете. Суточные записи разбивались на фрагменты длительностью 60 с, для которых вычислялись спектры мощности пробного сигнала с разрешением по частоте ≈ 0.017 Гц. Единичные временные реализации смещались с шагом по времени 30 с, что соответствовало 2880 спектрам за сутки. На первом этапе принималось решение о наличии “зеркального” отражения от ионосферы. Сигнал считался отраженным, а не рассеянным на неоднородностях, если соотношение сигнал/шум превышало пороговое значение, экспериментально определенное для каждого режима работы РВМ. При анализе спектров и определении вариаций ДСЧ, вызванных неоднородностями ионосферы, было необходимо учесть возможность многолучевого распространения, приводящего к появлению нескольких спектральных мод. Поэтому анализировались три наибольших спектральных максимума, попавших в диапазон анализа (в порядке убывания им соответствуют интенсивности I_1 , I_2 , I_3 и частоты f_1 , f_2 , f_3). Далее определялась и отслеживалась наиболее энергонесущая мода сигнала. Для этого анализировались не только интенсивности спектральных максимумов, рассчитанных для нескольких последовательных моментов времени, но и соответствующие изменения ДСЧ. Основным из трех максимумов считался тот, который соответствовал минимальной вариации ДСЧ относительно частоты, оцененной для предыдущего спектра. Поэтому на некоторых участках записи выбирались не абсолютные, а локальные экстремумы. Кроме того, при выборе диапазона анализа учитывался текущий режим излучения РВМ. При излучении непрерывных сигналов и импульсных сигналов с частотой повторения импульсов 10 Гц границы составляли от -2 до $+2$ Гц относительно несущей,

¹URL: <http://geospace.com.ua/data.html> (дата обращения: 28.10.2019)

что, с одной стороны, превосходило диапазон наблюдаемых изменений ДСЧ, а с другой – исключало возможность определения модуляционных составляющих в качестве основной моды для импульсного режима. При режиме работы РВМ с частотой повторения 1 Гц для предотвращения спутывания основной моды и модуляционных составляющих диапазон анализа был вынуждено уменьшен до 1 Гц, что наложило соответствующее ограничение на предельный диапазон оцениваемых вариаций ДСЧ. Для более корректного подбора границ диапазона анализа в качестве центральной частоты бралось среднее значение частотного смещения для предыдущего непрерывного и последующего импульсного режима с частотой повторения 10 Гц.

При оценивании ДСЧ следует принимать во внимание, что в дневное время пробный сигнал может приходиться в пункт приема, отражаясь как от F-области, так и от лежащих ниже слоев E_s либо E, которые экранируют слой F. Анализ данных вертикального зондирования ионосферы, выполненного ионозондом ИЗМИРАН [48], расположенным вблизи РВМ показал, что слои E_s либо E с частотой “бланкирования”, обеспечивающей отражение от них сигнала РВМ, обычно регистрируются вблизи полудня в летний, а также частично в весенний и осенний сезоны. Сопоставление регистраций сигналов РВМ с данными вертикального зондирования ионосферы показало, что случаи отражения от нижележащих слоев сопровождались значительным уменьшением амплитуды спектральных компонент (на $10 \div 20$ дБ), по-видимому, обусловленным увеличением пути сигнала в нижней ионосфере и, как следствие, ростом поглощения. Снижение интенсивности сигналов РВМ более чем на 10 дБ было использовано в качестве формального критерия для селекции случаев экранирования области F. Анализ годового массива экспериментальных данных для радиолинии РВМ–НЧО показал, что отражение от нижележащих областей сопровождалось также существенным уменьшением размаха вариаций ДСЧ, что может быть обусловлено уменьшением угла прихода в вертикальной плоскости и отсутствием движения слоя E_s по вертикали. Таким образом, вариации ДСЧ, вызванные ионосферными возмущениями, лучше всего проявлялись при отражении от F-области ионосферы. Следует отметить, что вся описан-

ная выше процедура проводилась автоматически, без участия оператора, что исключало субъективизм при выполнении обработки.

2.3. Методика оценки параметров ионосферных возмущений

Алгоритм автоматической обработки данных и последующего анализа параметров волновых ионосферных возмущений состоял в выделении участков записей, содержащих вариации, и определении периодов и амплитуд этих вариаций. Сначала каждая суточная запись вариаций ДСЧ сглаживалась скользящим окном длительностью 5 мин для удаления высокочастотных составляющих. Ограничение периодов снизу значением 5 мин связано с частотой Брента–Вайсяля, которая определяет минимально возможный период акустико-гравитационных волн. Для среднеширотной ионосферы его значения составляют $5 \div 15$ мин [18, 49]. Затем из ряда удалялся тренд, связанный с суточным ходом ДСЧ. В качестве функции тренда использовался ряд ДСЧ, сглаженный скользящим средним с окном длительностью в 2 ч. Для полученного центрированного ряда определялись периоды вариаций ДСЧ. Период оценивался как сумма интервалов времени между соседними нулями двух следующих друг за другом полупериодов [50]. Амплитуда вариаций определялась как размах между соседними максимальным и минимальным значениями. Считалось, что вариации квазипериодические и порождены волновыми возмущениями в ионосфере, если они содержали два или более периодов, амплитуды которых превосходили пороговое значение 0.05 Гц, а значения периодов соседних вариаций отличались менее чем на 20 %. После выполнения данной процедуры обработки каждый 30-секундный фрагмент суточной записи, в котором был зафиксирован отраженный от ионосферы сигнал, содержал информацию о периоде и амплитуде вариаций ДСЧ или об отсутствии вариаций, а также о наличии или отсутствии экранирования области F.

Отметим, что рассмотренный алгоритм работает корректно только в тех случаях, когда надежно выделяется одна гармоника возмущений, а другие составляющие имеют существенно меньшую амплитуду. При интерференции нескольких волновых процессов соизмеримой интенсивности амплитуды и периоды вариаций ДСЧ определяются с ошибкой. В этом случае корректно

оценивается только вероятность наблюдения возмущений.

Для апробации результатов обработки вариаций ДСЧ значения периодов, рассчитанные с помощью описанной выше методики, выборочно сопоставлялись с их оценками методом традиционного спектрального анализа. Результаты сравнения подтвердили согласованность оценок периодов преобладающей гармонике вариаций ДСЧ, полученных обоими методами. Было установлено также, что сглаживание ДСЧ скользящим окном длительностью 5 мин и удаление тренда не приводит к ошибкам в определении периодов вариаций ДСЧ.

3. Результаты обработки и их обсуждение

В рамках работы был проведен статистический анализ периодов T и амплитуд A вариаций ДСЧ, позволивший определить вероятность наблюдения квазипериодических процессов на контрольной радиолинии, наиболее вероятные и средние значения вариаций частотных смещений, а также оценить их суточно-сезонные распределения. При исследовании сезонных изменений статистические оценки были сделаны для каждого месяца и сезона года. Сезоны

центрировались относительно дат весеннего (20.03.2013 г.), осеннего (22.09.2013 г.) равноденствий и летнего (21.06.2013 г.), зимнего (21.12.2012 г.) солнцестояний. Границами сезонов были приняты 6 ноября – 5 февраля (зима), 6 февраля – 5 мая (весна), 6 мая – 5 августа (лето), 6 августа – 5 ноября (осень).

3.1. Вероятность наблюдения ионосферных возмущений

На рис. 1 приведены зависимости вероятности наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ от месяца года, полученные без учета эффектов экранирования F-области слоями E и E_s (P , светло-серые столбики) и с его учетом (P_3 , темно-серые столбики). Статистические оценки вероятности наблюдений (в процентах) рассчитаны следующим образом:

$$P = \frac{\sum t_{\text{пнв}}}{\sum t_c} \cdot 100, \quad (1)$$

$$P_3 = \frac{\sum t_{\text{пнвз}}}{\sum t_c - \sum t_3} \cdot 100, \quad (2)$$

где $\sum t_{\text{пнв}}$ – суммарное время наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ в течение ана-

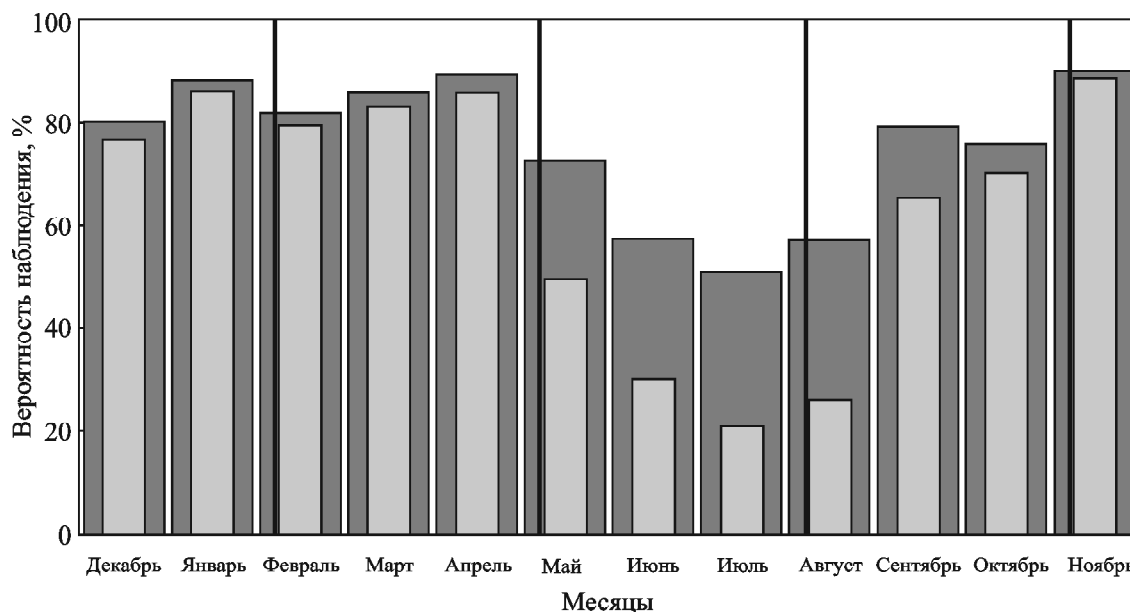


Рис. 1. Вероятность наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ в сигнале, принятом в НЧО для каждого месяца в течение года без учета эффекта экранирования F-области ионосферы (светло-серые столбики) и с учетом (темно-серые столбики). Вертикальными линиями показаны границы сезонов

лизируемого месяца; $\sum t_{\text{пивэ}}$ – суммарное время наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ в течение анализируемого месяца в отсутствие экранирования слоя F; $\sum t_{\text{с}}$ – суммарное время в течение месяца, когда в приемном пункте регистрировался зеркально отраженный сигнал (соотношение сигнал/шум превышало пороговый уровень); $\sum t_{\text{э}}$ – суммарное время в течение месяца, когда область F экранировалась слоями E, E_s.

