

УДК 551.510.535

ОЦЕНКА ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ WAKKANAI

© 2020 г. А. Д. Легенька^{1, *}, В. В. Хегай^{1, **}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: leg@izmiran.ru

**e-mail: hegai@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.11.2019 г.

После доработки 05.02.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

На основе метода наложения эпох выполнен анализ данных измерений критической частоты $F2$ -слоя ионосферы ($foF2$), проведенных ионозондом ст. Wakkanai (Япония), расположенной в регионе с высокой сейсмической активностью. Рассмотрены зимние периоды при низкой активности Солнца, когда сейсмическая активность повышена, а геомагнитная активность понижена. Целью работы было определение количественных характеристик ионосферных возмущений, возникающих в результате развития геомагнитных бурь/геомагнитных возмущений, и их сопоставление. Под геомагнитными возмущениями понимались такие проявления геомагнитной активности, когда ее интенсивность не превышала порогового уровня, характерного для слабых геомагнитных бурь, но превосходила “спокойный” геомагнитный фон. Установлено, что слабые геомагнитные бури и геомагнитные возмущения от момента основного минимума Dst -индекса после начала геомагнитной бури/геомагнитного возмущения до конца третьих суток приводят только к положительным отклонениям $foF2$, систематически превышая уровень 6% от фона. Максимальные относительные отклонения от фона ($\delta foF2_{max}$) составляют ~17% и ~14% соответственно, при этом для геомагнитных возмущений наиболее существенная реакция ионосферы наблюдается через ~7 ч после основного отрицательного экстремума по Dst -индексу. Полученные количественные оценки могут быть использованы для фильтрации ложных ионосферных предвестников землетрясений при анализе ионосферных данных ст. Wakkanai.

DOI: 10.31857/S0016794020050120

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферные бури/суббури (ИБ/ИСБ) в области F , связанные с развитием геомагнитных бурь/суббурь (ГБ/ГСБ), и физические механизмы их определяющие, изучаются давно и достаточно хорошо описаны (см. публикации [Matsushita, 1959; Rishbeth, 1991; Prölss, 1993, 1995; Mikhailov, 2000; Danilov and Laštovička, 2001; Деминов, 2015]). Основные черты ИБ в области F ионосферы в терминах изменений критической частоты обыкновенной волны $F2$ -слоя ионосферы ($foF2$), регистрируемой на наземной станции вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ), можно кратко суммировать следующим образом (см. исследования [Rishbeth, 1991; Prölss, 1995; Danilov and Laštovička, 2001]).

(1) Вскоре после начала ГБ величина $foF2$ возрастает. Это так называемая положительная фаза ИБ. Она длится несколько часов.

(2) Спустя несколько часов начинается “главная или отрицательная фаза” бури, которая ха-

рактеризуется сильным уменьшением $foF2$. Типичная продолжительность главной фазы составляет 24–36 ч.

(3) Иногда во время главной фазы бури, особенно в зимний сезон, $foF2$ может испытывать увеличение и превосходить свои значения в спокойные дни. Такой эффект имеет место в основном на низких широтах.

(4) Восстановление $foF2$ к своему невозмущенному уровню происходит в среднем через три дня после начала бури.

(5) На общий ход ИБ часто накладываются значительные сложные вариации, зависящие от местного (LT) и мирового (UT) времени, а также времени, отсчитываемого от начала бури.

Таким образом, если реакция $F2$ -слоя ионосферы на ГБ описывается в терминах $\delta foF2$, т.е. в относительных отклонениях текущего значения критической частоты регулярного $F2$ -слоя ионосферы ($foF2_{current}$) от месячной медианы, вычис-

ленной по всем геомагнитно-спокойным дням месяца ($foF2_{medQ}$), то

$$\delta foF2 = (foF2_{current} - foF2_{medQ}) / foF2_{medQ}. \quad (1)$$

Временная эволюция $\delta foF2$ во время ИБ состоит из временных промежутков с положительными (положительные фазы) и отрицательными (отрицательные фазы) отклонениями. Нередко вся ИБ состоит из единственной продолжительной положительной фазы, и в течение такой ионосферной бури $\delta foF2$ ни в какой момент времени не становится отрицательной.

Как видно из формулы (1), при таком упрощенном подходе (именно он и используется далее в работе), который вполне оправдан для получения нужных количественных оценок в заданном узком диапазоне гелио-геофизических условий (зима, низкий уровень солнечной активности) и привязке к выбранной конкретно НСВЗИ WAKKANAI, в качестве “фона” выбрана медиана $foF2_{medQ}$.

Здесь необходимо указать, что наиболее строгий и надежный способ построения регулярного (“фонового”) поведения $foF2$ в течение суток для спокойной среднеширотной ионосферы (модель Q-F2) в привязке к любой конкретной среднеширотной НСВЗИ для произвольного дня любых месяцев всех сезонов и любых уровней геомагнитной активности подробно описан в работе [Деминов и др., 2009] и реализован для НСВЗИ ИРКУТСК и SLOUGH. Эта модель, совместно с моделью IRI, позволяет также учесть наблюдаемые сильные возмущения $foF2$ спокойной среднеширотной ионосферы, не связанные с геомагнитной активностью – так называемые Q-возмущения (см. работы [Mikhailov et al., 2004, 2007a, b]). Детальное и подробное описание изменчивости параметров максимума F2-слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности дано в работах [Деминов и др., 2011a] (анализ статистических свойств изменчивости $foF2$ и $hmF2$ спокойной ионосферы при низкой солнечной активности для дневных (10–15 LT) и ночных (22–03 LT) часов) и [Деминов и др., 2011b] (анализ причин сильных и очень сильных изменений $foF2$ спокойной ионосферы ото дня ко дню на конкретных примерах).

Проявления ионосферной бури (т.е. ее количественные характеристики, наблюдаемые на конкретной НСВЗИ) могут быть сильно различающимися для одной и той же ионосферной бури в зависимости от географических и геомагнитных координат, местного времени начала геомагнитной бури и других факторов. При этом, с точки зрения поиска ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) (см. монографии [Липеровский и др., 1992; Pulinets and Boyarchuk, 2004; Pulinets and Ouzounov, 2019] и ссылки в них), (ИБ/ИСБ),

