

УДК 550.388.2

ВАРИАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РАДИУСА КОРРЕЛЯЦИИ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНОЙ СУББУРИ

© 2013 г. Д. В. Благовещенский¹, Д. Д. Рогов², Т. Улих³ (Thomas Ulich)

¹ Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

³ Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

e-mail: dvb@aanet.ru

Поступила в редакцию 24.06.2011 г.

После доработки 14.10.2011 г.

Оценено изменение радиуса корреляции ионосферы во время магнитосферной суббури 14.02.2011 г., который на средних широтах принято считать равным 500 км. Для анализа использованы данные вертикального зондирования (ВЗ) обсерваторий Санкт-Петербург и Соданкюля, Финляндия, а также данные наклонного зондирования (НЗ) на радиотрассе Соданкюля–Санкт-Петербург длиной 790 км. Особенность эксперимента состояла в том, что в приемном пункте трассы НЗ Санкт-Петербурге синхронно принимались сигналы передатчика ВЗ обс. Соданкюля. Точка отражения трассы НЗ расположена на расстоянии ~400 км от точки отражения ВЗ. Сопоставлены ионограммы, характерные для точек отражения сигналов ВЗ и НЗ в ионосфере, отстоящих друг от друга на расстояние несколько меньшее, чем радиус корреляции ионосферы 500 км, и данные ионозондов ВЗ Соданкюля и Санкт-Петербург. Показано, что горизонтальный радиус корреляции в 400 км во время магнитного возмущения может рассматриваться как приемлемый только на трех этапах возмущения. Это – начальная фаза, когда еще не началась перестройка ионосферы, взрывная фаза (максимум возмущения), когда отражающим слоем в ионосфере является только спорадический слой *E_s*, и фаза восстановления, когда возмущение уже заканчивается, и ионосфера возвращается к исходному невозмущенному состоянию. На других этапах возмущения радиус корреляции, если он существует, значительно меньше, чем 400 км.

DOI: 10.7868/S001679401302003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что ионосфера и процессы в ней к настоящему времени уже хорошо изучены [Афраймович и Перевалова, 2006; Davis, 1990], существует множество нерешенных вопросов, которые еще надлежит прояснить и исследовать подробно. Например, это некоторые следующие задачи, которые сформулировал Н. Rishbeth [Special meeting, 2010]. Каковы долговременные изменения в ионосфере? До каких высот ионосферные структуры перемещаются вертикальными нейтральными ветрами? Имеет ли ионосфера “память”, и существуют ли геомагнитные “предпосылки” во время ионосферных бурь? Что конкретно обуславливает изменчивость слоя *F2* день ото дня? Имеет ли ионосфера характерные временные масштабы? Реален ли радиус корреляции, который считается равным ~500 км для слоя *F2* и других слоев ионосферы на средних широтах? Последний вопрос и будет нас интересовать. Представляется целесообразным выяснить, действительно ли такой радиус приемлем для слоя *F2* и других слоев в субавроральной области, и в частности там, где расположена обс. Соданкюля, Финляндия. Этот район подвержен частым маг-

нитным возмущениям типа бурь и суббурь. Во время геомагнитной суббури естественно ожидать в ионосфере существенных изменений как пространственных, так и временных.

Цель настоящего исследования – оценить, насколько указанный радиус изменяется во время геомагнитной суббури 14 февраля 2011 г., и какие динамические процессы, развивающиеся в ионосфере во время суббури, способствуют этому. Было бы интересно установить подобные закономерности в общем виде для возмущения типа суббури статистически. Но выполнить такой анализ крайне сложно, поскольку суббури все разные как по интенсивности, так и продолжительности.

2. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Для анализа, во-первых, использованы данные ВЗ ионосферы обс. Соданкюля (67.37° N, 26.63° E) (www.sgo.fi). Зондирование осуществлялось ЛЧМ-сигналами со скоростью изменения частоты 500 кГц/с. Таким образом, снятие одной ионограммы (0.5–16 МГц) осуществилось за 33 с. Анализировались последовательные ионограммы с 5-минутным интервалом между ними, чтобы

проследить динамику ионосферы в деталях. Примеры этих ионограмм можно видеть далее в тексте. Во-вторых, те же самые сигналы ВЗ обс. Соданкюля синхронно принимались в Санкт-Петербурге (60.27° N, 29.38° E) с помощью ЛЧМ-комплекса НЗ [Иванов и др., 2003]. Радиотрасса НЗ ионосферы Соданкюля—Санкт-Петербург, ориентирована практически вдоль меридиана. Примеры ионограмм НЗ приведены далее в тексте. Расстояние между передатчиком и приемником радиотрассы составляет 790 км. Следовательно, точка отражения трассы расположена на расстоянии ~400 км от точки отражения ВЗ обс. Соданкюля. Мы сравнили данные, полученные в двух (ВЗ и НЗ) точках отражения в ионосфере, отстоящих друг от друга на расстояние ~400 км, что несколько меньше, чем радиус корреляции ионосферы 500 км. Конечно, в идеале сравнивать данные ВЗ и НЗ не совсем корректно. Но в силу того, что трасса НЗ является короткой, и в данном случае зондирование можно рассматривать как квазивертикальное, мы с определенной погрешностью допускаем такую возможность. В-третьих, дополнительно используются данные ВЗ Санкт-Петербурга. В этом случае ставилась задача сравнить характер отраженных сигналов на ионограммах двух ионозондов, разнесенных на ~800 км, во время суббури и тем самым ответить на вопрос, возможен ли радиус корреляции в ионосфере в 800 км, и если да, то при каких условиях.