Из рис. 1 видно, что экранирование F-области существенно сказывается на вероятности наблюдения ионосферных возмущений. В частности, если не учитывать этот эффект (светло-серые столбики), то для месяцев зимнего и весеннего сезонов вероятность наблюдения вариаций ДСЧ составляет 77 ÷ 89 %. В летний сезон она резко падает (21 ÷ 50 %) и далее возрастает осенью с 27 % до 71 %. Однако столь значительное снижение объясняется не только уменьшением вероятности существования ионосферных неоднородностей, но и появлением экранирующих слоев. Если учесть эффекты экранирования (темно-серые столбики) и исключить их, то вероятность наблюдения возрастает летом и осенью до 52 ÷ 80 % а зимой и весной составляет 81 ÷ 91 %.

Суточные зависимости вероятности наблюдения ионосферных неоднородностей для различных сезонов года показаны на рис. 2, а–г. Вероятность наблюдения для каждого часа сезона рассчитывалась с помощью формул, аналогичных (1) и (2).

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 2, видно, что вероятность наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ остается высокой в течение всего времени “зеркального” отражения пробного сигнала от ионосферного слоя между “радиовосходом” и “радиозаходом” (времена перехода частоты излучения через уровень максимально применимой частоты слоя F2 для данной радиолнии [51]).

Рис. 2 демонстрирует смещение интервала наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ в вечернее время. Во все сезоны вариации ДСЧ начинают регистрироваться спустя несколько часов после прохождения утреннего терминатора на уровне поверхности Земли. На заходе Солнца эффекты ПИВ наблюдаются и после прохождения вечернего терминатора на уровне по-

верхности Земли. При этом летом (рис. 2, в) вариации ДСЧ могут фиксироваться даже после достижения вечерним терминатором высоты 250 км. Отметим, что выявленное смещение времени наблюдения вариаций ДСЧ связано с продолжительностью “радиодня” на трассе [51]. В целом полученные результаты для вероятности наблюдения возмущений согласуются с результатами других исследователей [30]. Зимой вероятность проявления эффектов ионосферных возмущений стабильно высокая, весной она имеет похожий вид с некоторым увеличением после полудня, летом и осенью прослеживаются два максимума в полуденное и вечернее время с минимумом между ними.

Анализ экспериментальных данных показал, что обнаружение квазипериодических вариаций ДСЧ значительно затруднено в летний сезон, а также частично в весенний и осенний сезоны в связи с ростом электронной концентрации в нижних слоях E, E_s ионосферы, вследствие которого пробный сигнал отражается от этих слоев, экранирующих F-область. Чаще всего эффект экранирования наблюдается вблизи локального полудня. В вечерние часы вероятность наблюдения вариаций ДСЧ снова возрастает, что связано с постепенным исчезновением слоев E и E_s. Зимой на среднеширотной радиолнии эффект экранирования F-области нижними слоями ионосферы практически отсутствует.

3.2. Распределение периодов и амплитуд вариаций ДСЧ

Построенные для каждого сезона распределения периодов ДСЧ, которые показаны на рис. 3, а–г, демонстрируют преобладание квазиволновых вариаций ДСЧ, имеющих длительность T на уровне 0.5 максимальной вероятности: 10 ÷ 35 мин весной и осенью, 10 ÷ 55 мин летом и от 5 до 40 мин зимой.

Наблюдаются отличия в распределениях периодов для разных сезонов года. Так, зимой фиксируется их минимальное медианное значение $T_m = 24$ мин. Летом чаще регистрируются периоды длительностью выше 90 мин и медианное значение периодов составляет 40 мин. Для весны и осени медианные оценки периодов примерно одинаковы и составляют 28 и 29 мин соответственно. Восстановленные нами сезонные зависимости не противоречат результатам работы [30], в кото-

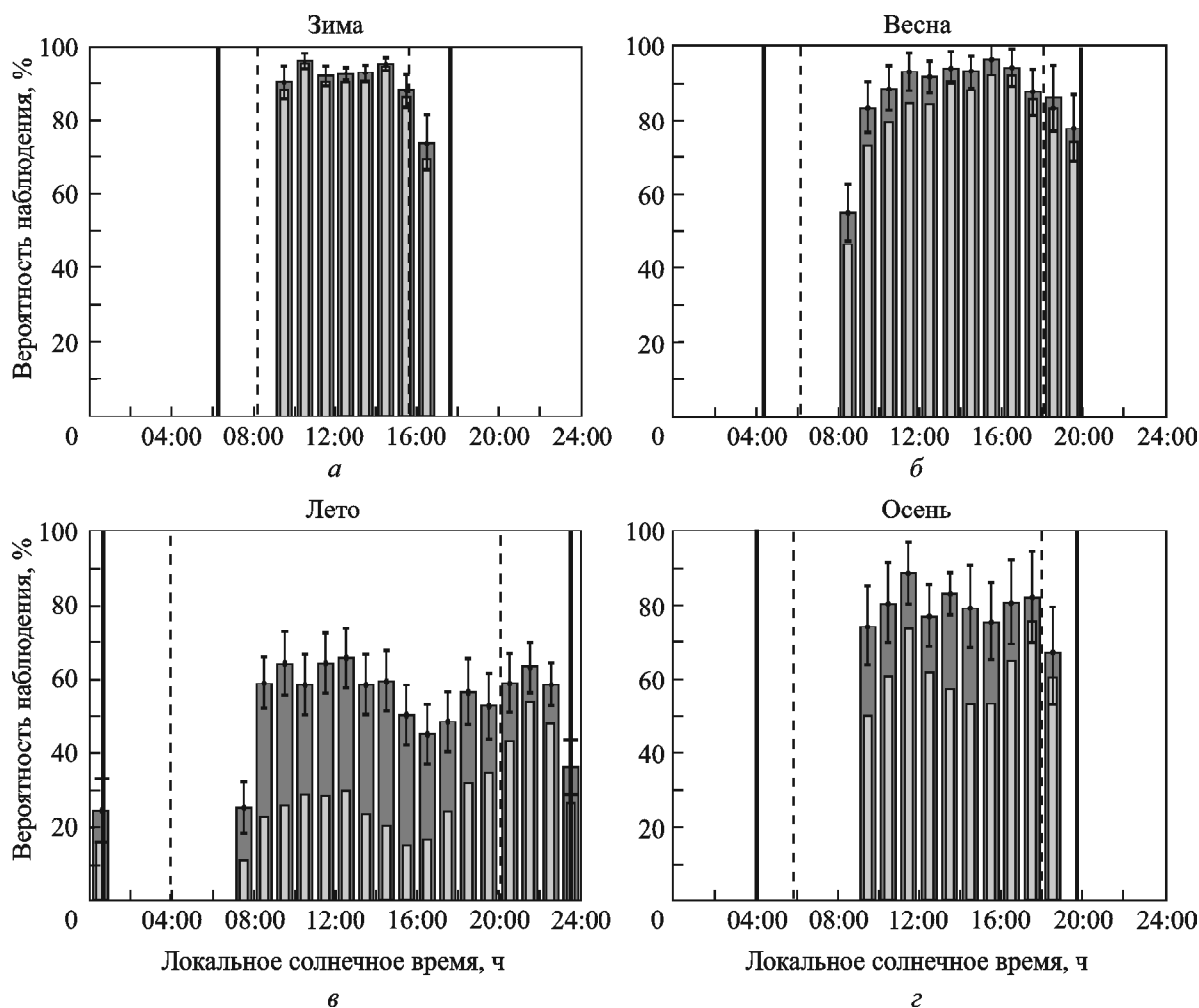


Рис. 2. Вероятность наблюдения вариаций ДСЧ в сигнале, принятом в НЧО, в зависимости от локального времени (здесь и далее используется локальное солнечного время для средней точки трассы) зимой (а), весной (б), летом (в) и осенью (з): светло-серые столбики – без учета экранирования F-области, темно-серые столбики – с учетом экранирования. Пунктирные вертикальные линии – моменты прохождения терминатора через среднюю точку радиотрассы на уровне поверхности Земли, сплошные линии – на высоте F-области (≈ 250 км); вертикальные отрезки – погрешность оценки для доверительного интервала с вероятностью 90 %

рой отмечается увеличение вероятности появления ПИВ с меньшими периодами зимой.

Причина уменьшения периодов зимой и увеличения летом однозначно не выяснена. Возможным объяснением могут быть сезонные изменения ветровых структур [52]. Кроме того, отметим, что геомагнитная обстановка зимой была более спокойной, чем в другие сезоны. Оценки степени геомагнитной возмущенности показали, что среднее за сезон значение индекса геомагнитной активности K для зимы составило 0.97, в то время как для весны, лета и осени – 1.5, 2.1 и 1.5 соответственно. Как будет показано далее, при увеличении K -индекса наблюдаются

большие периоды ионосферных неоднородностей. Для проверки правильности этого предположения необходимо провести дополнительный анализ данных систематического мониторинга квазипериодических ионосферных вариаций в течение других фаз 11-летнего цикла солнечной активности.