связанные с (ГБ/ГСБ), являются важным фактором, который сильно ограничивает и затрудняет идентификацию возмущений ионосферы, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ) как возможных истинных ИПЗ. Поэтому анализ ВИПЗ на их принадлежность к ИПЗ часто приходится проводить при довольно жестких ограничениях на уровень геомагнитной активности, чтобы избежать возможного одновременного наложения эффектов от литосферных и солнечно-магнитосферных источников. Это, в свою очередь, резко уменьшает массив землетрясений, которые можно исследовать на предмет наличия перед ними ИПЗ. Для расширения возможностей изучения сейсмоионосферных эффектов, весьма желательно количественно оценить величину и временной ход ионосферных возмущений (ИВ) в конкретном выбранном сейсмоактивном регионе, возникающих в период развития геомагнитных возмущений (ГВ). Под геомагнитными возмущениями мы будем понимать такие проявления геомагнитной активности, когда ее интенсивность не превышает порогового уровня, характерного для слабых геомагнитных бурь (СлГБ), но превосходит “спокойный” геомагнитный фон (*здесь и далее термин “геомагнитные возмущения” (ГВ) используется для краткости и подчеркивает существенно меньшую интенсивность соответствующих индексов магнитной активности для таких периодов по сравнению с наблюдаемыми во время ГБ. Строго говоря, ГВ также является геомагнитным возмущением*). В частности, такой анализ (не связанный с изучением сейсмоионосферных эффектов) проявлений авроральной (суббуревой) активности в ионосфере средних широт, которые были обусловлены прохождением перемещающихся атмосферных возмущений (traveling atmospheric disturbances, TAD’s), выполнен в работе [Mikhailov and Perrone, 2009]. Такие же исследования в “привязке” к НСВЗИ, расположенной в подходящем месте, могут быть ценным подспорьем при поиске ИПЗ с точки зрения “отсева” ложных ИПЗ. Конкретный пример сопоставления ИВ, обусловленного небольшим ростом геомагнитной активности с другим ИВ, имеющим, по-видимому, сейсмогенную природу, приведен в работе [Легенька и др., 2016]. В этом исследовании по данным НСВЗИ WAKKANAI было выделено два ИВ перед сильным землетрясением с магнитудой $M = 6.8$, которое произошло в регионе Японии вблизи о-ва Хоккайдо 11.09.2008 г. Одно из ИВ наблюдалось примерно за сутки до подземного толчка и было связано с незначительным ростом планетарной геомагнитной активности (последовало сразу за повышением значений планетарного Kp -индекса до уровня 3), а другое проявилось за ~ 0.5 сут до землетрясения на очень спокойном геомагнитном фоне ($Kp \leq 1_0$) и явилось его вероятным ионосферным предвестником (ИПЗ).

Ясно, что важнейшую роль в оценке интенсивности ионосферной бури/ионосферного возмущения, обусловленного конкретной/ым геомагнитной бурей/геомагнитным возмущением, в терминах $foF2$ играет способ задания ее фоновых значений и соответствующих им уровней геомагнитной активности, определяемых в соответствии с индексами геомагнитной активности (Dst , Kp и AE). Поэтому становится необходимым достаточно точно количественно определить понятие “геомагнитно-спокойные условия”, исходя из имеющихся на данный момент наиболее подходящих классификаций.

Количественная классификация геомагнитных бурь по Dst -индексу (с учетом соответствующих ему индексов Kp и AE) на основе обработки данных методом наложения “эпох” (описание метода наложения “эпох” применительно к геофизическим данным см., например, в монографии [Дорман, 1972], а применительно к морфологическим исследованиям ИБ, обусловленными соответствующими ГБ, в статье [Matsushita, 1959]) была предложена в работе [Loewe and Prölss, 1997], в которой было обработано более 1000 магнитных бурь различной силы, произошедших в интервале с 1957 г. по 1993 г. Отсчетной точкой при этом был выбран момент (общий для всех “эпох”) достижения Dst -индексом своего экстремального отрицательного значения для каждой индивидуальной ГБ. Далее в нашей работе мы, в качестве основы, будем использовать именно эту классификацию, дополнив ее классом геомагнитных возмущений (ГВ), который занимает промежуточное место между спокойным геомагнитным фоном и слабыми геомагнитными бурями (СлГБ), при этом необходимые количественные характеристики будут определены в следующем разделе конкретно.

Таким образом, сопоставительный анализ методом наложения “эпох” амплитуд относительных возмущений $foF2$ ($\delta foF2$) в ионосфере, возникающих в результате развития геомагнитных бурь (ГБ) и, в основном, геомагнитных возмущений (ГВ) по данным среднеширотной НСВЗИ WAKKANAI (Япония, географические координаты $\varphi = 45.2^\circ$ N, $\lambda = 141.8^\circ$ E), расположенной в сейсмоактивном регионе, в зимние периоды и низкой активности Солнца является целью проведенного ниже исследования.

Здесь необходимо оговорить, что применяемая далее методика использует подход, развитый ранее в оригинальной работе [Matsushita, 1959], посвященной морфологическому изучению ионосферных бурь (ИБ), вызванных магнитными бурями. Однако, наша работа не включает в себя исследование зависимости ионосферных эффектов от времени начала ГБ или ГВ по местному времени (LT), которые полностью усредняются.

Как показано в работе [Matsushita, 1959], ионосферные эффекты, вызываемые слабыми ГБ с внезапным началом (sudden commencements, SC и которые будут умеренными (УГБ) по классификации [Loewe and Prölss, 1997], приведенной далее) и обусловленные местным временем начала ГБ в зоне номер 5, к которой отнесена НСВЗИ WAKKANAI, дают вклад в вариацию $\delta foF2$, максимальная величина которого будет менее 4% (см. Fig. 5 статьи [Matsushita, 1959], с учетом того, что $2\delta foF2 = \delta NmF2$). При этом слабые бури (на ранг ниже) по классификации [Loewe and Prölss, 1997] (СлГБ) и еще менее интенсивные ГВ (по введенной нами ниже расширенной шкале) в этой работе не рассматривались.

2. ОТБОР ДАННЫХ И ПАРАМЕТРЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ/ВОЗМУЩЕНИЙ

Из работ [Rishbeth and Mendillo, 2001; Обридко и др., 2013; Kim and Hegai, 2016] следует, с одной стороны, что минимальные уровни геомагнитной активности наблюдаются в зимние месяцы (декабрь, январь), при этом минимум приходится на декабрь месяц. Это означает, что именно в эти месяцы ионосфера наиболее близка к своему спокойному “фоновому” состоянию. С другой стороны, геомагнитная активность также, в целом, хорошо коррелирует с солнечной активностью (см. статью [Обридко и др., 2013]). Таким образом, в зимние месяцы (декабрь и январь) в годы низкой солнечной активности должно наблюдаться наибольшее число геомагнитно-спокойных дней, по которым можно будет рассчитывать “фоновые” характеристики ионосферы (в нашем случае $foF2_{medQ}$).

Следуя монографии [Фаткуллин и др., 1981], определим уровень солнечной активности как низкий, когда среднемесячный поток солнечного излучения на длине волны 10.7 см ($F10.7$) удовлетворяет условию $F10.7 \leq 100$ SFU (solar flux units, $1\text{SFU} = 10^{-22}$ Вт м⁻² Гц⁻¹).