3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗМУЩЕНИЯ

Рассматриваемая магнитосферная суббуря имела место 14 февраля 2011 г. в вечерне-ночное время. На рисунке 1 по данным OMNIweb представлены вариации B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), верхняя панель, и скорость солнечного ветра ($V_{св}$), нижняя панель. Видно, что до 16:00 UT вариации B_z и $V_{св}$ практически отсутствуют, характеризуя тем самым спокойный фон. Особенностью является резкий скачок $V_{св}$ в 16:00 UT от 310 до 390 км/с, т.е. более чем на 20%. Этот скачок можно интерпретировать как начало развития суббури. Ощутимые отрицательные значения B_z -компоненты ММП имеют место с 18:30 до 19:30 UT и с 20:30 до 22:00 UT. Эти периоды примерно соответствуют максимальным значениям AE -индекса, вариации которого представлены на рис. 2. Интенсивность суббури в 21:30 UT составляет $I \approx 1200$ нТл, т.е. суббуря является достаточно мощной. Однако по данным сети магнитометров IMAGE, рис. 3, можно видеть, что начало вариаций X -компоненты магнитного поля имеет место в 16:00 UT, а резкий спад этой компоненты, начавшийся в 20:40 UT, достигает максимума по обс. Соданкюля $I \approx -850$ нТл. Из рисунка 3 также следует, что интенсивность суббури существенно уменьшается от высоких широт (KEV, Кево) к низким (NUR, Нурмиярви).

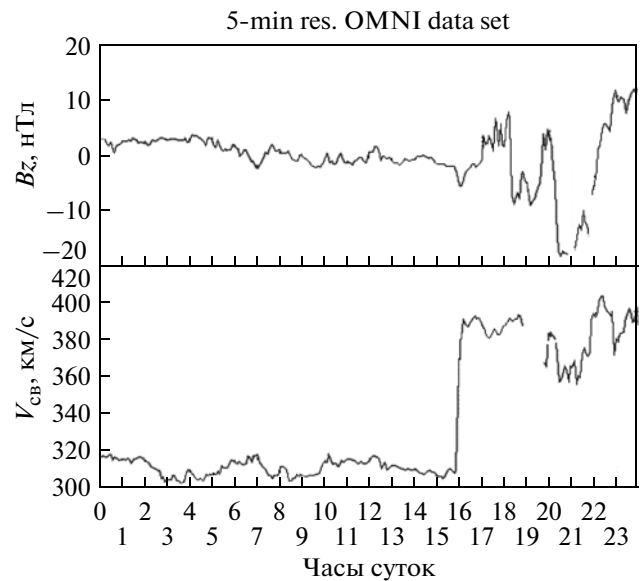


Рис. 1. Данные OMNIweb за 14 февраля 2011 г.: B_z -компонента межпланетного магнитного поля (верхняя панель); скорость солнечного ветра $V_{св}$ (нижняя панель).

Рисунок 4 демонстрирует уровень поглощения по риометрам финских станций. Видно, что по данным обс. Соданкюля на частоте риометра $f = 30$ МГц уровень поглощения достигает максимума 1.5 дБ в интервале 21:00–22:00 UT. Тем не менее такой уровень поглощения, на наш взгляд, является недостаточным для мощной суббури с интенсивностью $I \approx -850$ нТл [Благовещенский и Рогов, 2011]. Согласно рисункам 2, 3 и 4 окончание суббури имеет место в ~24:00 UT.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ ВЗ ИОНОСФЕРЫ ПО ОБС. СОДАНКЮЛЯ

Рассмотрим f -графики, рис. 5, и сами ионограммы ВЗ, рис. 6, за 14.02.2011 г., полученные с периодичностью 5 мин, т.е. 12 ионограмм за час. На рисунке 6а, б, в показаны примеры ионограмм в часы с нулевыми минутами для удобства сравнения их с данными рис. 5. На рисунке 6г, д, е приведены ионограммы с нестандартными отражениями в другие моменты времени. Главное внимание далее будет уделено анализу указанных реальных ионограмм за возмущенный период (суббурия) с 16:00 до 24:00 UT. На рисунке 5 для сравнения показаны также стандартные ежедневные значения данных ВЗ обс. Соданкюля. Из предварительного анализа ионограмм следует, что с 01:00 до 04:00 UT изменений критических частот $foF2$ и $foEs$ практически нет. Начиная с 05:00 UT происходит рост значений как $foF2$, так и $foEs$. Это обстоятельство также отражается на рис. 5. Далее на ионограммах с 10:20 до 11:30 UT за счет небольшого возмущения (рис. 2) наблюдается нарушение структуры сигналов, которое на

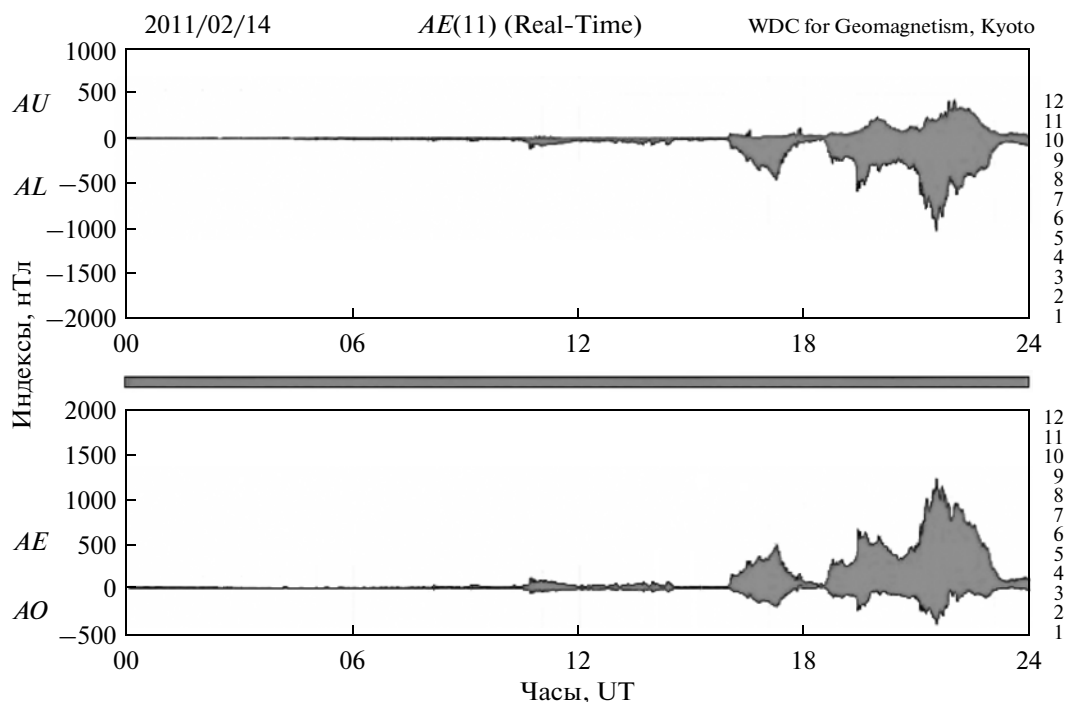


Рис. 2. AE -индекс магнитной активности за 14 февраля 2011 г.