На рис. 3, δ -з показаны распределения значений амплитуд вариаций ДСЧ, построенные для каждого сезона. Гистограммы демонстрируют диапазон характерных амплитуд A на уровне 0.5 максимальной вероятности: $0.07 \div 0.5$ Гц зимой и летом, от 0.1 до 0.4 Гц весной и до 0.37 Гц осенью. Соответствующие медианные значения A_m для каждого сезона приведены в поле рис. 3, δ -з. Летом распре-

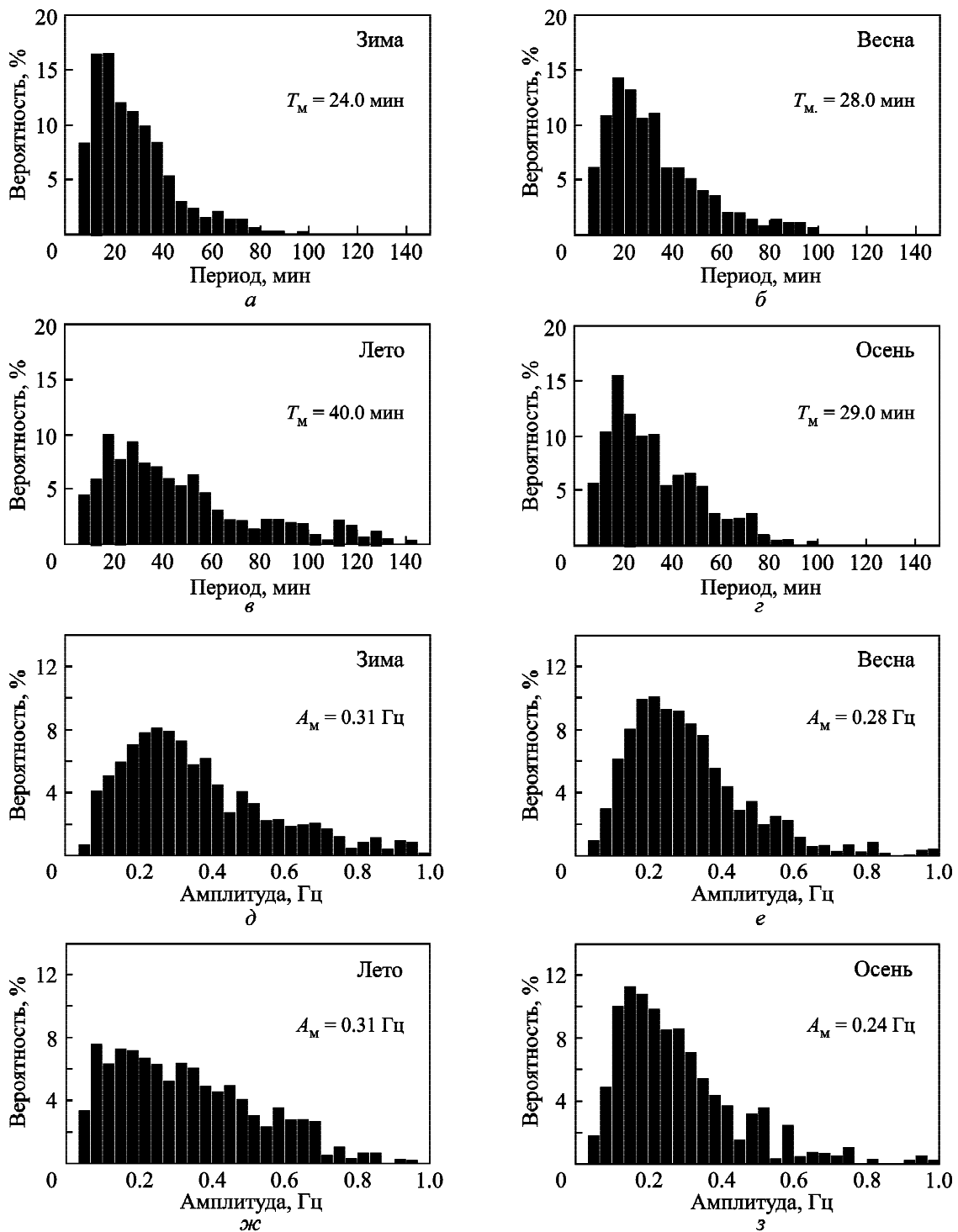


Рис. 3. Распределения периодов T и амплитуд A вариаций ДСЧ, построенные для каждого сезона годового интервала наблюдений: a и d – зимой, b и e – весной, $в$ и $ж$ – летом, $з$ и $з$ – осенью

деление становится более равномерным и отличается от распределений в остальные сезоны.

Суточные зависимости почасовых средних периодов вариаций ДСЧ для каждого сезона пред-

ставлены на рис. 4, a – $г$. На рис. 4, d – $з$ демонстрируются суточные зависимости средних значений амплитуд вариаций ДСЧ. Следует отметить, что зависимости амплитуд и периодов для одного

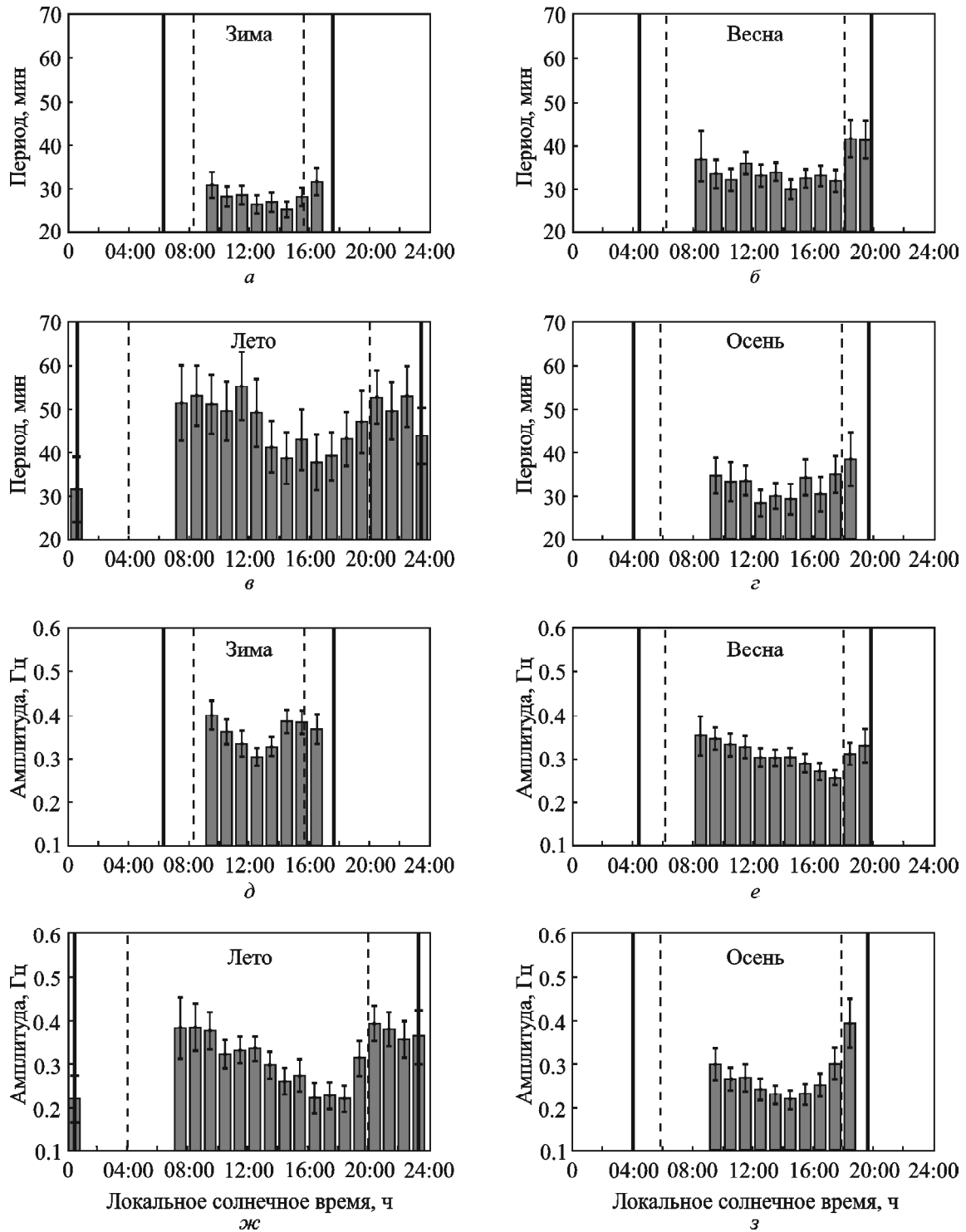


Рис. 4. Суточные зависимости почасовых средних значений периодов T и амплитуд A вариаций ДСЧ, построенные по данным наблюдений в НЧО для каждого сезона: *a* и *д* – зимой, *б* и *е* – весной, *в* и *ж* – летом, *г* и *з* – осенью. Вертикальными пунктирными и сплошными линиями отмечены моменты прохождения терминатора через среднюю точку радиотрассы на поверхности Земли и на высоте 250 км соответственно; вертикальными отрезками показан 90 %-ый доверительный интервал

и того же сезона похожи. Значения периодов и амплитуд вариаций ДСЧ возрастают после восхода Солнца и вблизи вечернего терминатора для всех сезонов, а в полуденные и послеполуденные часы снижаются. Причиной снижения может быть смещение точки отражения вниз, к поверхности земли (известно [53, 54], что с уменьшением высоты амплитуды и периоды АГВ также уменьшаются), вызванное увеличением электронной концентрации ионосферы. Утром и вечером амплитуды вариаций ДСЧ могут расти из-за приближения максимально применимой частоты к частоте зондирования. Еще одним объяснением может быть увеличение амплитуд возмущений во время прохождения терминатора, который является регулярным источником АГВ/ПИВ [49, 55]. Например, в работе [56] увеличение вариаций летом около 18:00 локального времени связывают с ПИВ, возбуждаемыми вечерним терминатором.