Далее, согласно классификации, данной в работе [Loewe and Prölss, 1997]:

I – для слабых геомагнитных бурь (СлГБ) $Dst_{min} \in [-50; -30]$ нТл;

II – для умеренных геомагнитных бурь (УГБ) $Dst_{min} \in [-100; -50]$ нТл;

III – для сильных геомагнитных бурь (СГБ) $Dst_{min} \in [-200; -100]$ нТл;

IV – для очень сильных геомагнитных бурь (ОСГБ) $Dst_{min} \in [-350; -200]$ нТл;

V – для экстремальных геомагнитных бурь (ЭГБ) $Dst_{min} < -350$ нТл.

В эту классификацию не были включены геомагнитные возмущения (ГВ), которые могут быть важны в определенных случаях (например, при

Таблица 1. Распределение рассмотренных ГБ или ГВ по годам и месяцам

Годы	1965	1966	1973	1984	1985	1986	1987	1996
Январь	—	1	—	5	—	2	5	—
Декабрь	5	—	1	—	6	4	5	8
Годы	1997	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Январь	3	1	2	—	2	2	1	3
Декабрь	—	2	—	2	2	1	—	—

изучении тропосферных и литосферных источников ионосферных возмущений), и влияние которых на ионосферу в достаточно узком диапазоне геофизических условий (зима, низкая солнечная активность, привязка к одной конкретной НСВЗИ WAKKANAI) будет исследовано в настоящей работе. Ниже мы будем полагать, что диапазон Dst_{\min} для ГВ определен интервалом $[-30; -10)$ нТл, при условии, что $Kp \geq 3_-$ в момент начала развития ГВ. Спокойный геомагнитный фон отвечает условию, когда величина планетарного Kp -индекса не превосходит значения 2_+ и

при этом $Dst_{\min} \geq -20$ нТл. Таким образом, в геомагнитно-спокойный день (quiet, Q) $Kp \in [0; 2_+]$ во все трехчасовые интервалы суток.

В соответствии с этими критериями на интервале с 1965 г. по 2011 г. были отобраны январь и декабрь месяцы (всего 21 мес.) нужных годов, в которые и проводилось сравнение ионосферных эффектов геомагнитных бурь и геомагнитных возмущений на высотах $F2$ -слоя ионосферы. Ниже в табл. 1 числа указывают количество рассмотренных индивидуальных событий (ГБ или ГВ) в соответствующих месяцах выбранных годов (всего 63 случая).

Сразу следует отметить, что в выбранных месяцах не наблюдалось ГБ классов IV, V и произошло всего 2 ГБ класса III, что также свидетельствует в пользу правильности выбора для рассмотрения указанных максимально геомагнитно-спокойных периодов. Соответственно, в последующий анализ было включено 15 УГБ (класс II), 14 СлГБ (класс I) и 34 ГВ.

3. ФОНОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СПОСОБ ОБРАБОТКИ ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ ГБ/ГВ

Задание фоновых распределений в настоящей работе (медианных суточных ходов $foF2_{\text{med}}$) для получения текущих относительных вариаций $\delta foF2$, помимо описанных выше в разделе 2 критериев низкой солнечной и геомагнитной активностей, учитывает также еще два аспекта — однородность медианных значений в пределах сезона и задание медианного фона по геомагнитно-спокойным дням соответствующего месяца ($foF2_{\text{medQ}}$), как они определены в разделе 2.

На рисунке 1, в качестве иллюстрации, приведено сравнение месячных медиан $foF2_{\text{med}}$ для декабря 2007 г. (сплошная линия), января 2008 г. (штриховая линия) и февраля 2008 г. (штрихпунктирная линия). Хорошо видно, что медианы декабря 2007 г. и января 2008 г. близки друг к другу во всем суточном диапазоне времени, тогда как февральская медиана, будучи им подобной, проходит систематически всюду выше (в среднем на 12%), начиная с 04:00 UT. Сходная картина наблюдается и для других смежных годов, свидетельствуя о переходе к весеннему сезону, кроме этого в феврале в среднем возрастает и геомагнитная активность [Kim and Hegai, 2016]. В целях повышения однородности исходных данных февральские месяцы зимних сезонов не рассматривались.

Рисунок 2 отображает соотношение между суточной медианой по спокойным дням месяца (штрихпунктирная линия) и месячной медианой (сплошная линия), усредненными за 21 мес. Видно, что наблюдаемое различие невелико и макси-

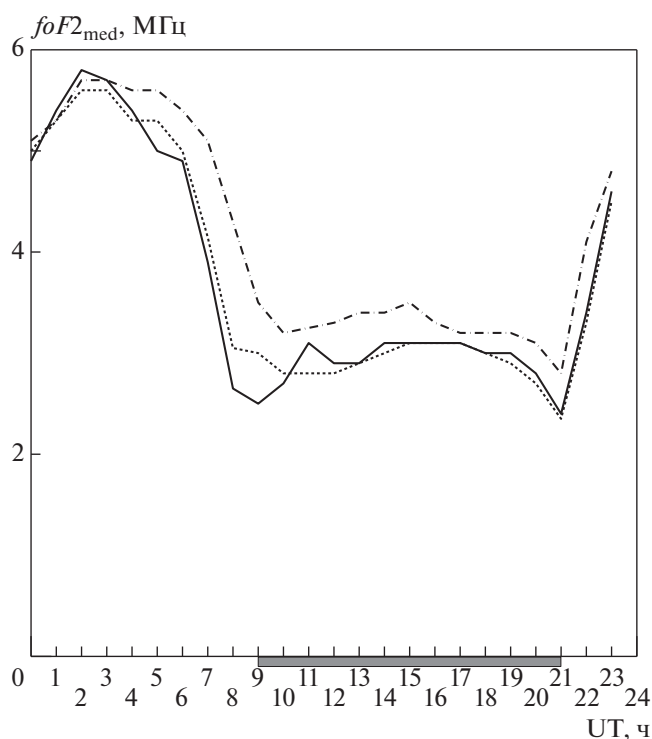


Рис. 1. Сравнение суточных вариаций месячных медиан $foF2_{\text{med}}$ по данным НСВЗИ WAKKANAI для трех месяцев зимнего сезона: декабрь 2007 г. — сплошная линия, январь 2008 г. — штриховая линия, февраль 2008 — штрихпунктирная линия. Затемненный прямоугольник под осью абсцисс отмечает интервал с 18:00 до 06:00 ч по местному (LT) времени.

мальное различие составляет $\sim 5\%$, при этом средняя месячная медиана почти всюду лежит немного выше средней суточной медианы по спокойным дням месяца. Здесь вновь отметим, что в дальнейшем нами в качестве фонового (реперного) суточного распределения критической частоты регулярного $F2$ -слоя ионосферы всегда используется именно суточная медиана по спокойным дням соответствующего месяца $foF2_{medQ}$, как это было уже указано выше. Число таких геомагнитно-спокойных дней в пределах месяца (когда $Kp \in [0; 2_+]$ во все трехчасовые интервалы суток) колебалось от 6 до 21 и составляло 12 дней в среднем.