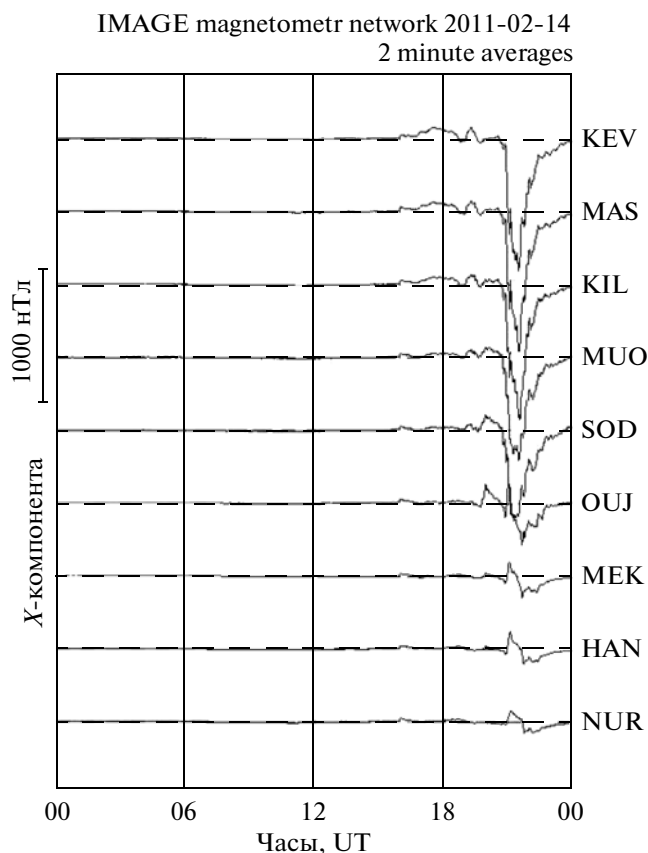


Рис. 3. X -компонента магнитного поля по сети магнетометров IMAGE за 14 февраля 2011 г.

рис. 5 не отражается. С 11:30 UT возникают устойчивые отражения от слоя F_2 , которые с 12:40 и до 15:50 UT становятся мощными — последовательно 3, 4 и 5 отражений. Последний факт, скорее всего, обусловлен повышением электронной концентрации в слое F_2 перед началом возмущения в соответствии с главным эффектом в ионосфере во время суббури [Благовещенский и Рогов, 2011; Blagoveshchensky et al., 2003, 2006]. С 16:00 UT, как отмечалось выше для рисунков 1, 2 и 3, началось магнитное возмущение. Рассмотрим ситуацию через каждый час, начиная с 16:00 UT. Ионограммы с интервалом 5 мин показывают резкий спад значений foF_2 и существенный рост диффузности сигналов с 16:00 и до 17:20 UT. Пример диффузных отражений сигналов для 16:00 UT показан на рис. 6а. Подобная диффузность тем не менее не отражается на рис. 5 в 16:00 UT. До 17:00 UT включительно имеют место отражения от слоя F_2 и одновременно от слоя E_s . Оба отражения диффузны. После 17:20 UT F_2 -отражения очень слабы, происходит рост значений foE_s с диффузностью до 19:00 UT. Пример E_s -отражений с диффузностью для 18:00 UT показан на рис. 6б. Таким образом, первый интервал времени с диффузностью F_2 - и E_s -отражений был с 16:00 до 19:00 UT. Начиная с 19:00 UT картина отражений меняется — образуются мощные E_s -отражения без диффузности. Пример подобного типа отражений показан на рис. 6е, но для 21:10 UT. Конец интервала с E_s -отражениями без диффузности — 19:30 UT. Рассматриваемый интервал

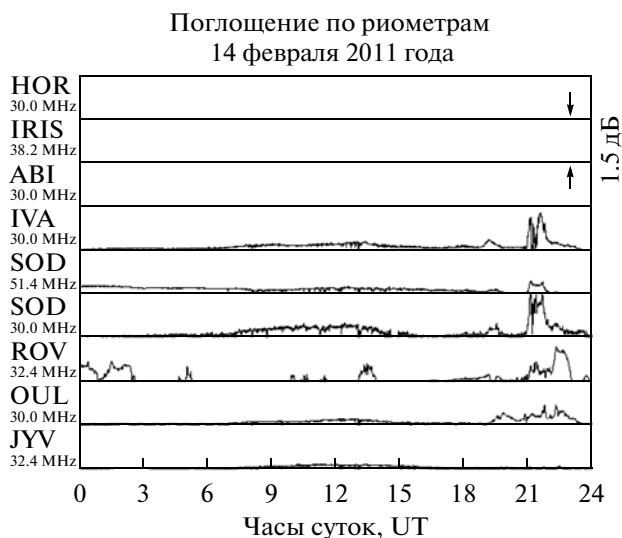


Рис. 4. Уровни поглощения для различных станций финской сети риометров за 14 февраля 2011 г.

19:00–19:30 UT соответствует первому интенсивному пику в AE -индексе (700 нТл) на рис. 2. Затем с 19:35 и до 21:00 UT образуются необычные (“двойные”) E_s -отражения наряду с косыми E_s с диффузностью, а также диффузные облака на высоте F_2 -слоя. Это второй интервал времени с диффузностью. Пример “двойных” спорадических E_s для 19:35 UT показан на рис. 6а. Пример ионограммы с “облаками” для 20:40 UT дан на рис. 6д. Ионограмма в 20:00 UT имеет характер, аналогичный характеру ионограммы, представ-

ленной на рис. 6д. Согласно рисункам 2, 3 и 4 в 21:30 UT наблюдается максимум возмущения суббури (1200 нТл по AE -индексу). На ионограмме в 21:00 UT какие-либо отражения отсутствуют из-за сильного поглощения, $A = 1.5$ дБ, рис. 4. Поэтому здесь указанная ионограмма не приводится. Однако уже в 21:10 UT на ионограмме, рис. 6е, видны необычно слабые по амплитуде из-за поглощения E_s -отражения, но с большим значением foE_s . Далее интенсивность E_s -отражений растет до 22:20 UT. Ионограмма в 22:00 UT похожа на ту, которая показана на рис. 6б, но без сильной диффузности. Снова диффузность на ионограммах наблюдается с 22:20 и до 24:00 UT, т.е. на спаде возмущения. Это третий интервал диффузности. В интервале с 22:15 до 22:30 UT возникли многослойные (с 2–4 слоями) спорадические E_s . В 22:40 UT имели место “двойные” E_s -отражения наряду с косыми E_s такого же типа, как на рис. 6а. Ионограмма в 23:05 UT, рис. 6в, показывает пример “высотных” F -отражений (на высоте 500–600 км), скорее всего, за счет опускания с больших высот F_2 -слоя после суббури [Благовещенский, 2011]. Подобные отражения существуют с 23:00 до 24:00 UT, т.е. до окончания суббури.