3.3. Зависимость параметров вариаций ДСЧ от геомагнитной активности

Для оценки влияния уровня геомагнитной возмущенности на параметры вариаций ДСЧ на радиолинии РВМ–НЧО анализировались их значения при различных значениях локального индекса геомагнитной активности K . Следует отметить, что локальный индекс геомагнитной возмущенности рассчитывался по данным мониторинговых измерений вариаций трех компонент магнитного поля Земли, осуществляющихся в обсерватории НЧО РИ НАН Украины [57]. На рис. 5 показаны вероятности наблюдения вариаций ДСЧ в разные сезоны при низкой ($K < 2$, светло-серые столбики) и высокой ($K \geq 2$, серые столбики) геомагнитной активности. Вычисления производились только для случаев отражения пробного сигнала от области F ионосферы. Из рисунка видно, что вероятность наблюдения вариаций ДСЧ в магнитоспокойных условиях выше, чем в магнитовозмущенных. Аналогичное уменьшение вероятности наблюдения ПИВ в освещенное время суток было отмечено и в работе [30].

Из анализа вариации ДСЧ следует, что во время магнитных бурь можно ожидать усиления источника крупномасштабных ионосферных возмущений, стимулированного высыпаниями заряженных частиц и разогревом атмосферы в авроральных областях. Отметим, что неоднородности, генерируемые авроральным источником,

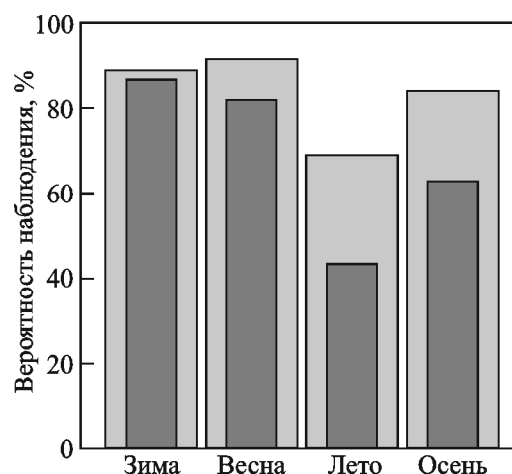


Рис. 5. Вероятность регистрации вариаций ДСЧ, по данным наблюдений в НЧО, в отсутствие эффекта экранирования F-области для разных сезонов в условиях низкого $K < 2$ (светло-серые столбики) и высокого $K \geq 2$ (темно-серые столбики) уровня геомагнитной активности

характеризуются большими значениями периодов и амплитуд [17, 18, 39], чем среднемасштабные неоднородности, характерные для магнитоспокойных условий.

Для проверки предположения об усилении полярного источника ПИВ были проанализированы значения средних периодов (рис. 6, а) и амплитуд (рис. 6, б) вариаций ДСЧ в зависимости от локального индекса геомагнитной активности K . Видно, что оба параметра увеличиваются с ростом K -индекса.

Факт роста амплитуды и периода АГВ хорошо демонстрируется динамикой поведения вариаций ДСЧ при увеличении геомагнитной активности. В ряде случаев наблюдалось увеличение амплитуд вариаций ДСЧ до 0.5 Гц и периодов до 1 ч и более. Один из таких наглядных примеров приведен на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что крупномасштабные ионосферные возмущения регистрируются даже при относительно небольших значениях индекса геомагнитной активности $K = 3$. Поскольку 2012–2013 гг. не соответствовали максимальной фазе 11-летнего солнечного цикла, число магнитовозмущенных дней было невелико и значения K -индекса выше 4 в средних широтах практически не наблюдались. Для подтверждения влияния возмущений магнитного поля Земли на параметры ПИВ предполагается дальнейшая обработка данных, полученных на НЧО в последующие за 2013 г. шесть лет наблюдений.

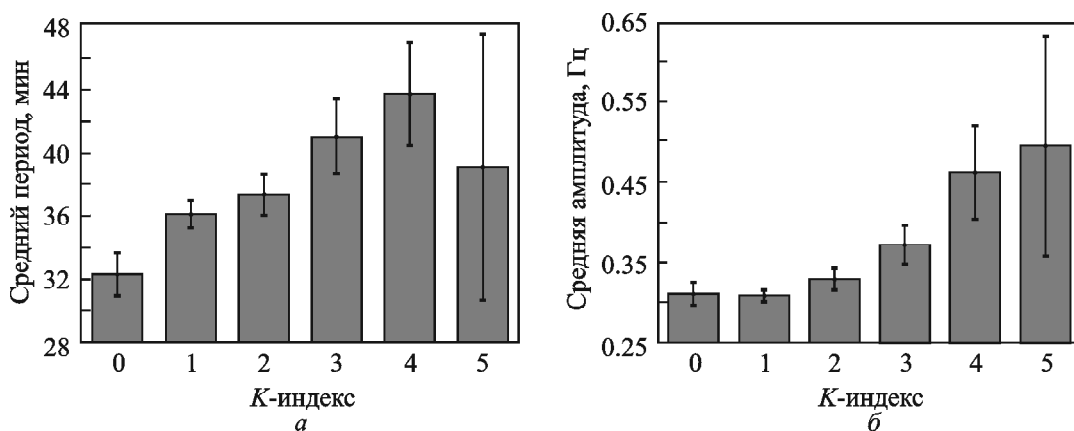


Рис. 6. Зависимость средних значений периодов $T(a)$ и амплитуд $A(b)$ вариаций ДСЧ, наблюдавшихся в НЧО, от уровня геомагнитной возмущенности. Вертикальными отрезками показан 90 %-ый доверительный интервал

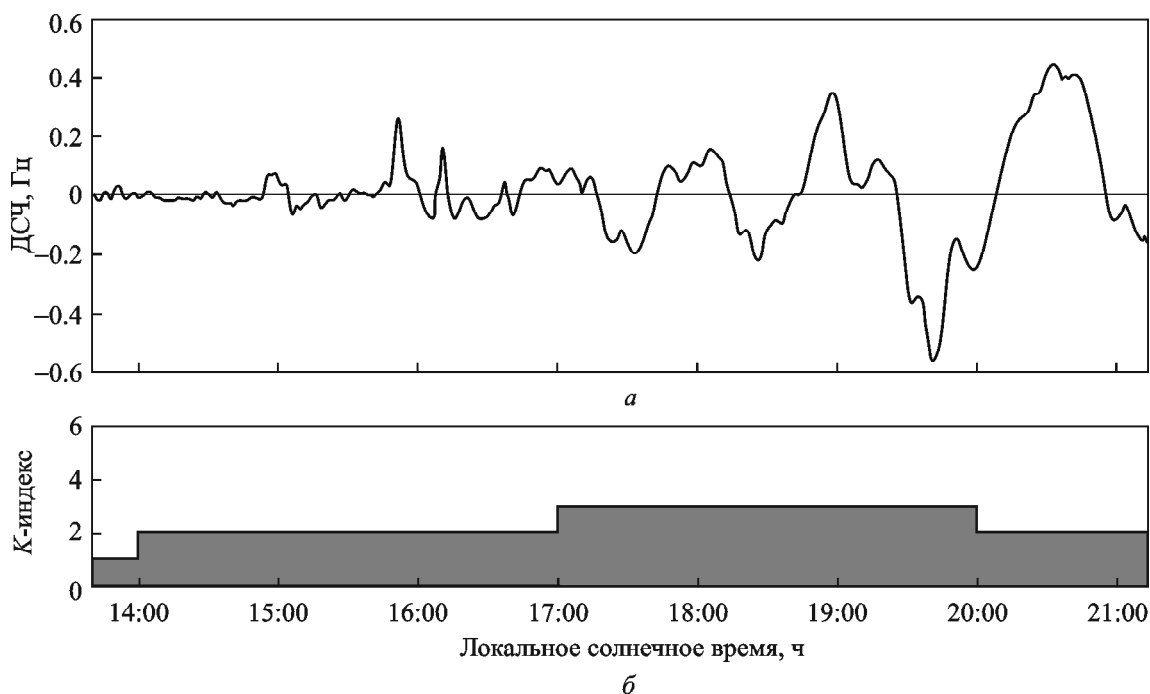


Рис. 7. Вариация ДСЧ ВЧ сигнала, принятого в НЧО 5 мая 2013 г., с 13:30 до 21:20 локального солнечного времени (а) и фиксировавшийся в этот промежуток времени локальный индекс геомагнитной активности $K(b)$

4. Выводы

В работе представлены суточно-сезонные зависимости вероятности регистрации, периодов и амплитуд вариаций ДСЧ на однокачковой контрольной радиотрассе, связанные с прохождением ПИВ. Статистические оценки проведены по данным годовых наблюдений ВЧ сигналов в НЧО РИ НАН Украины. Кратко изложены методика и алгоритмы автоматического выделения и обработки параметров вариаций ДСЧ.

Введены критерии для исключения из рассмотрения эффектов экранирования верхней ионосферы слоями E и E_s, оценено их влияние на суточно-сезонные зависимости периодов волновых возмущений.

Анализ данных показал следующее.

– Вероятность наблюдения вариаций ДСЧ достаточно сильно зависит от сезона года. Она максимальна в зимний и весенний периоды (77 ÷ 89 %) и значительно снижается летом и

осенью (21 ÷ 71 %) с минимумом в июле (21 %). Такое снижение объясняется не только уменьшением вероятности существования ионосферных неоднородностей, но и экранированием F-области нижележащими слоями E и E_s. После исключения данных, зарегистрированных в условиях экранирования, в зимний и весенний сезоны вероятность наблюдения вариаций ДСЧ составляет 81 ÷ 91 %, а в летний и осенний – 52 ÷ 80 %.

– Суточные распределения вероятности наблюдения в разные сезоны после исключения эффекта экранирования демонстрируют два вида зависимостей: зимой и весной в освещенное время стабильно высокая вероятность с незначительным максимумом в послеполуденные часы (наиболее четко прослеживается весной); летом и осенью два суточных максимума – полуденный и вечерний, с минимумом между ними, который лучше всего прослеживается летом.

– Формы сезонных распределений периодов похожи для осени, зимы и весны. Летом распределение расширяется, растет вероятность увеличения периодов до 90 мин и более. Медианные значения периодов максимальны летом (≈ 40 мин) и минимальны зимой (≈ 24 мин). Весной и осенью регистрируются промежуточные величины, 28 и 29 мин соответственно.

– Распределения амплитуд подобны осенью, зимой и весной. Летом форма распределения становится более равномерной. Следует отметить, что разброс медианных значений амплитуд (зимой и летом они составляют 0.31 Гц, весной – 0.28 Гц, осенью – 0.24 Гц) меньше, чем разброс медианных значений периодов.