Первичная обработка ионосферных данных для индивидуальных событий (ГБ или ГВ) проводилась следующим образом. Сначала выбирался непрерывный четырехсуточный интервал, первые сутки которого обязательно включали в себя начало развития ГБ или ГВ по индексам Dst , Kp и AE . Затем на нем выстраивались вариации $\delta foF2$, в соответствии с формулой (1). Пример такой первичной обработки ионосферных данных для СлГБ в интервале с 06.01.2011 г. по 09.01.2011 г. приведен на рис. 3, где ежечасные ионосферные данные сглажены по трем точкам.

Полученные таким образом четырехсуточные “отрезки” вариаций $\delta foF2$ были затем распределены по группам УГБ (15 случаев–“эпох”), СлГБ (14 случаев–“эпох”) и, наконец, ГВ (34 случая–“эпохи”), которые далее использовались для наложения друг на друга с определением момента начала “эпохи” как нулевого часа первых суток, в которых начинает развиваться ГБ/ГВ, и/или часа, соответствующего максимальному отрицательному экстремуму индекса Dst .

Таким образом, в отличие от интервала, взятого в работе [Matsushita, 1959] (от -6 ч до 71 ч с началом “эпохи” (0 ч) в момент SC (sudden commencement) с “шагом” в один час), мы используем либо более широкий четырехсуточный интервал $[0, 95]$ ч с началом “эпохи” в 0 ч первого дня, когда начинает развиваться ГБ/ГВ, либо интервал от -6 ч до 95 ч с началом “эпохи” (0 ч) в момент максимального отрицательного экстремума Dst -индекса. Такую модификацию методики работы [Matsushita, 1959] следует принять потому, что мы рассматриваем также и ГБ без SC, и тем более ГВ, часто развивающиеся очень постепенно. Основной вопрос, который необходимо выяснить на предварительном этапе изучения ионосферных эффектов ГБ/ГВ сравнительно малой интенсивности состоит в том, будут ли выделяться (и накапливаться!) существенные систематические отклонения в ионосфере и их знак в зависимости от выбранного момента начала “эпохи”. Ниже приведены полученные описанным выше образом результаты.

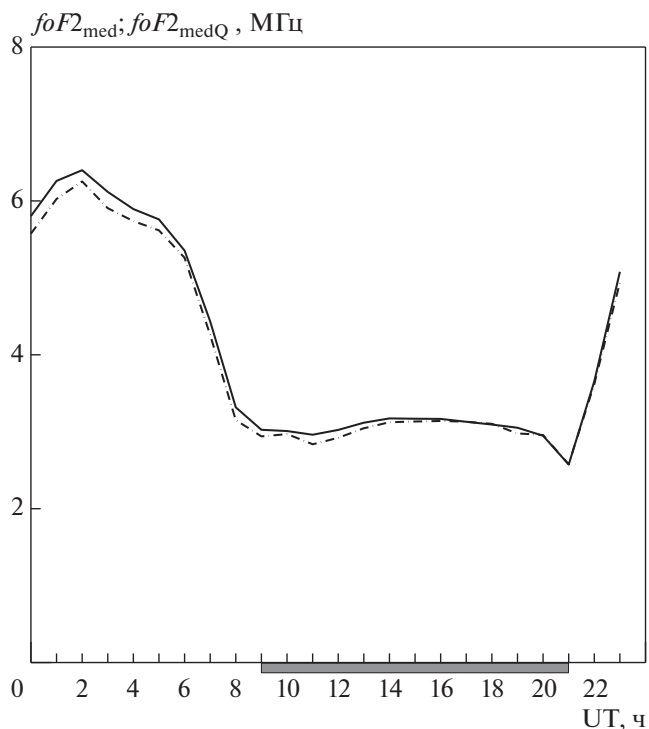


Рис. 2. Сравнение месячной медианы ($foF2_{med}$, сплошная линия) с медианой, рассчитанной по спокойным дням соответствующих месяцев ($foF2_{medQ}$, штрихпунктирная линия), усредненными за 21 мес. Затемненный прямоугольник под осью абсцисс отмечает интервал с 18:00 до 06:00 ч по местному (LT) времени.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 4 представлены результаты обработки ежечасных измерений на НСВЗИ WAKKANAI критической частоты регулярного $F2$ -слоя ионосферы (временные вариации $\delta foF2$) в выбранные периоды времени (см. раздел 2) для группы из 34 ГВ, полученные методом “наложения эпох”.

На панели (a) сплошной линией представлена средняя кривая $\delta foF2$ для 34 индивидуальных событий, когда началом “эпохи” является нулевой час первых суток, захватывающих начало развития ГВ. Штрихпунктирной линией представлен фон, который был получен следующим образом: из 21 рассмотренных месяцев было выбрано 15 месяцев, в каждом из которых наблюдалось 4 геомагнитно-спокойных дня подряд и временные вариации $\delta foF2$ на этих отрезках составили 15 “эпох”, в результате наложения и усреднения которых и была получена средняя фоновая кривая. Штриховые горизонтальные линии отмечают абсолютную величину в два стандартных отклонения ($2\sigma \cong 6\%$), которое было вычислено на четырехсуточном интервале для фоновой кривой. Видно, что положительные отклонения система-