Остановимся еще раз на всех аномальных видах отражений, которые имели место во время суббури. Сюда относятся просто диффузные (рис. 6а, б), “высотные” F -отражения (рис. 6в), E_s с косыми E_s (рис. 6г), диффузные облака (рис. 6д), многослойные E_s (как на рис. 6е, но с несколькими слоями). Времена жизни аномальных отражений существенно различаются. Просто диффузность может существовать от 1.5 до 3 ч;

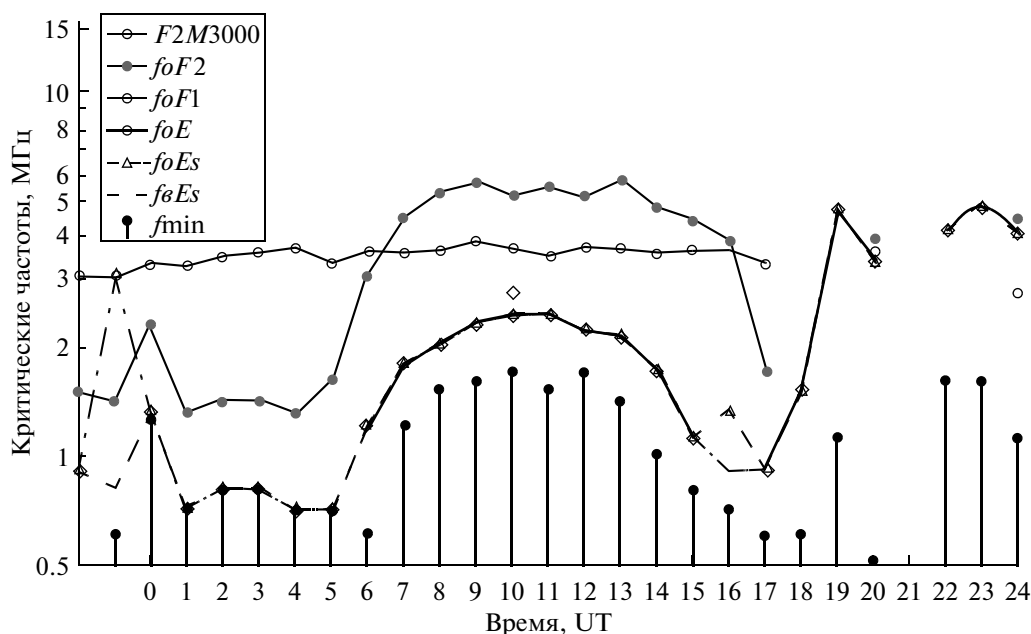


Рис. 5. f -графики критических частот ионосферы по obs. Соданкюля за 14 февраля 2011 г.