– Формы суточных распределений как амплитуд, так и периодов для всех сезонов в целом похожи. Максимумы наблюдаются в утренние и вечерние часы, минимум – в послеполуденное время.

– Анализ данных в зависимости от состояния геомагнитной активности показал, что вероятность наблюдения квазипериодических вариаций ДСЧ в магнитоспокойных условиях выше, чем в магнитовозмущенных. Периоды и амплитуды вариаций возрастают с увеличением индекса геомагнитной активности K. Во время магнитных бурь в ряде случаев фиксируется увеличение амплитуд вариаций ДСЧ до 0.5 Гц с периодами более 60 мин. Такие события могут быть вызваны крупномасштабными АГВ/ПИВ, возбужденными авроральным источником.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за внимание к работе и полезные замечания, позволившие существенно улучшить ее содержание. Мы признательны участникам научных семинаров отдела 22 Радиоастрономического института НАН Украины за активные дискуссии и полезные предложения при обсуждении результатов на всех этапах выполнения работы. Мы благодарны также сотрудникам НЧО РИ НАН Украины и персонально заведующему обсерваторией В. Е. Пазнухову за обеспечение многолетнего функционирования ВЧ приемного комплекса и магнитометрической станции, являющихся частью Объекта национального достояния Украины.

Работа выполнена в рамках бюджетных НИР “Ятаган-3” (№ 0116U000035), “Зонд-5” (№ 0119U100354), “Виддзеркалення” (№ 0118U100207) и партнерского проекта УНТЦ-ЕОАРД (P-735), а также при частичной финансовой поддержке в рамках конкурсных проектов “Гелиомакс-19” (№ 0119U103575) и “Шпицберген-2019” (№ 0119U101802).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Госсард Э., Хук У. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1978. 532 с.
2. Hooke W. H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1968. Vol. 30, Is. 5. P. 795–823. DOI: 10.1016/S0021-9169(68)80033-9
3. Narayanan V. L., Shiokawa K., Otsuka Y., and Neudegg D. On the Role of Thermospheric Winds and Sporadic E Layers in the Formation and Evolution of Electrified MSTIDs in Geomagnetic Conjugate Regions. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. Vol. 123, Is. 8. P. 6957–6980. DOI: 10.1029/2018JA025261
4. Makela J. J. and Otsuka Y. Overview of Nighttime Ionospheric Instabilities at Low- and Mid-Latitudes: Coupling Aspects Resulting in Structuring at the Mesoscale. *Space Sci. Rev.* 2012. Vol. 168, Is. 1-4. P. 419–440. DOI: 10.1007/s11214-011-9816-6
5. Duly T. M., Huba J. D., and Makela J. J. Self-consistent generation of MSTIDs within the SAMI3 numerical model. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. Vol. 119, Is. 8. P. 6745–6757. DOI: 10.1002/2014JA020146
6. Afraimovich E. L., Edemskiy I. K., Leonovich A. S., Leonovich L. A., Voeykov S. V., and Yasyukevich Y. V. MHD nature of night-time MSTIDs excited by solar terminator. *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, Is. 15. id. L15106. DOI: 10.1029/2009GL039803
7. MacDougall J. W. and Jayachandran P. T. Solar terminator and auroral sources for traveling ionospheric disturbances in the midlatitude F region. *J. Atmos. Sol. Terr.*

- Phys.* 2011. Vol. 73, Is. 17-18. P. 2437–2443. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.10.009
8. Matsumura M., Saito A., Iyemori T., Shinagawa H., Tsugawa T., Otsuka Y., Nishioka M., and Chen C. H. Numerical simulations of atmospheric waves excited by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planet Space*. 2011. Vol. 63, Is. 7. P. 885–889. DOI: 10.5047/eps.2011.07.015
 9. Hao Y.-Q., Xiao Z., and Zhang D.-H. Responses of the Ionosphere to the Great Sumatra Earthquake and Volcanic Eruption of Pinatubo. *Chin. Phys. Lett.* 2006. Vol. 23, Is. 7. P. 1955–1957. DOI: 10.1088/0256-307X/23/7/082
 10. Hines C. O. On the nature of travelling ionospheric disturbances launched by low altitude nuclear explosions. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, Is. 7. P. 1877–1882. DOI: 10.1029/JZ072i007p01877
 11. Lin C. C. H., Shen M. H., Chou M. Y., Chen C. H., Yue J., Chen P. C., and Matsumura M. Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, Is. 15. P. 7578–7586. DOI: 10.1002/2017GL074192
 12. Liu H., Ding F., Yue X., Zhao B., Song Q., Wan W., Ning B., and Zhang K. Depletion and Traveling Ionospheric Disturbances Generated by Two Launches of China's Long March 4B Rocket. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2018. Vol. 123, Is. 12. P. 10319–10330. DOI: 10.1029/2018JA026096
 13. Huang Y.-N., Cheng K., and Chen S.-W. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system. *Radio Sci.* 1985. Vol. 20, Is. 4. P. 897–906. DOI: 10.1029/RS020i004p00897
 14. Garcia R. F., Doornbos E., Bruinsma S., and Hebert H. Atmospheric gravity waves due to the Tohoku Oki tsunami observed in the thermosphere by GOCE. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. Vol. 119, Is. 8. P. 4498–4506. DOI: 10.1002/2013JD021120
 15. Fritts D. C. and Alexander M. J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys.* 2003. Vol. 41, Is. 1. id. 1003. DOI: 10.1029/2001RG000106
 16. Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68, Is. 3-5. P. 479–497. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.01.018
 17. Hocke K. and Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 14, Is. 9. P. 917–940. DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6
 18. Харгривс Дж. К. *Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи (Введение в физику околоземной космической среды)*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 290 с.
 19. Waldock J. A. and Jones T. B. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1986. Vol. 48, Is. 3. P. 245–260. DOI: 10.1016/0021-9169(86)90099-1
 20. Oinats A. V., Nishitani N., Ponomarenko P., Berggardt O. I., and Ratovsky K. G. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. *Earth Planet Space*. 2016. Vol. 68, Is. 1. id. 8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8
 21. Bowman G. G. A Review of Some Recent Work on Mid-Latitude Spread-F Occurrence as Detected by Ionosondes. *J. Geomagn. Geoelect.* 1990. Vol. 42, Is. 2. P. 109–138. DOI: 10.5636/jgg.42.109
 22. Paznukhov V. V., Galushko V. G., and Reinisch B. W. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 49, Is. 4. P. 700–710. DOI: 10.1016/j.asr.2011.11.012
 23. Барабаш В. В., Панасенко С. В., Аксьонова К. Д., Лисаченко В. М. Характеристики рухомих іоносферних збурень над Україною та західною Антарктикою під час сильної геокозмічної бурі за даними вертикального зондування та некогерентного розсіяння. *Український антарктичний журнал*. 2017. № 16. С. 113–122. URL: <http://uaj.uac.gov.ua/index.php/uaj/article/view/69/33> (дата обращения: 27.03.2020). DOI: 10.33275/1727-7485.16.2017.69
 24. Williams P. J. S. Observations of atmospheric gravity waves with incoherent scatter radar. *Adv. Space Res.* 1989. Vol. 9, Is. 5. P. 65–72. DOI: 10.1016/0273-1177(89)90342-6
 25. Panasenko S.V., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Aksonova K. D., and Domnin I. F. Traveling ionospheric disturbances observed by Kharkiv and Millstone Hill incoherent scatter radars near vernal equinox and summer solstice. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2018. Vol. 172. P. 10–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.001
 26. Jonah O. F., Panasenko S. V., Aksonova K. D., Goncharenko L. P., and Coster A. Observations of traveling ionospheric disturbances at midlatitudes during geomagnetic storm of 1–3 September 2016. *2018 AGU Fall Meeting Abstracts*. (December 10-14, 2018. Washington) Washington D.C., USA, 2018. id. SA33C-3491. DOI: 10.13140/RG.2.2.23123.84003
 27. Черногор Л. Ф., Панасенко С. В., Фролов В. Л., Домнин И. Ф. Наблюдения волновых возмущений в ионосфере на харьковском радаре некогерентного рассеяния при воздействии на околоземную плазму мощным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 2. С. 85–99. URL: https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/2015_2_85.pdf (дата обращения: 27.03.2020).
 28. Morton F. W. and Essex E. A. Gravity wave observations at a southern hemisphere mid-latitude station using the total electron content technique. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1978. Vol. 40, Is. 10-11. P. 1113–1122. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90059-4
 29. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Lesyuta O. S., Ushakov I. I., and Yakovets A. F. Geomagnetic Control of the Spectrum of Traveling Ionospheric Disturbances Based on Data from a Global GPS Network. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19, Is. 7. P. 723–731. DOI: 10.5194/angeo-19-723-2001
 30. Chen G., Zhou C., Liu Y., Zhao J., Tang Q., Wang X., and Zhao Z. A statistical analysis of medium-scale traveling ionospheric disturbances during 2014–2017 using the Hong Kong CORS network. *Earth Planet Space*. 2019. Vol. 71, Is. 1. id. 52. DOI: 10.1186/s40623-019-1031-9
 31. Shiokawa K., Ihara C., Otsuka Y., and Ogawa T. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003. Vol. 108, Is. A1. id. 1052. DOI: 10.1029/2002JA009491