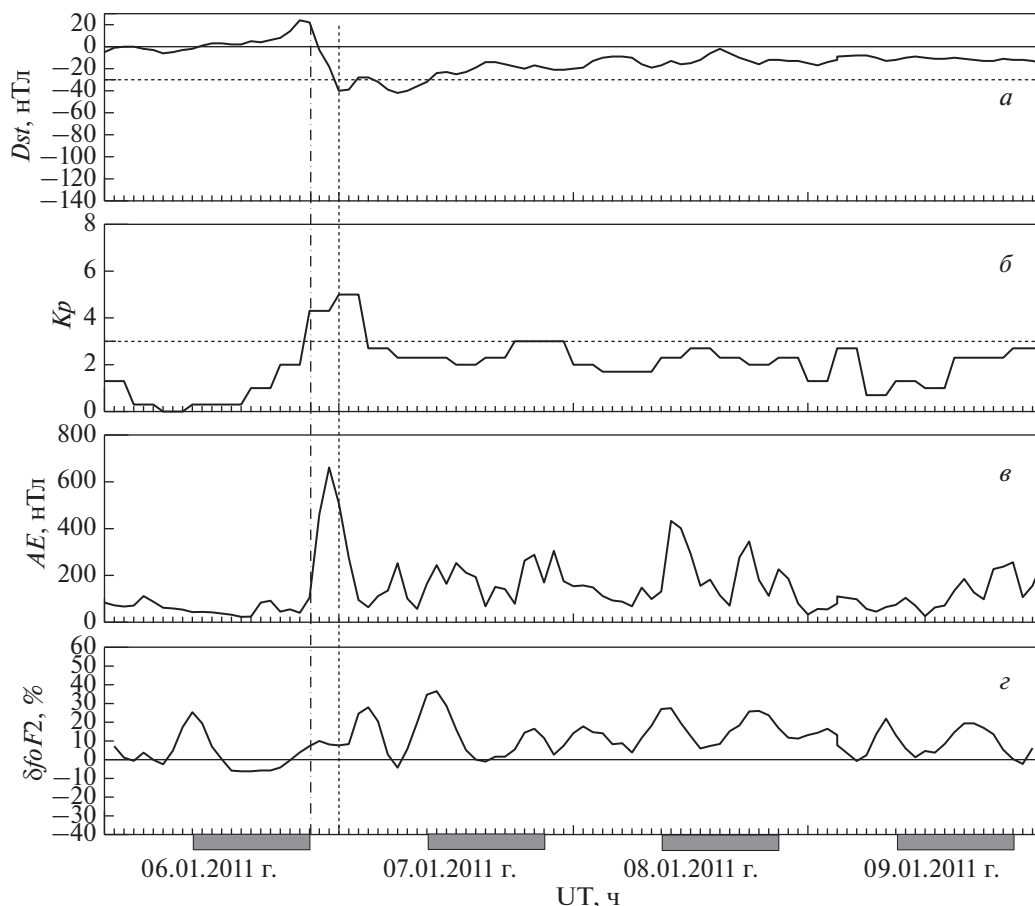


Рис. 3. Пример первичной обработки исходных ионосферных данных для СлГБ 06–09 января 2011 г. На панелях рисунка (а) и (в) показаны соответственно суточные часовые изменения индексов Dst и AE , на панели (б) – вариации трехчасового индекса Kp , а на нижней панели (г) приведены отклонения $\delta foF2$. Затемненные прямоугольники под осью абсцисс соответствуют неосвещенным часам по местному времени. Вертикальная штрихпунктирная линия соответствует началу развития СлГБ (момент начала одновременного роста AE - и Kp -индексов), а вертикальная штриховая линия – экстремуму Dst_{min} .

тически превышают верхнюю границу фона ($\cong 6\%$) в течение ~ 19 ч (этот участок кривой затемнен), начиная с 7 ч вторых суток, при этом максимальное отклонение составляет $\sim 14\%$ вблизи 14 ч вторых суток.

Панель (б) устроена аналогично панели (а), однако здесь в качестве момента начала “эпохи” выбран не нулевой час первых суток, захватывающих начало развития ГВ, а час (отмечен вертикальной штриховой линией), который соответствует моменту времени экстремума Dst_{min} . Далее будем называть представленные таким образом изменения $\delta foF2$ с течением времени, полученные методом наложения “эпох”, Dst -вариацией $\delta foF2$ (см. также монографию [Ришбет и Гарриот, 1975]). Границы фона взяты теми же, что и на панели (а).

Здесь систематическое превышение верхней границы фона Dst -вариацией $\delta foF2$ (затемнено) наблюдается также через 7 ч от начала “эпохи” и

длится ~ 18 ч. Максимальное отклонение составляет $\sim 13\%$ и соответствует ~ 11 ч на оси времени. Хорошо видно, что на всем протяжении четырехсуточного интервала от начала “эпохи” Dst -вариация $\delta foF2$, построенная для выделенной группы ГВ из 34 событий, положительна. Более того, превышение верхней границы изменений $\delta foF2$, принятых в качестве фона, наблюдается исключительно в первые сутки от начала “эпохи”. Далее $\delta foF2$ ведет себя примерно одинаково в течение двух последующих суток и колеблется от нуля до верхней границы фона, а на четвертые сутки, оставаясь положительной, не выходит за границы одного стандартного отклонения (σ).

На рисунке 5 приведено сравнение Dst -вариаций $\delta foF2$, полученных методом наложения “эпох” в привязке к моменту времени экстремума Dst_{min} , для УГБ (панель (а), 15 индивидуальных событий), СлГБ (панель (б), 14 индивидуальных событий) и ГВ (панель (в), 34 индивидуальных