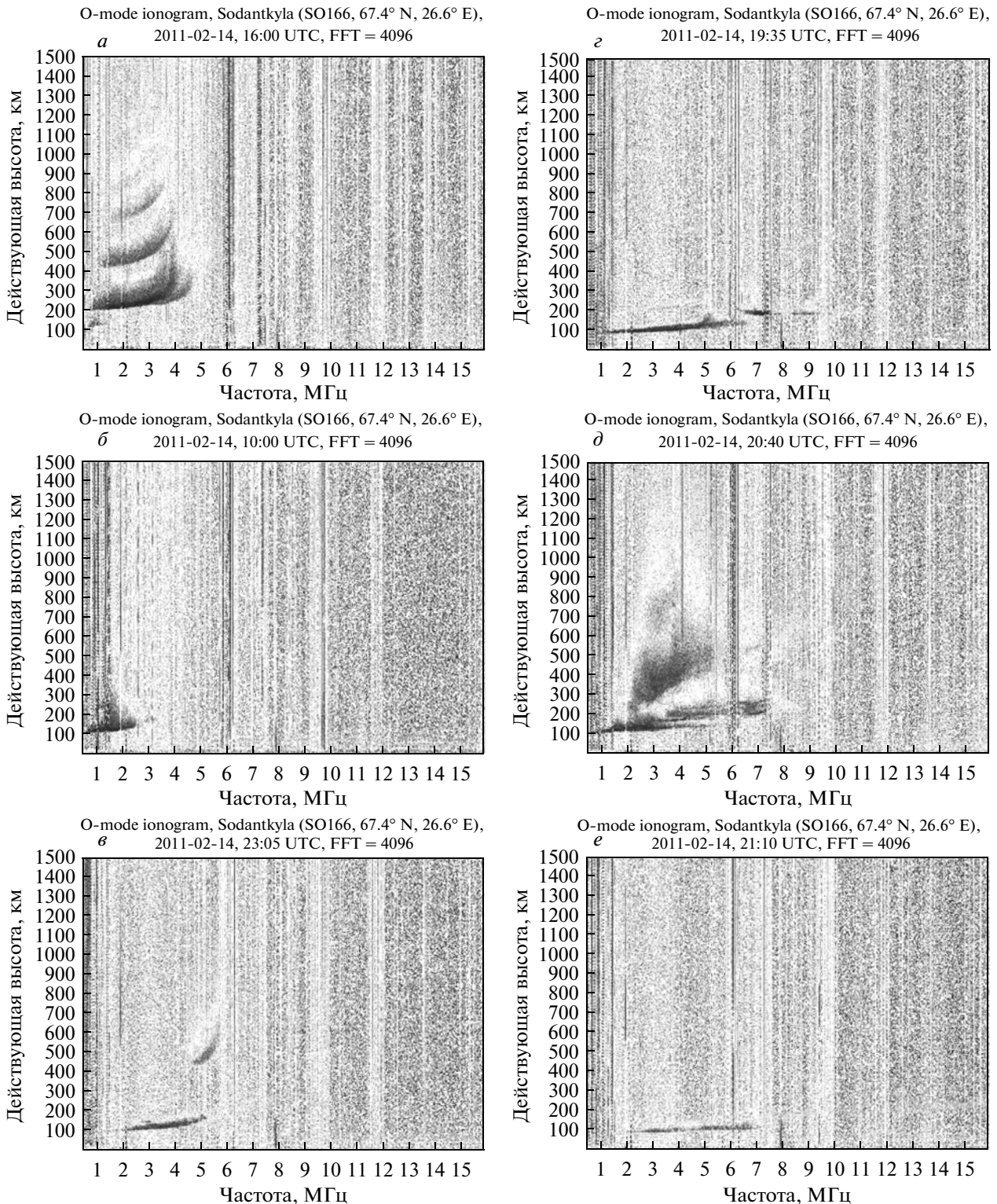


Рис. 6. Ионограммы ВЗ обс. Соданкюля, полученные 14 февраля 2011 г.: а – 16:00 UT; б – 18:00 UT; в – 23:00 UT; г – 19:35 UT; д – 20:40 UT; е – 21:10 UT.

диффузные облака наблюдаются в течение ~1.5 ч; “высотные” F-отражения – 1 ч; многослойные Es – 15 мин; спорадические Es вместе с косыми

Es – несколько минут. Как следует из рис. 2, диффузность сигналов возникает в периоды сравнительно слабой магнитной возмущенности перед

взрывной фазой суббури и после нее. Облака появились перед вторым наиболее интенсивным максимумом AE -индекса. На фазе восстановления суббури (спад AE -индекса) имели место другие аномальные сигналы – “высотные” F -отражения, многослойные E_s и E_s вместе с косыми E_s . Характерным является то, что все аномальные виды отражений не описываются f -графиками, рис. 5. Это не ошибка, а принятый метод обработки ионограмм ВЗ, который не учитывает аномальные отражения. Но в реальности они существуют и игнорировать их нельзя.

5. АНАЛИЗ ИОНОГРАММ НЗ НА ТРАССЕ СОДАНКЮЛЯ–САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Начиная с самого начала дня 14.02.2011 г. ионограммы НЗ, примеры которых даны на рис. 7, демонстрируют характер отражений сигналов, аналогичный представленному на рис. 5. Отражения на каждой ионограмме состоят из следующих модов: $1F2$ (односкачковое распространение посредством отражения от слоя $F2$), $2F2$ (двухскачковое) и $1E_s$ (односкачковое распространение посредством отражения от слоя E_s). В 10:00 UT, т.е. в полдень по местному времени для obs. Соданкюля, отражения имеют следующие параметры. Максимально наблюдаемая частота $1F2MНЧ = 10$ МГц, $2F2MНЧ = 6.5$ МГц и $1E_sMНЧ = 8$ МГц. Представляется интересным оценить, насколько эти значения при наклонном односкачковом распространении соответствуют значениям при вертикальном падении на рис. 5. Используем закон секанса [Davis, 1990]

$$f_n = f_b \sec \varphi_0,$$

где f_b – максимальная частота вертикальной волны; f_n – максимальная частота наклонной волны; φ_0 – угол падения волны на слой.

Для расстояния 800 км и высоты отражения 300 км (слой $F2$) из кривых передачи [Davis, 1990] $\sec \varphi_0 = 1.8$, а для высоты отражения 110 км (слой E_s) $\sec \varphi_0 = 3.4$. Из рисунка 5 $f_b(F2) = 5.2$ МГц и $f_b(E_s) = 2.4$ МГц. Расчеты по формуле закона секанса дают $f_n(F2) = 9.4$ МГц и $f_n(E_s) = 8.16$ МГц, тогда как экспериментальные значения $f_n(F2) = 10$ МГц и $f_n(E_s) = 8$ МГц, т.е. можно видеть удовлетворительное совпадение.

После 11:00 UT начинается спад значений $1E_sMНЧ$ подобно foE_s на рис. 5. Аналогично с 13:00 UT уменьшаются значения $1F2MНЧ$. В интервале 14:30–17:00 UT на ионограммах наблюдается дополнительное отражение $3F2$, что свидетельствует об усилении электронной ионизации в слое $F2$. Скорее всего это связано с главным эффектом в ионосфере [Благовещенский, 2011; Blagoveshchensky et al., 2003, 2006]. Момент 16:00 UT – начало магнитного возмущения, рисунки 1, 2 и 3. Как и в случае ВЗ, здесь будем уде-

лять специальное внимание ионограммам за каждый час с нулевыми минутами. С 16:00 и до 18:40 UT наблюдается спад значений $foF2$ и рост диффузности сигналов. Из рисунка 7а для 16:00 UT следует, что все отраженные сигналы диффузны. С 17:00 и до 18:50 UT происходит небольшой рост значений foE_s , диффузные отражения $1F2$ также присутствуют. Пример показан на рис. 7б. С 18:50 и до 20:00 UT диффузные $1F2$ пропадают, но возникают многослойные E_s -отражения, пример показан на рис. 7г. С 20:00 до 20:40 UT помимо многослойных E_s возникают высотные отражения от $F2$ -слоя на частоте $f = 6$ МГц, рис. 7д. С 20:50 до 21:40 UT во время максимума AE -индекса образуются мощные E_s -отражения с высокими значениями foE_s , пример показан на рис. 7е. В 21:00 UT повышенное поглощение по риометру в obs. Соданкюля, рис. 4, на характер сигналов НЗ, в отличие от ВЗ, не влияет. Физически это объясняется тем, что трасса Соданкюля–Санкт-Петербург расположена к югу от obs. Соданкюля. При этом согласно рис. 3 магнитная активность во время суббури существенно понижается на станциях южнее obs. Соданкюля, а как видно из рис. 4, уровень поглощения к югу от obs. Соданкюля также резко снижается, и сигналы НЗ практически не поглощаются. Другая особенность состоит в том, что в 21:00 UT наблюдаются очень мощные E_s -отражения. Последние настолько мощны, что наряду с односкачковой $1E_s$ модой образуется двухскачковая $2E_s$ мода. В промежутке 21:50–22:10 UT наблюдаются многослойные E_s . С 22:30 и до 24:00 UT на спаде возмущения значения foE_s уменьшаются, но растет интенсивность “высотных” F -отражений. Пример подобных отражений можно видеть на ионограмме в 23:05 UT, рис. 7в. С 23:10 и до 24:00 UT сигналы на ионограммах диффузны.

6. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ВЗ И НЗ, ОБСУЖДЕНИЕ

1. Сравнение будем производить исходя из характера отражений сигналов от тех или иных слоев ионосферы. Сначала представляется целесообразным сравнить ионограммы ВЗ на рис. 6 с ионограммами НЗ на рис. 7. Как указывалось выше, позиции “а, б, в” соответствуют часам с нулевыми минутами, а именно: 16:00, 18:00 и 23:00 UT. Другие позиции “г, д, е” соответствуют тем моментам, когда наблюдались нестандартные отражения – 19:35, 20:40 и 21:10 UT для обоих рисунков. Можно видеть, что характер отражений на ионограммах в 16:00, 21:10 и 23:05 UT, за исключением деталей, практически один и тот же. Что касается остальных ионограмм в 18:00, 19:35 и 20:40 UT на рисунках 6 и 7, то они существенно отличаются. Сделаем попытку понять, почему подобное возможно.

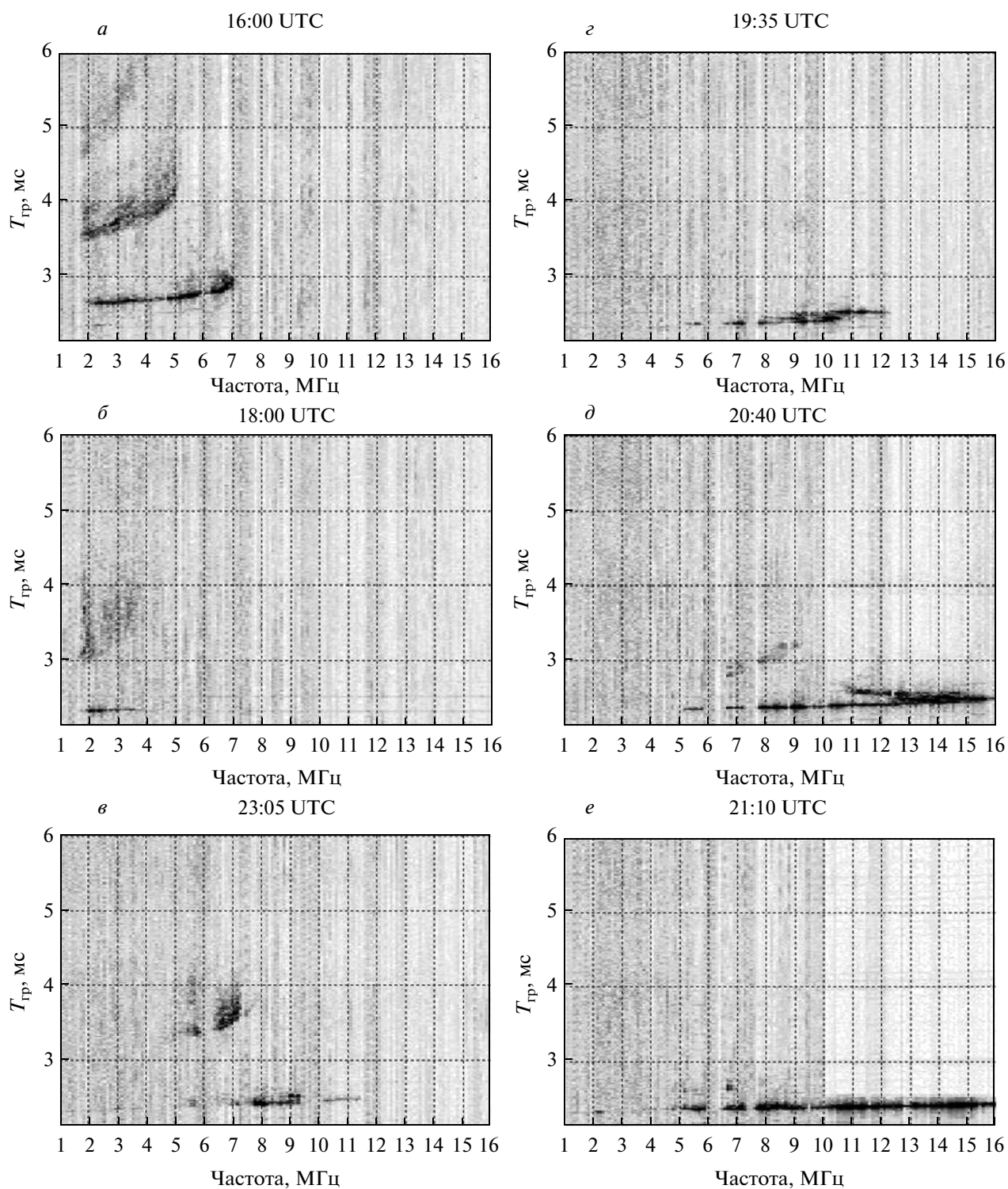


Рис. 7. Ионограммы НЗ на трассе Соданкюля—Санкт-Петербург за 14 февраля 2011 г.
 $T_{гр}$ — групповое время распространения сигнала.

Во-первых, время 16:00 UT характеризует самое начало магнитного возмущения, см. рисунки 1, 2 и 3. Хотя отражения на ионограммах ВЗ и НЗ диффузны в этот момент, тем не менее структура

ионосферы над obs. Соданкюля и в точке отражения трассы НЗ еще не успела измениться по сравнению со спокойным состоянием, и поэтому картина отражений для ВЗ подобна картине для НЗ.

Изменение структуры и характеристик отражений на ионограммах ВЗ и НЗ за период магнитного возмущения 14.02.2011 г.