32. Huang F., Dou X., Lei J., Lin J., Ding F., and Zhong J. Statistical analysis of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using airglow images and GPS observations over central China. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. Vol. 121, Is. 9. P. 8887–8899. DOI: 10.1002/2016JA022760
33. Domnin I. F., Chepurnyy Y. M., Emelyanov L. Y., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., and Iskra D. A. Kharkiv incoherent scatter facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Radiophysics and Ionosphere.* 2014. No. 47(1089). P 28–42. URL: https://www.researchgate.net/publication/299535724_Kharkiv_incoherent_scatter_facility (дата обращения: 19.03.2020).
34. Зализовский А. В., Кашеев А. С., Кашеев С. Б., Колосков А. В., Лисаченко В. Н., Пазнухов В. В., Пикулик И. И., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Макет портативного когерентного ионозонда. *Космічна наука і технологія.* 2018. Т. 24, № 3. С. 10–22. DOI: 10.15407/knit2018.03.010
35. Zalizovski A., Yampolski Y., Mishin E., Koloskov A., Paznukhov V., Kashcheyev S., Sopin A., Aksonova K., and Zanimonsky E. AGW/TID over the Antarctic Peninsula and Eastern Europe as observed by multiposition HF doppler and GNSS-TEC techniques. *CEDAR-2019 Workshop.* (16–21 June, 2019. Santa Fe). Santa Fe, NM, USA, 2019. URL: <https://www.researchgate.net/publication/334230940> (дата обращения: 19.03.2020).
36. Galushko V. G., Paznukhov V. V., Sopin A. A., and Yampolski Y. M. Statistics of ionospheric disturbances over the Antarctic Peninsula as derived from TEC measurements. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. Vol. 121, Is. 4. P. 3395–3409. DOI: 10.1002/2015JA022302
37. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Y. M., and Figurski M. Efficient Usage of Dense GNSS Networks in Central Europe for the Visualization and Investigation of Ionospheric TEC Variations. *Sensors.* 2017. Vol. 17, Is. 10. id. 2298. DOI: 10.3390/s17102298
38. Galushko V. G. Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere. *Telecomm. Radio Eng.* 1997. Vol. 51, Is. 6-7. P. 1–6. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.10
39. Galushko V. G., Kascheev A. S., Paznukhov V. V., Yampolski Y. M., and Reinisch B. W. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Sci.* 2008. Vol. 43, Is. 4. id. RS4013. DOI: 10.1029/2007RS003735
40. Beley V. S., Galushko V. G., and Yampolski Y. M. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. *Radio Sci.* 1995. Vol. 30, Is. 6. P. 1739–1752. DOI: 10.1029/95RS01992
41. Пикулик И. И., Кашеев С. Б., Галушко В. Г., Ямпольский Ю. М. Приемный КВ комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктике. *Український антарктичний журнал.* 2003. №1. С. 61–69. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/128125/08-Pikulin.pdf> (дата обращения: 27.03.2020).
42. Galushko V. G., Kashcheyev A. S., Kashcheyev S. B., Koloskov A. V., Pikulik I. I., Yampolski Y. M., Litvinov V. A., Milinevsky G. P., and Rakusa-Suszczewski S. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2007. Vol. 69, Is. 4-5. P. 403–410. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.05.010
43. Belyey V. S., Galushko V. G., Paznukhov D., Reinisch B. W., and Yampolski Y. M. HF Radar Sounding of TIDs with the Use of the DPS System and Signals from Broadcasting Stations. *Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symp. PIERS-2000.* (July 5–14, 2000. Cambridge). Cambridge, MA, USA, 2000. P. 602.
44. Galushko V. G., Beley V. S., Koloskov A. V., Yampolski Y. M., Paznukhov V. V., Reinisch B. W., Foster J. C., and Erickson P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. *Radio Sci.* 2003. Vol. 38, Is. 6. id. 1102. DOI: 10.1029/2002RS002861
45. Reinisch B., Galkin I., Belehaki A., Paznukhov V., Huang X., Altadill D., Buresova D., Mielich J., Verhulst T., Stankov S., Blanch E., Kouba D., Hamel R., Kozlov A., Tsagouri I., Mouzakis A., Messerotti M., Parkinson M., and Ishii M. Pilot Ionosonde Network for Identification of Traveling Ionospheric Disturbances. *Radio Sci.* 2018. Vol. 53, Is. 3. P. 365–378. DOI: 10.1002/2017RS006263
46. Колосков А. В., Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Галушко В. Г., Кашеев А. С., Ла Хоз С., Брекке А., Белей В. С., Ритвелд М. Т. Сеть Интернет-управляемых ВЧ приемников для ионосферных исследований. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2014. Т. 19, № 4. С. 324–335. DOI: 10.15407/rpra19.04.324
47. *Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, телевидение и сеть звукового вещания. Бюллетень.* Под ред. Г. Т. Черенкова. Москва: Издательство стандартов, 1979. 27 с.
48. PARUS-A Archive. *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences.* Last updated: 2020. URL: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/moscow/text/> (дата обращения: 27.03.2020).
49. Сомсиков В. М. *Солнечный терминатор и динамика атмосферы.* Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.
50. Friedman V. A. A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise. *IEEE Trans. Signal Process.* 1994. Vol. 42, Is. 6. P. 1565–1569. DOI: 10.1109/78.286978
51. Резниченко А. И., Колосков А. В., Ямпольский Ю. М. Мониторинг регулярных и спорадических ионосферных вариаций на односкачковых ВЧ радиоприемах. *Радіофізика і радіоастрономія.* 2018. Т. 23, № 4. С. 266–279. DOI: 10.15407/rpra23.04.266
52. Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Tolstikov M. V., Oinats A. V., Alsatkin S. S., and Zherebtsov G. A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. Vol. 122, Is. 7. P. 7567–7580. DOI: 10.1002/2017JA024103
53. Oliver W. L., Otsuka Y., Sato M., Takami T., and Fukao S. A climatology of F region gravity wave propagation over the middle and upper atmosphere radar. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1997. Vol. 102, Is. A7. P. 14499–14512. DOI: 10.1029/97JA00491
54. Лизунов Г. В., Леонтьев А. Ю. Высота проникновения в ионосферу внутренних атмосферных гравитационных волн. *Космічна наука і технологія.* 2014. Т. 20, № 4. С. 31–41. DOI: 10.15407/knit2014.04.031

55. Boška J., Šauli P., Altadill D., Solé J. G., and Alberca L. F. Diurnal Variation of Gravity Wave Activity at Midlatitudes in the Ionospheric F region. *Stud. Geophys. Geod.* 2003. Vol. 47, Is. 3. P. 579–586. DOI: 10.1023/A:1024763618505
56. Kotake N., Otsuka Y., Ogawa T., Tsugawa T., and Saito A. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California. *Earth Planet Space.* 2007. Vol. 59, Is. 2. P. 95–102. DOI: 10.1186/BF03352681
57. K-Indexes of geomagnetic activity. *Department of Radio-physics of Geospace, Institute of Radio Astronomy of the National Academy of Sciences of Ukraine.* URL: http://geospace.com.ua/data/metmag_ki.php (дата обращения: 27.03.2020).

REFERENCES

1. GOSSARD, E. and HOOKE, W., 1978. *Waves in the atmosphere.* Moscow, Russia: Mir Publ. (in Russian).
2. HOOKE, W. H., 1968. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 30, is. 5, pp. 795–823. DOI: 10.1016/S0021-9169(68)80033-9
3. NARAYANAN, V. L., SHIOKAWA, K., OTSUKA, Y. and NEUDEGG, D., 2018 On the Role of Thermospheric Winds and Sporadic E Layers in the Formation and Evolution of Electrified MSTIDs in Geomagnetic Conjugate Regions. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 123, is. 8, pp. 6957–6980. DOI: 10.1029/2018JA025261
4. MAKELA, J. J. and OTSUKA, Y., 2012. Overview of Nighttime Ionospheric Instabilities at Low- and Mid-Latitudes: Coupling Aspects Resulting in Structuring at the Mesoscale. *Space Sci. Rev.* vol. 168, is. 1-4, pp. 419–440. DOI: 10.1007/s11214-011-9816-6
5. DULY, T. M., HUBA J. D. and MAKELA, J. J., 2014. Self-consistent generation of MSTIDs within the SAMI3 numerical model. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 119, no. 8, pp. 6745–6757. DOI: 10.1002/2014JA020146
6. AFRAIMOVICH, E. L., EDEMSKIY, I. K., LEONOVICH, A. S., LEONOVICH, L. A., VOEYKOV, S. V. and YASYUKEVICH, Y. V., 2009. MHD nature of night-time MSTIDs excited by solar terminator. *Geophys. Res. Lett.* vol. 36, is. 15, id. L15106. DOI: 10.1029/2009GL039803
7. MACDOUGALL, J. W. and JAYACHANDRAN, P. T., 2011. Solar terminator and auroral sources for traveling ionospheric disturbances in the midlatitude F region. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* vol. 73, is. 17-18, pp. 2437–2443. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.10.009
8. MATSUMURA, M., SAITO, A., IYEMORI, T., SHINAGAWA, H., TSUGAWA, T., OTSUKA, Y., NISHIOKA, M. and CHEN, C. H., 2011. Numerical simulations of atmospheric waves excited by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planet Space.* vol. 63, is. 7, pp. 885–889. DOI: 10.5047/eps.2011.07.015
9. HAO, Y.-Q., XIAO, Z. and ZHANG, D.-H., 2006. Responses of the ionosphere to the great Sumatra earthquake and volcanic eruption of Pinatubo. *Chin. Phys. Lett.* vol. 23, is. 7, pp. 1955–1957. DOI: 10.1088/0256-307X/23/7/082
10. HINES, C. O., 1967. On the nature of travelling ionospheric disturbances launched by low altitude nuclear explosions. *J. Geophys. Res.* vol. 72, is. 7, pp. 1877–1882. DOI: 10.1029/JZ072i007p01877
11. LIN, C. C. H., SHEN, M. H., CHOU, M. Y., CHEN, C. H., YUE, J., CHEN, P. C. and MATSUMURA, M., 2017. Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. *Geophys. Res. Lett.* vol. 44, is. 15, pp. 7578–7586. DOI: 10.1002/2017GL074192
12. LIU, H., DING, F., YUE, X., ZHAO, B., SONG, Q., WAN, W., NING, B. and ZHANG, K., 2018. Depletion and Traveling Ionospheric Disturbances Generated by Two Launches of China's Long March 4B Rocket. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 123, is. 12, pp. 10319–10330. DOI: 10.1029/2018JA026096
13. HUANG, Y.-N., CHENG, K. and CHEN, S.-W., 1985. On the detection of acoustic-gravity waves generated by typhoon by use of real time HF Doppler frequency shift sounding system. *Radio Sci.* vol. 20, is. 4, pp. 897–906. DOI: 10.1029/RS020i004p00897
14. GARCIA, R. F., DOORNBOS, E., BRUINSMA, S. and HEBERT, H., 2014. Atmospheric gravity waves due to the Tohoku Oki tsunami observed in the thermosphere by GOCE. *J. Geophys. Res. Atmos.* vol. 119, is. 8, pp. 4498–4506. DOI: 10.1002/2013JD021120
15. FRITTS, D. C. and ALEXANDER, M. J., 2003. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys.* vol. 41, is. 1, id. 1003. DOI: 10.1029/2001RG000106
16. LAŠTOVIČKA, J., 2006. Forcing of the ionosphere by waves from below. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 68, is. 3-5, pp. 479–497. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.01.018
17. HOCKE, K. and SCHLEGEL, K., 1996. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Ann. Geophys.* vol. 14, is. 9, pp. 917–940. DOI: 10.1007/s00585-996-0917-6
18. HARGREAVES, J. K., 1979. *The Upper Atmosphere and Solar-terrestrial Relations: An Introduction to the Aerospace Environment.* New York: Van Nostrand Reinhold.
19. WALDOCK, J. A. and JONES, T. B., 1986. HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances at mid-latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 48, is. 3, pp. 245–260. DOI: 10.1016/0021-9169(86)90099-1
20. OINATS, A.V., NISHITANI, N., PONOMARENKO, P., BERNGARDT, O. I. and RATOVSKEY, K. G., 2016. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. *Earth Planet Space.* vol. 68, is. 1, id. 8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8
21. BOWMAN, G. G., 1990. A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes. *J. Geomagn. Geoelect.* vol. 42, is. 2, pp. 109–138. DOI: 10.5636/jgg.42.109
22. PAZNUKHOV, V. V., GALUSHKO, V. G. and REINISCH, B. W., 2012. Digisonde observations of TIDs with frequency and angular sounding technique. *Adv. Space Res.* vol. 49, is. 4, pp. 700–710. DOI: 10.1016/j.asr.2011.11.012
23. BARABASH, V. V., PANASENKO, S. V., AKSONOVA, K. D. and LISACHENKO, V. N., 2017. Characteristics of moving ionospheric disturbances over Ukraine and West Antarctica during the strong geospace storm according to data of vertical sounding and incoherent scattering. *Ukrainian Antarctic Journal* [online]. no. 16, pp. 113–122.