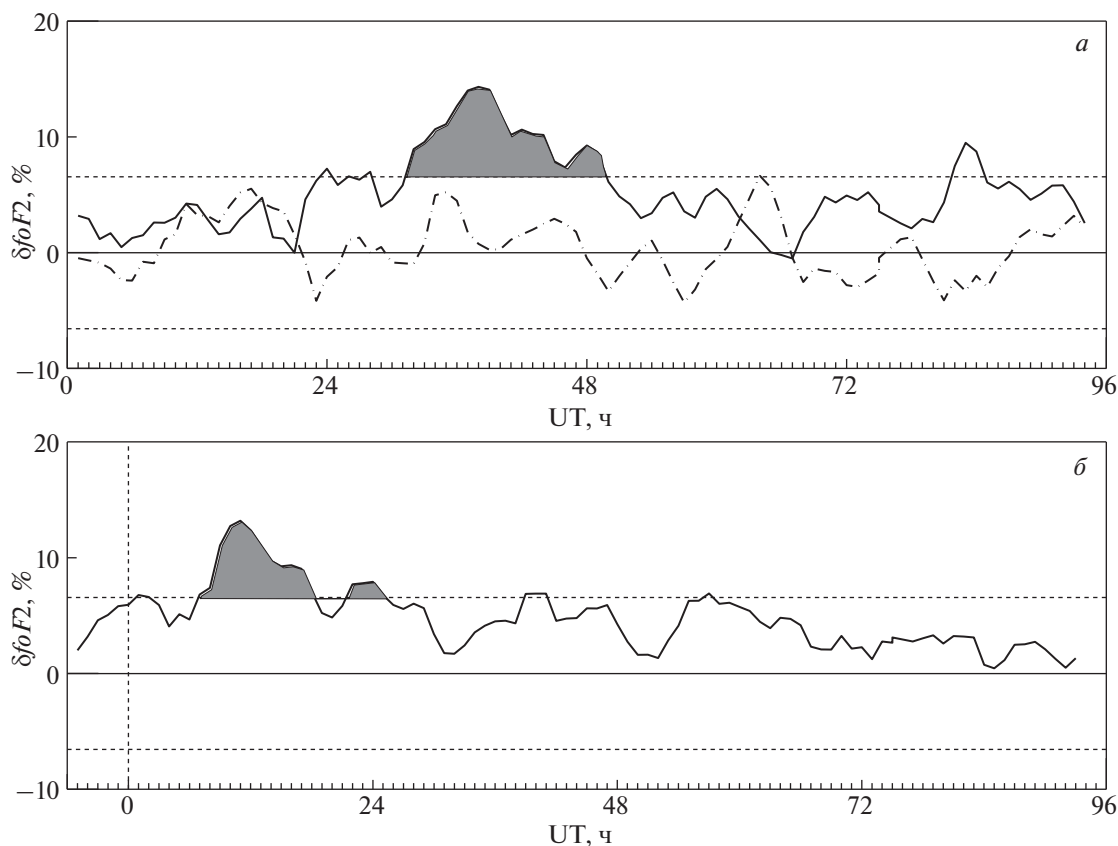


Рис. 4. Временные вариации $\delta foF2$ для группы из 34 ГВ, полученные методом наложения “эпох”. На панели (а) сплошной линией представлена средняя кривая $\delta foF2$ для 34 индивидуальных событий, когда началом “эпохи” является нулевой час первых суток, захватывающих начало развития ГВ. Штрихпунктирной линией представлен фон. Штриховые горизонтальные линии отмечают абсолютную величину в два стандартных отклонения ($2\sigma \cong 6\%$), которое было вычислено на четырехсуточном интервале для фоновой кривой. Панель (б) аналогична панели (а), однако здесь в качестве момента начала “эпохи” выбран не нулевой час первых суток, захватывающих начало развития ГВ, а час (отмечен вертикальной штриховой линией), который отвечает моменту времени экстремума Dst_{\min} и относительно которого построены усредненные по ансамблю из 34 событий вариации $\delta foF2$, границы фона взяты теми же, что и на панели (а). Участки кривых на обеих панелях, на которых они систематически превышают верхнюю границу фона, затемнены.

события). Штрихпунктирные горизонтальные линии, как и прежде, отмечают границы фона, а все обозначения соответствуют своим аналогам рис. 4, панели (б). Отрицательные значения Dst -вариации $\delta foF2$ для УГБ в течение третьих суток от начала “эпохи” на панели (а) затемнены.

Основное различие в поведении Dst -вариаций $\delta foF2$ между УГБ и СлГБ/ГВ отчетливо проявляется в том, что для УГБ на третьи сутки после начала “эпохи” Dst -вариация $\delta foF2$ становится отрицательной, тогда как для СлГБ/ГВ она остается положительной. Полученные выше количественные характеристики по Dst -вариациям $\delta foF2$ для УГБ удовлетворительно согласуются с результатами, приведенными в статье [Matsushita, 1959] для слабых бурь (“weak storm”) по принятой в ней классификации. Менее интенсивные ГВ/ГБ, как это указано ранее, в этой работе не рассматривались.

Наличие отрицательной фазы в случае достаточно интенсивной ионосферной бури, обусловленной соответствующей ГВ, на средних широтах обычно связывают, в основном, с изменениями температуры, состава и плотности термосферы (см., например, публикацию [Mikhailov, 2000]). Максимальное положительное отклонение Dst -вариаций $\delta foF2$ как для УГБ, так и для СлГБ составляет $\sim 17\%$ и достигается в первые сутки после начала “эпохи”. Согласно классификации, данной в энциклопедической статье [Михайлов, 2009], ионосферные возмущения, соответствующие Dst -вариации $\delta foF2$ для УГБ, относятся к возмущениям второго типа, т. е. более коротким, но имеющим большую амплитуду, а ИВ, связанные со СлГБ и ГВ, подпадают под описание возмущений первого типа, когда по завершении активной фазы увеличенные возмущения $foF2$ сохраняются в течение многих часов, и возмущение повторяется через 24 ч, но с меньшей амплитудой. При этом

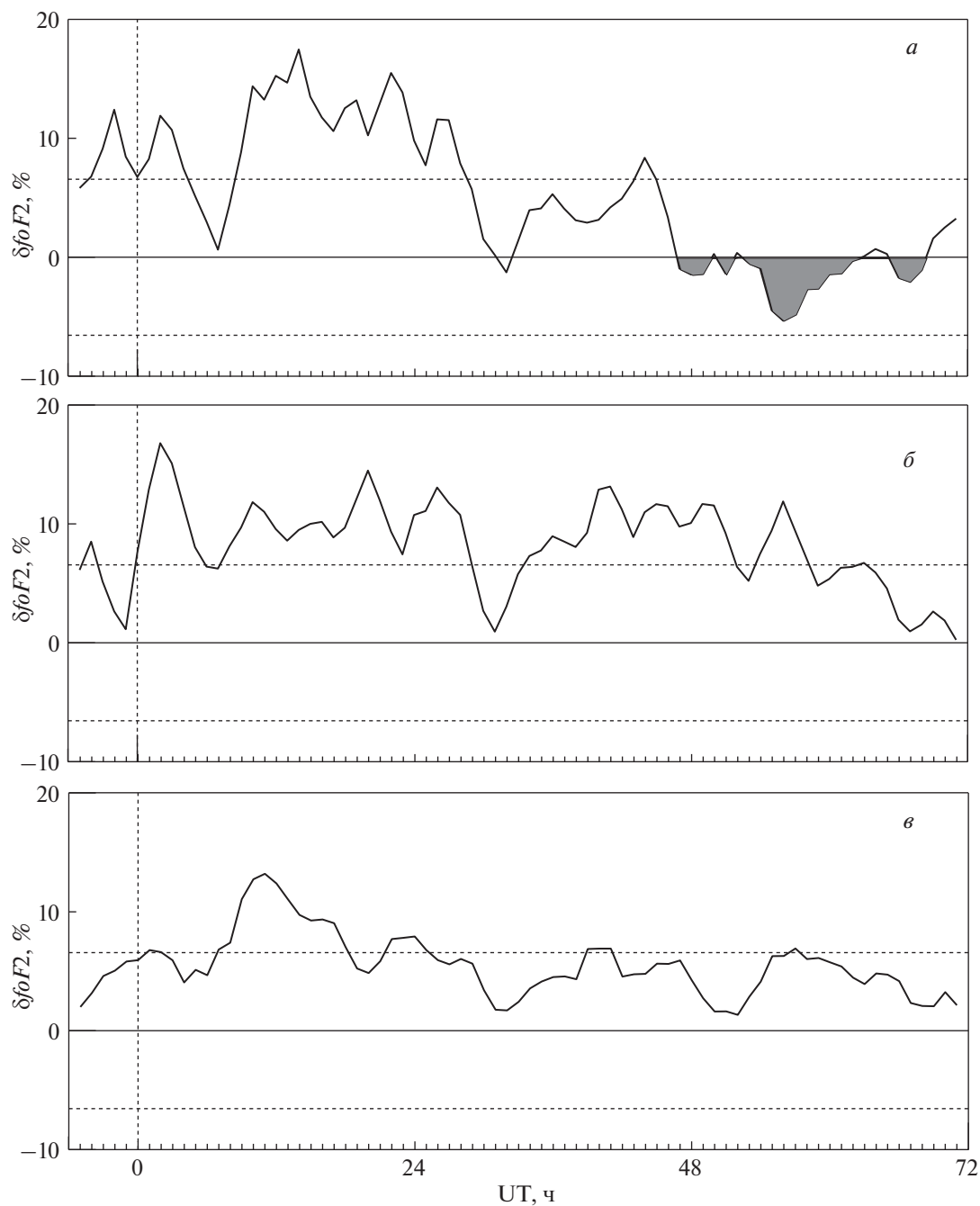


Рис. 5. Dst -вариации $\delta foF2$, полученные методом наложения “эпох” в привязке к моменту времени экстремума Dst_{\min} для УГБ (а), СлГБ (б) и ГВ (е). Штрихпунктирные горизонтальные линии отмечают границы фона, все другие обозначения соответствуют своим аналогам рис. 4, панели (б). Отрицательные значения Dst -вариации $\delta foF2$ для УГБ в течение третьих суток от начала “эпохи” на панели (а) затемнены.