№ п/п	Событие или структура сигнала	ВЗ время, UT	НЗ время, UT
1	Рост интенсивности сигнала перед возмущением (главный эффект)	12:40–15:50	14:30–17:00
2	<i>F2</i> - и <i>Es</i> -отражения, уменьшение критической частоты <i>foF2</i>	16:00–17:20	16:00–18:40
3	Рост критической частоты <i>foEs</i>	17:20–19:00	17:00–18:50
4	Мощные <i>Es</i> -отражения	19:00–19:30	–
5	Многослойные <i>Es</i> -отражения, косые <i>Es</i> , “высотные” <i>F</i> -отражения	19:35–21:00	18:50–20:40
6	Очень мощные <i>Es</i> -отражения с большими значениями критических частот <i>foEs</i>	21:10–22:20	20:50–21:40
7	Многослойные <i>Es</i> -отражения, косые <i>Es</i> , критические частоты <i>foEs</i> падают	22:20–22:55	21:50–22:10
8	<i>Es</i> -отражения плюс “высотные” <i>F</i> -отражения, критические частоты <i>foEs</i> падают	23:00–24:00	22:30–24:00

Примечание: Жирным шрифтом указаны интервалы времени, когда наблюдаются диффузные *F2*- и *Es*-отражения на ионограммах ВЗ и НЗ.

Во-вторых, в 23:00 UT магнитное возмущение уже заканчивается, нестационарные процессы в ионосфере приближаются к исходным, невозмущенным, рис. 2, 3 и 4. Следовательно, здесь также возможно ожидать сходство ионограмм для ВЗ и НЗ, что и наблюдается. И, наконец, в-третьих, для 21:10 UT, как следует из рисунков 2, 3 и 4, имеет место максимум геомагнитного возмущения. В этот период в ионосфере наблюдаются только мощные спорадические слои *Es* больших размеров по горизонтали. Ионограмма на рис. 6е, хотя и содержит слабое по интенсивности *Es*-отражение из-за поглощения, но значение критической частоты *foEs* достаточно велико. Что касается ионограммы на рис. 7е, то на ней можно видеть мощное по интенсивности *Es*-отражение тоже с большой критической частотой. Поэтому для рассматриваемых ионограмм существует явное сходство по структуре сигнала (но не по интенсивности).

Далее, для моментов времени 18:00, 19:35 и 20:40 UT характерно то, что уровень возмущения здесь не максимален, но и не близок к нулю, т.е. умеренный. Как отмечалось выше, для указанных моментов в ионосфере наблюдаются резкие динамические процессы с образованием быстро возникающих и затем быстро исчезающих структур. Так, если для рис. 6б по данным ВЗ на ионограмме *F2*-отражения почти пропали, и существуют *Es*-отражения с диффузностью, то на рис. 7б (НЗ) можно видеть диффузные *F2*-отражения и *Es*-отражения без диффузности. Иными словами, существует несходство ионограмм. Рисунок 6г содержит *Es*-отражение с косым *Es*, а рис. 7г – многослойные *Es*-отражения. Здесь также наблюдается расхождение. На ионограмме рис. 6д можно видеть многослойные *Es*-отражения и мощные диффузные облака на уровне *F2*-слоя, тогда как на ионограмме рис. 7д присутствуют *Es*-отражение с косым *Es* и очень слабые диффузные облака на уровне *F2*-слоя. Здесь также

сходство отсутствует. Таким образом, главный вывод состоит в том, что корреляция между данными НЗ и ВЗ существует во время спокойных или слабо возмущенных условий, а также во время сильного возмущения. Но в периоды умеренного магнитного возмущения рассматриваемая корреляция отсутствует. Конечно, данный вывод основан на анализе единственного случая возмущения, но наглядность результатов сравнения очевидна.

2. Ниже приведены результаты сравнения ВЗ и НЗ. В таблице приведена сводка данных ВЗ и НЗ ионосферы во время магнитного возмущения 14.02.2011 г. для различных временных интервалов. Первый пункт таблицы касается усиления интенсивности сигналов перед возмущением. Специальные исследования по данному вопросу были выполнены ранее [Благовещенский, 2011; Vlagoveshchensky et al., 2003, 2006]. Главное, что выявлено, – рост ионизации ионосферы и интенсивности сигнала перед магнитным возмущением (главный эффект в ионосфере). Здесь, как следует из таблицы, п. 1, данные ВЗ и НЗ подтверждают этот эффект. В случае ВЗ он проявляется несколько раньше, чем при НЗ. Видимо, это связано с более ранним началом процесса ионизации в высоких широтах (обс. Соданкюля), чем на средних (точка отражения трассы НЗ). Возмущение, как известно, перемещается от высоких широт к средним не мгновенно. По крайней мере, п. 1 таблицы подтверждает сходство данных ВЗ и НЗ на этапе перед возмущением. Что касается диффузности (жирные цифры в таблице), то согласно пунктам 2 и 3 общий период наличия диффузности сигналов по данным ВЗ и НЗ практически одинаков. В этом состоит совпадение результатов зондирования методом ВЗ и НЗ. Далее начинаются расхождения, см. пункты 4 и 5. Здесь события и структура сигналов для ВЗ и НЗ различны. Это временной интервал с умеренной магнитной возмущенностью, в пределах которого

возникают быстро сменяющиеся структуры ионосферы. Корреляция между ВЗ и НЗ отсутствует. Согласно данным п. 6, схожесть в данных ВЗ и НЗ опять существует, поскольку причиной отражений ВЗ и НЗ сигналов являются мощные спорадические образования во время максимума возмущения. Пункт 7 таблицы, кое в чем совпадающий с п. 5, демонстрирует снова отсутствие корреляции между ВЗ и НЗ. Здесь интервал времени соответствует спаду возмущения, но возмущение еще не слабое, а скорее умеренное. И последний п. 8, когда возмущение фактически завершилось, и образовались слабо возмущенные условия, показывает схожесть данных ВЗ и НЗ в приблизительно одинаковом временном интервале.

Таким образом, исходя из проведенного анализа можно заключить, что радиус корреляции в 400 км между точками отражения ВЗ и НЗ во время магнитного возмущения может рассматриваться как приемлемый на трех этапах возмущения. Это — начальная фаза, когда еще не началась перестройка ионосферы, фаза максимума возмущения, когда отражающим слоем в ионосфере является только спорадический слой *Es*, и фаза восстановления, когда возмущение уже заканчивается, и строение ионосферы приобретает исходную невозмущенную структуру. На других этапах возмущения радиус корреляции фактически существенно меньше 400 км или близок к нулю.