- (in Ukrainian). DOI: 10.33275/1727-7485.16.2017.69 [viewed 27 March 2020]. Available from: <http://uaj.uac.gov.ua/index.php/uaj/article/download/69/33/>
24. WILLIAMS, P. J. S., 1989. Observations of Atmospheric Gravity Waves with Incoherent Scatter Radar. *Adv. Space Res.* vol. 9, is. 5, pp. 65–72. DOI: 10.1016/0273-1177(89)90342-6
 25. PANASENKO, S.V., GONCHARENKO, L. P., ERICKSON, P. J., AKSONOVA, K. D. and DOMNIN, I. F., 2018. Traveling ionospheric disturbances observed by Kharkiv and Millstone Hill incoherent scatter radars near vernal equinox and summer solstice. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 172, pp. 10–23. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.001
 26. JONAH, O. F., PANASENKO S. V., AKSONOVA K. D., GONCHARENKO L. P., and COSTER A., 2018 Observations of traveling ionospheric disturbances at midlatitudes during geomagnetic storm of 1–3 September 2016. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Washington D.C., USA, December 10-14, 2018. id. SA33C-3491. DOI: 10.13140/RG.2.2.23123.84003
 27. CHERNOGOR, L. F., PANASENKO. S. V., FROLOV, V. L. and DOMNIN, I. F., 2015. Observations of the Ionospheric Wave Disturbances Using the Kharkov Incoherent Scatter Radar upon RF Heating of the Near-Earth Plasma. *Radio-phys. Quantum Electron.* vol. 58, is. 2, pp. 79–91. DOI: 10.1007/s11141-015-9583-4
 28. MORTON, F. W. and ESSEX, E. A., 1978. Gravity wave observations at a southern hemisphere mid-latitude station using the total electron content technique. *J. Atmos. Terr. Phys.* vol. 40, is. 10-11, pp. 1113–1122. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90059-4
 29. AFRAIMOVICH, E. L., KOSOGOROV, E. A., LESYUTA, O. S., USHAKOV, I. I. and YAKOVETS, A. F., 2001. Geomagnetic Control of the Spectrum of Traveling Ionospheric Disturbances Based on Data from a Global GPS Network. *Ann. Geophys.* vol. 19, is. 7, pp. 723–731. DOI: 10.5194/angeo-19-723-2001
 30. CHEN, G., ZHOU, C., LIU, Y., ZHAO, J., TANG, Q., WANG, X. and ZHAO, Z., 2019. A statistical analysis of medium-scale traveling ionospheric disturbances during 2014–2017 using the Hong Kong CORS network. *Earth Planet Space.* vol. 71, id. 52. DOI: 10.1186/s40623-019-1031-9
 31. SHIOKAWA, K., IHARA, C., OTSUKA, Y. and OGAWA, T., 2003. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 108, is. A1, id. 1052. DOI: 10.1029/2002JA009491
 32. HUANG, F., DOU, X., LEI, J., LIN, J., DING, F. and ZHONG, J., 2016. Statistical analysis of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using airglow images and GPS observations over central China. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 121, is. 9, pp. 8887–8899. DOI: 10.1002/2016JA022760
 33. DOMNIN, I. F., CHEPURNYI, Y. M., EMELYANOV, L. Y., CHERNYAEV, S. V., KONONENKO, A. F., KOTOV, D. V., BOGOMAZ O. V. and ISKRA, D. A., 2014. Kharkiv incoherent scatter facility. *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Radio-physics and Ionosphere* [online]. no. 47(1089), pp 28–42. [viewed 19 March 2020]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/299535724_Kharkiv_incoherent_scatter_facility
 34. ZALIZOVSKI, A. V., KASHCHEIEV, A. S., KASHCHEIEV, S. B., KOLOSKOV, A. V., LISACHENKO, V. N., PAZNUKHOV, V. V., PIKULIK, I., SOPIN, A. A. and YAMPOLSKI, Y. M., 2018. A prototype of a portable coherent ionosonde. *Space Sci. Technol.* vol. 24, no. 3, pp. 10–22. (in Russian). DOI: 10.15407/knit2018.03.010
 35. ZALIZOVSKI, A., YAMPOLSKI, Y., MISHIN, E., KOLOSKOV, A., PAZNUKHOV, V., KASHCHEYEV, S., SOPIN, A., AKSONOVA K. and ZANIMONSKY, E., 2019. AGW/TID over the Antarctic Peninsula and Eastern Europe as observed by multiposition HF doppler and GNSS-TEC techniques. In: *CEDAR-2019 Workshop*. [online]. Santa Fe, NM, USA, 16-21 June 2019 [viewed 19 March 2020]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/334230940>
 36. GALUSHKO, V. G., PAZNUKHOV, V. V., SOPIN, A. A. and YAMPOLSKI, Y. M., 2016. Statistics of ionospheric disturbances over the Antarctic Peninsula as derived from TEC measurements. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 121, is. 4, pp. 3395–3409. DOI: 10.1002/2015JA022302
 37. NYKIEL, G., ZANIMONSKIY, Y. M., YAMPOLSKI, Y. M. and FIGURSKI, M., 2017. Efficient Usage of Dense GNSS Networks in Central Europe for the Visualization and Investigation of Ionospheric TEC Variations. *Sensors.* vol. 17, is. 10, id. 2298. DOI: 10.3390/s17102298
 38. GALUSHKO, V. G., 1997. Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere. *Telecomm. Radio Eng.* vol. 51, is. 6-7, pp. 1–6. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v51.i6-7.10
 39. GALUSHKO, V. G., KASCHEEV, A. S., PAZNUKHOV, V. V., YAMPOLSKI, Y. M. and REINISCH, B. W., 2008. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves. *Radio Sci.* vol. 43, is. 4, id. RS4013. DOI: 10.1029/2007RS003735
 40. BELEY, V. S., GALUSHKO, V. G. and YAMPOLSKI, Y. M., 1995. Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations. *Radio Sci.* vol. 30, is. 6, pp. 1739–1752. DOI: 10.1029/95RS01992
 41. PIKULIK, I. I., KASHCHEYEV, S. B., GALUSHKO, V. G. and YAMPOLSKI, YU. M., 2003. HF-receiver Equipment for Frequency-and-Angular Sounding of the Ionosphere in Antarctica. *Ukrainian Antarctic journal* [online]. no. 1, pp. 61–69. (in Russian). [viewed 27 March 2020]. Available from: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/128125/08-Pikulin.pdf>
 42. GALUSHKO, V. G., KASHCHEYEV, A. S., KASHCHEYEV, S. B., KOLOSKOV, A. V., PIKULIK, I. I., YAMPOLSKI, Y. M., LITVINOV, V. A., MILINEVSKY, G. P. and RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S., 2007. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* vol. 69, is. 4-5, pp. 403–410. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.05.010
 43. BELEY, V. S., GALUSHKO, V. G., PAZNUKHOV, D., REINISCH, B. W. and YAMPOLSKI, Y. M., 2000. HF Radar Sounding of TIDs with the Use of the DPS System and Signals from Broadcasting Stations. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium PIERS-2000 Proceedings*. Cambridge, MA, USA, July 5-14, 2000. p. 602.