в образовании возмущений обоих типов оказываются задействованы, в основном, два физических механизма — увеличение концентрации атомарного кислорода и изменение вертикальной скорости дрейфа плазмы под влиянием возмущений скорости фонового меридионального нейтрального ветра, обусловленных пакетами крупномасштабных акустико-гравитационных волн, гене-

рируемых в авроральной зоне и приходящих в средние широты.

Приведенный ниже рис. 6 на примере конкретной слабой геомагнитной бури (СлГБ) иллюстрирует соответствие “шаблона” (толстая штриховая линия), полученного нами методом наложения “эпох”, наблюдаемой Dst -вариации $\delta foF2$

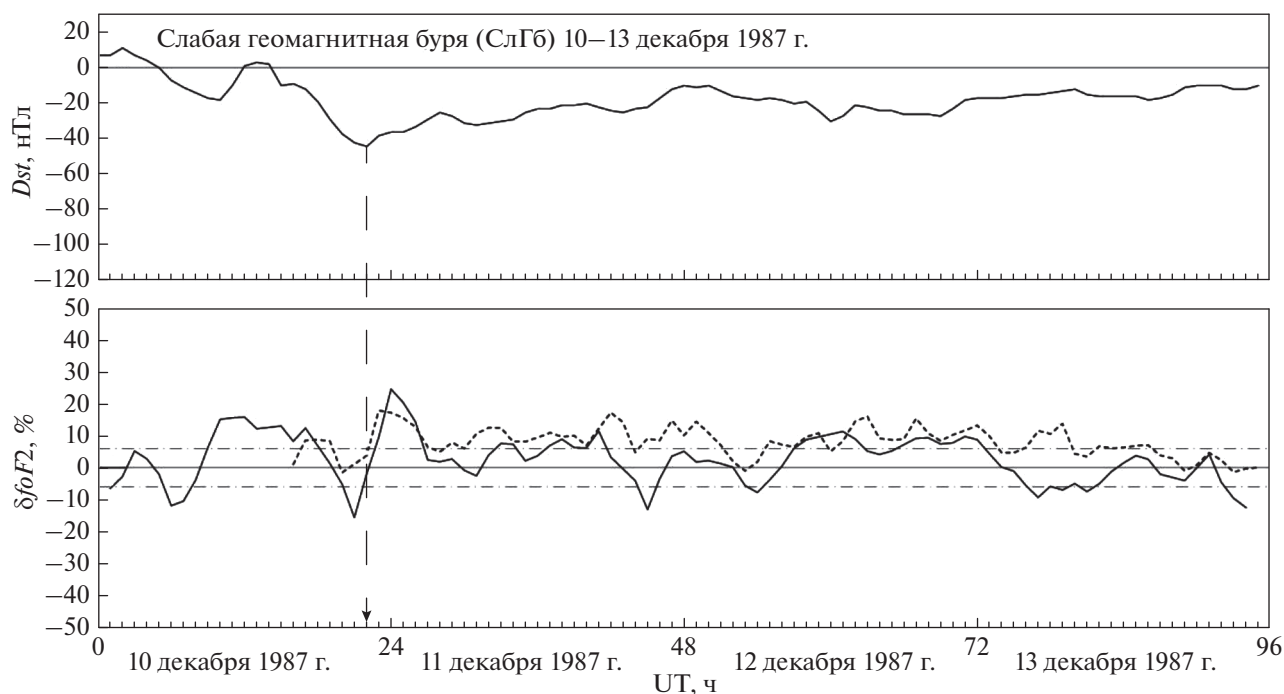


Рис. 6. Верхняя панель: поведение D_{st} -индекса для СлГБ 10–13 декабря 1987 г. (сплошная линия). Нижняя панель: текущая D_{st} -вариация $\delta foF2$ (сплошная линия) и “шаблон” D_{st} -вариации $\delta foF2$ (толстая штриховая линия), полученный методом наложения “эпох”. Штрихпунктирными линиями показана “полоса” разброса для спокойного геомагнитного фона, показанного ранее на рис. 4а, а вертикальная штриховая линия со стрелкой отмечает момент отрицательного экстремума D_{st} -индекса.

для конкретно заданной СлГБ 10–13 декабря 1987 г. (сплошная линия). Штрихпунктирными линиями показана “полоса” разброса для спокойного геомагнитного фона, показанного ранее на рис. 4а, а вертикальная штриховая линия со стрелкой отмечает момент отрицательного экстремума D_{st} -индекса. Хорошо прослеживается подобие “шаблона” и конкретной D_{st} -вариации $\delta foF2$, особенно в первые 20 ч от начала “эпохи”.

В полученной в настоящем исследовании морфологической картине ИВ (которая согласуется с имеющимися общими представлениями об их природе, см. работы [Михайлов, 2009; Деминов, 2015]) основной акцент сделан на ИВ, наблюдающихся в период существования ГВ (т. е. относительно слабых возмущений геомагнитного поля) с целью определения их количественных характеристик в привязке к конкретным гелио-геофизическим условиям (зима, низкая солнечная активность) и местоположению НСВЗИ WAKKANAI, в окрестности которой достаточно часто случаются сильные землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$. Это позволит в будущем увеличить надежность идентификации при выявлении возможных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) по ее ионосферным данным при анализе возмущений ионосферы, предшествующих землетрясениям (ВИПЗ), когда станция входит в зону подго-

товки подходящего землетрясения в периоды повышенной геомагнитной активности.

Действительно, во-первых, если при анализе ВИПЗ на НСВЗИ WAKKANAI будет обнаружено отрицательное возмущение на фоне развития ГВ в период подготовки соответствующего землетрясения, то это будет свидетельствовать в пользу того, что наблюдаемое возмущение имеет, скорее всего, сейсмогенную природу. Во-вторых, в случае обнаружения положительного возмущения, нами определена приблизительно верхняя граница того вклада, который может внести в соответствующий период усиление геомагнитной активности. Результаты обработки нашего (достаточно ограниченного) массива данных дают оценку максимальной величины такого вклада в $\delta foF2$ в зимние периоды (декабрь и январь месяцы) и при низкой активности Солнца $\sim 14\%$ для ГВ и $\sim 17\%$ для УГБ/СлГБ. Таким образом, можно будет проводить отсеивание ложных ИПЗ (даже если нет возможности выбрать подходящую контрольную НСВЗИ) на основе полученных оценок.

5. ВЫВОДЫ

1. На основе метода наложения “эпох” выполнен сопоставительный анализ данных измерений критической частоты регулярного $F2$ -слоя ионо-

сферы (f_oF_2), проведенных на среднеширотной наземной станции вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ) WAKKANAI в зимние периоды (декабрь и январь) при низкой активности Солнца и определены количественные характеристики ионосферных возмущений в ионосфере (ИВ), возникающих в результате развития умеренных и слабых геомагнитных бурь (УГБ и СлГБ), а также геомагнитных возмущений (ГВ).

2. Установлено, что в указанном узком диапазоне гелиогеофизических условий для НСВЗИ WAKKANAI слабые геомагнитные бури (СлГБ) и геомагнитные возмущения (ГВ) на интервале от начала “эпохи” (по моменту основного минимума в Dst -индексе) до трех суток систематически приводят только к положительным отклонениям f_oF_2 . При этом максимальные относительные отклонения от фона (δf_oF_2) составляют $\sim 17\%$ и $\sim 14\%$ соответственно. Для ГВ наиболее существенная реакция ионосферы наблюдается примерно через 7 ч от начала “эпохи”. Для умеренных геомагнитных бурь (УГБ), количественные характеристики связанных с ними положительных возмущений δf_oF_2 ионосферы близки к наблюдающимся в течение СлГБ (максимальные относительные отклонения $\sim 17\%$), однако на трети суток после начала “эпохи” отчетливо проявляются и отрицательные относительные отклонения δf_oF_2 в пределах до 5%.

3. Полученные количественные характеристики могут быть использованы для отсева ложных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) при анализе ВИПЗ на НСВЗИ WAKKANAI, расположенной в сейсмоактивной области в регионе Японии, в периоды повышенной геомагнитной активности, когда интенсивность ее колеблется от уровня геомагнитных возмущений (ГВ) до уровня умеренных геомагнитных бурь (УГБ).

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA [NASA/GSFC's Space Physics Data Facility's OMNIWeb service], геофизические данные которого были использованы в данной работе, а также National Institute of Information and Communications Technology (NICT, Japan) и World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (Japan) за предоставление доступа к ионосферным и магнитным данным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Демин М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F_2 -слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 393–399. 2009.

– Демин М.Г., Демин М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М. Изменчивость параметров максимума F_2 -слоя спокойной среднеширотной ионосферы при

низкой солнечной активности: 1. Статистические свойства // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 3. С. 352–359. 2011а.

– Демин М.Г., Демин М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Полех Н.М. Изменчивость параметров максимума F_2 -слоя спокойной среднеширотной ионосферы при низкой солнечной активности: 2. Сильные флуктуации критической частоты // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 3. С. 360–367. 2011б.

– Демин М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы / Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Ред. В.Д. Кузнецов. М.: ИЗМИРАН, С. 295–346. 2015.

– Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 210 с. 1972.

– Легенька А.Д., Хегай В.В., Ким В.П. Возмущения критической частоты F_2 -слоя перед землетрясением в Японии в районе острова Хоккайдо 11.09.2008 г. и в период умеренной магнитной бури по данным станций наземного вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 3. С. 353–364. 2016.

<https://doi.org/10.7868/S0016794016030123>

– Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 303 с. 1992.

– Михайлов А.В. Ионосферные возмущения и их прогнозирование / “Энциклопедия низкотемпературной плазмы”. Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Том 1–3. Ионосферная плазма. Ч. 2. Отв. ред. В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин. М: ЯНУС-К, С. 182–214. 2009.

– Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Солнечная активность и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 2. С. 157–166. 2013.

<https://doi.org/10.7868/S0016794013010148>

– Ришбет Г., Гарриот О.К. Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 304 с. 1975.

– Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К., Легенька А.Д., Соболева Т.Н. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. М.: Наука, 256 с. 1981.

– Danilov A.D., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // International J. Geomagn. Aeron. V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.

– Kim V.P., Hegai V.V. On the variability of the ionospheric F_2 -layer during the quietest days in December 2009 // J. Astron. Space Sci. V. 33. № 4. P. 273–278. 2016. <http://dx.doi.org/10.5140JASS.2016.33.4.273>

– Loewe C.A., Prölss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 102. № 7. P. 14209–14213. 1997.

– Matsushita A. A Study of morphology ionospheric storms // J. Geophys. Res. V. 4. № 3. P. 305–321. 1959.

– Mikhailov A.V. Ionospheric F_2 -layer storms // Fisica de la Tierra. V. 12. P. 223–262. 2000.

– Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F_2 -layer disturbances: High to lower latitudes // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 5. G11006. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003GI000058>

– Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H. Synchronous NmF_2 and NmE daytime variations as a key to the mecha-

- nism of quiet-time F_2 -layer disturbances // *Ann. Geophysicae*. V. 25. N 2. P. 483–493. 2007a.
- *Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H.* Daytime F_2 -layer negative storm effect: what is the difference between storm-induced and Q-disturbance events? // *Ann. Geophysicae*. V. 25. № 7. P. 1531–1541. 2007b.
- *Mikhailov A. V., Perrone L.* Pre-storm NmF_2 enhancements at middle latitudes: delusion or reality? // *Ann. Geophysicae*. V. 27. P. 1321–1330. 2009.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1321-2009>
- *Prölss G. W.* Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes // *J. Geophys. Res.* V. 98. № A4. P. 5981–5991. 1993.
<https://doi.org/10.1029/92JA02777>
- *Prölss G.W.* Ionospheric F-region storms / *Handbook of atmospheric electrodynamics*. V. 2. Ed. Volland H. Boca Raton, FL USA: CRC Press. Ch. 8. P. 195–248. 1995.
https://doi.org/10.5636/jgg.43.Supplement1_513
- *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 315 p. 2004.
- *Pulinets S., Ouzounov D.* The possibility of earthquake forecasting: Learning from nature. Bristol, UK: IOP Publishing Ltd. 167 p. 2018.
<https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1248-6>
- *Rishbeth H.* F-region storms and thermospheric dynamics // *J. Geomag. Geoelectr.* V. 43. Suppl. 1. P. 513–524. 1991.
- *Rishbeth H., Mendillo M.* Patterns of F_2 -layer variability // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 63. № 15. P. 1661–1680. 2001.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)