44. GALUSHKO, V. G., BELEY, V. S., KOLOSKOV, A. V., YAMPOLSKI, Y. M., PAZNUKHOV, V. V., REINISCH, B. W., FOSTER, J. C. and ERICKSON, P., 2003. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. *Radio Sci.* vol. 38, is. 6, id. 1102. DOI: 10.1029/2002RS002861
45. REINISCH, B., GALKIN, I., BELEHAKI, A., PAZNUKHOV, V., HUANG, X., ALTADILL, D., BURESOVA, D., MIELICH, J., VERHULST, T., STANKOV, S., BLANCH, E., KOUBA, D., HAMEL, R., KOZLOV, A., TSAGOURI, I., MOUZAKIS, A., MESSEROTTI, M., PARKINSON, M. and ISHII, M., 2018. Pilot Ionosonde Network for Identification of Traveling Ionospheric Disturbances. *Radio Sci.* vol. 53, is. 3, pp. 365–378. DOI: 10.1002/2017RS006263
46. KOLOSKOV, A. V., YAMPOLSKI, Y. M., ZALIZOVSKI, A. V., GALUSHKO, V. G., KASCHEEV, A. S., LAHOZ, C., BREKKE, A., BELEY, V. S. and RIETVELD, M. T., 2014. Network of internet-controlled HF receivers for ionospheric researches. *Radio Pphys. Radio Astron.* vol. 19, no. 4, pp. 324–335. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra19.04.324
47. CHERENKOV, G. T., ed. 1979. *Standard frequency and time signals. Characteristics and schedule of transmittings through radio stations, television and sound broadcast network. The Bulletin.* Moscow, USSR: Standards Publishing House. (in Russian).
48. PUSHKOV INSTITUTE OF TERRESTRIAL MAGNETISM, IONOSPHERE AND RADIO WAVE PROPAGATION RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, 2020. *PARUS-A Archive* [online]. [viewed 27 March 2020]. Available from: <https://www.izmiran.ru/ionosphere/moscow/text/>
49. SOMSIKOV, V. M., 1983. *Solar terminator and dynamic of the atmosphere.* Alma-Ata, Kazakhstan: Nauka Publ. (in Russian).
50. FRIEDMAN, V., 1994. A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise. *IEEE Trans. Signal Process.* vol. 42, is. 6, pp. 1565–1569. DOI: 10.1109/78.286978
51. REZNYCHENKO, A. I., KOLOSKOV, A. V. and YAMPOLSKI, Y. M., 2018. Monitoring of regular and sporadic ionospheric variations on the single-hop HF radio paths. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, no. 4, pp. 266–279. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra23.04.266
52. MEDVEDEV, A. V., RATOVSKEY, K. G., TOLSTIKOV, M. V., OINATS, A. V., ALSATKIN, S. S. and ZHEREBTSOV, G. A., 2017. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 122, is. 7, pp. 7567–7580. DOI: 10.1002/2017JA024103
53. OLIVER, W. L., OTSUKA, Y., SATO M., TAKAMI, T. and FUKAO, S., 1997. A climatology of F region gravity wave propagation over the middle and upper atmosphere radar. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 102, is. A7, pp. 14499–14512. DOI: 10.1029/97JA00491
54. LIZUNOV, G. V. and LEONTIEV, A. YU., 2014. Height of the penetration into the ionosphere for internal atmosphere gravity waves. *Space Sci. Technol.* vol. 20, no. 4, pp. 31–41. (in Russian). DOI: 10.15407/knit2014.04.031
55. BOŠKA, J., ŠAULI, P., ALTADILL, D., SOLÉ, J. G. and ALBERCA, L. F., 2003. Diurnal Variation of Gravity Wave Activity at Midlatitudes in the Ionospheric F region. *Stud. Geophys. Geod.* vol. 47, is. 3, pp. 579–586. DOI: 10.1023/A:1024763618505
56. KOTAKE, N., OTSUKA, Y., OGAWA, T., TSUGAWA, T. and SAITO, A., 2007. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with the GPS networks in Southern California. *Earth Planet Space.* vol. 59, is. 2, pp. 95–102. DOI: 10.1186/BF03352681
57. DEPARTMENT OF RADIOPHYSICS OF GEOSPACE, INSTITUTE OF RADIO ASTRONOMY OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE, 2018. *K-Indexes of geomagnetic activity* [online]. [viewed 27 March 2020]. Available from: http://geospace.com.ua/data/metmag_ki.php

A. I. Reznichenko^{1,2}, A. V. Koloskov^{2,3}, A. O. Sopin², and Y. M. Yampolski²

¹National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”,
2, Kyrpychova St., 61002, Kharkiv, Ukraine

²Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

³State Institution “National Antarctic Scientific Center,
Ministry of Education and Science of Ukraine”,
16, Taras Shevchenko Blvd., Kyiv, 01601, Ukraine

STATISTIC OF SEASONAL AND DIURNAL VARIATIONS OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT OF HF SIGNALS AT MID-LATITUDE RADIO PATH

Purpose: An experimental study of signatures of traveling ionospheric disturbances (TID) observed in diurnal-seasonal variations of the parameters of probe HF signals propagating on the oblique single-hop RWM–LFO radio path, derived from the year-long monitoring data.

Design/methodology/approach: A long term digital recording of the HF radio signals’ waveforms of the Exact time and frequency service station (RWM, Moscow, Russia) was made at the Low Frequency Observatory of the IRA NAS–Ukraine (LFO, Martove, Kharkiv reg., Ukraine). The Doppler frequency shift (DFS) was derived from the power spectra of the recorded signals. The DFS quasiperiodic variations were interpreted as the result of passage of traveling ionospheric disturbances associated with the acoustic-gravity waves (AGW) at the height of the F-layer of ionosphere. The value of the DFS variation period was determined as the sum of the time intervals between neighboring zero crossing of two consecutive half-periods, and the amplitude was determined as the range of variations. The cases of F region shielding by the underlying ionospheric layers E_s and E were taken into account as well.

Findings: The data on the periods and amplitudes of the DFS variations were used for statistical analysis. The probability of DFS variations’ observation was determined for each month. This value lies within 81 to 91 % in winter and spring and decreases to within 52 to 80 % in summer and autumn seasons. It is shown that the rise of electron density in the lower layers of the ionosphere E_s and E makes it difficult to detect TIDs

in the F region. This results in a significant underestimation of the probability of observation in the summer and partially in the spring-autumn seasons. The diurnal-seasonal dependences of the probability of DFS observation, as well as their periods and amplitudes were determined. The forms of daily distributions of both amplitude and period are generally similar for all the seasons. They show two peaks, one in the morning and the second one in the evening, and the minimum in the afternoon. As respects the seasonal distributions of periods and amplitudes, in summer, a higher median value of period and more even distribution of amplitude are observed. In addition, we evaluated the influence of the level of geomagnetic storminess on the characteristics of DFS variations. It was determined that a rise of geomagnetic activity (K -index ≥ 2) is accompanied by decreasing of the observation probability and increasing of the amplitudes and periods of DFS variations.

Conclusions: The techniques developed for the analysis of the data of Doppler ionospheric sounding by non-special type HF signals can be used for diagnostics and analysis of the ionospheric disturbances.

Key words: traveling ionospheric disturbances, quasiperiodic variations, Doppler frequency shift, radio path, period, amplitude, probability of detection

A. I. Резниченко^{1,2}, *О. В. Колосков*^{2,3}, *А. О. Сопін*²,
*Ю. М. Ямпольський*²

¹Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

²Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

³Державна установа “Національний антарктичний
науковий центр МОН України”,
б-р Тараса Шевченка, 16, м. Київ, 01601, Україна

СТАТИСТИКА СЕЗОННИХ І ДОБОВИХ ВАРІАЦІЙ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗМІЩЕННЯ ЧАСТОТИ ВЧ СИГНАЛІВ НА СЕРЕДНЬОШИРОТНІЙ РАДІОЛІНІЇ

Предмет і мета роботи: Експериментальне дослідження проявів рухомих іоносферних збурень (РІЗ) у добово-сезонних варіаціях параметрів пробних ВЧ сигналів на похилій односканковій радіолінії РВМ–НЧО, відновлених за даними повного року моніторингових спостережень.

Методи і методологія: Тривала цифрова реєстрація хвильових форм ВЧ радіосигналів станції Служби точного часу і частоти (РВМ, Москва, Росія) здійснювалася у Низько-частотній обсерваторії Радіоастрономічного інституту НАН України (НЧО, с. Мартове, Харківська обл.). За енергетичними спектрами прийнятих сигналів оцінювалося доплерівське зміщення частоти (ДЗЧ). Квазіперіодичні варіації ДЗЧ інтерпретувалися як результат проходження РІЗ, асоційованих з акустико-гравітаційними хвилями (АГХ) на висотах F-шару іоносфери. Значення періоду варіацій ДЗЧ визначалося як сума інтервалів часу між сусідніми нулями двох слідуєчих один за одним напівперіодів, а під амплітудою розумівся розмах варіацій. Додатково враховувалися випадки екранування області F нижчележачими іоносферними шарами E_s і E.

Результати: Для статистичного аналізу використовувалися дані про періоди і амплітуди квазіперіодичних варіацій ДЗЧ. Визначено імовірність спостереження варіацій ДЗЧ для кожного місяця, яка лежить в діапазоні 81 ÷ 91 % взимку та навесні зі зменшенням влітку та восени до 52 ÷ 80 %. Показано, що зростання концентрації електронів у нижніх шарах іоносфери E_s і E ускладнює виявлення РІЗ в F-області. Це призводить до суттєвого заниження імовірності спостереження у літній і частково у весняно-осінній сезони. Визначено сезонно-добові залежності імовірності спостереження, періодів і амплітуд РІЗ. Форми добових розподілів як амплітуд, так і періодів для всіх сезонів у цілому подібні. Мають місце максимуми вранці і ввечері та мінімум після опівдня. Що стосується сезонних розподілів періодів і амплітуд, влітку спостерігається вище медіанне значення періоду та рівномірніший розподіл амплітуди. Додатково виконано оцінку впливу рівня геомагнітної збуреності на характеристики варіацій ДЗЧ. Виявлено, що зі збільшенням геомагнітної активності (K -індекс ≥ 2) відбувається зменшення імовірності спостереження і зростання амплітуд і періодів варіацій ДЗЧ.

Висновок: Розроблені методики аналізу даних доплерівського зондування іоносфери ВЧ сигналами неспеціального типу можуть використовуватися для діагностики та аналізу іоносферних збурень.

Ключові слова: рухомі іоносферні збурення, квазіперіодичні варіації, доплерівське зміщення частоти, радіолінія, період, амплітуда, імовірність спостереження

Стаття постуила в редакцію 11.12.2019