Что касается радиуса временной корреляции, то уместно заметить следующее. Если в спокойных условиях в ионосфере существует временной масштаб, составляющий ~40 мин [Special meeting, 2010], то исходя из проведенных здесь исследований, радиус временной корреляции во время суббури лежит в пределах нескольких минут, т.е. сокращается по сравнению со спокойными условиями приблизительно на порядок.

7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Представляет интерес привлечь для анализа дополнительные данные станции ВЗ Санкт-Петербурга. Цель этого — сопоставить их с данными ВЗ obs. Соданкюля и убедиться в принципиальной возможности (или невозможности) увеличения радиуса корреляции ионосферы с 400 до 800 км. Определенная сложность заключается в том, что станция Санкт-Петербург работала в несколько ином режиме, чем obs. Соданкюля, а именно: ее сеансы зондирования заканчивались в 24-ю и 54-ю минуты каждого часа, иногда в 03-ю минуту. Поэтому провести сопоставление данных таким образом, как это было выполнено для рисунков 6 и 7, здесь невозможно. Однако приблизительно это сделать возможно.

Анализ ионограмм ВЗ Санкт-Петербурга за 14 февраля 2011 г. показывает следующее. В дневные часы около полудня наблюдаются отражения

$1F2$ и $2F2$, но начиная с 14:54 и до 15:54 UT включительно, происходит резкий рост числа отражений — к первым двум добавляются $3F2$ и $4F2$ (см. рис. 8а). Рост числа отражений свидетельствует об усилении процесса ионизации в ионосфере до начала развития возмущения, как указывалось ранее, благодаря главному эффекту. Следовательно, этот эффект проявляется не только по данным ВЗ obs. Соданкюля и НЗ (согласно п. 1 таблицы), но также ВЗ Санкт-Петербурга. В этом состоит определенное сходство данных. Из рисунков 8а, г можно видеть, что характер отражений сигналов от слоя $F2$ на ионограммах в основном совпадает. Отличие состоит в том, что на рис. 8г наблюдается увеличенная диффузность сигналов и наличие слабого спорадического слоя *Es*. Таким образом, можно заключить, что в спокойное перед возмущением время корреляция между характером сигналов, отраженных от $F2$ -слоя ионосферы, в двух точках, отстоящих на расстоянии до 800 км, возможна (но, вероятно, не всегда).

Далее с 16:00 UT, как и в случае ВЗ obs. Соданкюля, наблюдается диффузность отраженных сигналов, которая продолжается до 20:24 UT включительно. Это также находится в соответствии с данными пунктов 2–5 таблицы (жирный шрифт). В указанном интервале времени, однако, характер отраженных сигналов по данным ВЗ обсерваторий Соданкюля и Санкт-Петербург существенно отличен. С 20:54 по 21:24 UT во время максимума возмущения наблюдаются только *Es*-отражения, что также находится в согласии с п. 6 таблицы. На рисунке 8б, д можно видеть *Es*-отражения, но значения f_oEs отличаются. Если спорадический слой однороден от obs. Соданкюля до Санкт-Петербурга (что вызывает некоторое сомнение), то корреляция здесь также будет существовать. С 21:54 до 23:54 UT в Санкт-Петербурге фиксируются только диффузные отражения от слоя $F2$. Из рисунка 8в, е следует, что эти отражения в чем-то похожи, но в чем-то отличаются. К тому же на рис. 8е присутствует *Es*-отражение.

Окончательный итог состоит в том, что перед возмущением и на стадии его окончания имеются признаки наличия корреляции по характеру отраженных сигналов от слоя $F2$ на двух ионозондах, расстояние между которыми 800 км. В максимуме возмущения схожесть сигналов (*Es*-отражения) на ионограммах двух ионозондов также наблюдается. Если слой отражения один и тот же для двух ионозондов, то корреляция существует. Если слой выражен в виде нескольких разных структур, то корреляции нет. С помощью метода ВЗ выявить точно структуру спорадического слоя вдоль расстояния 800 км практически затруднительно.

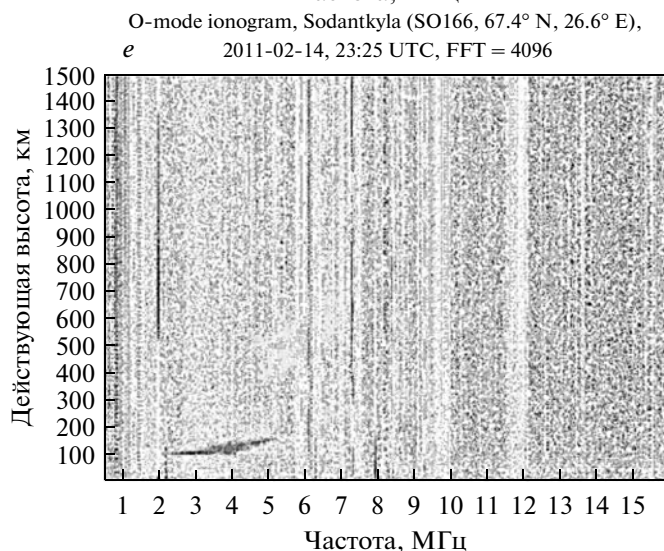
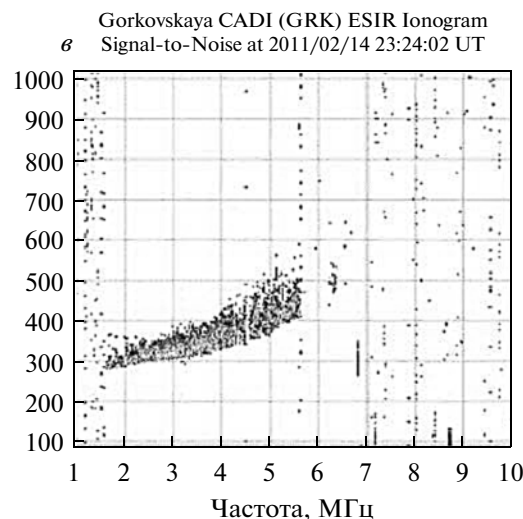
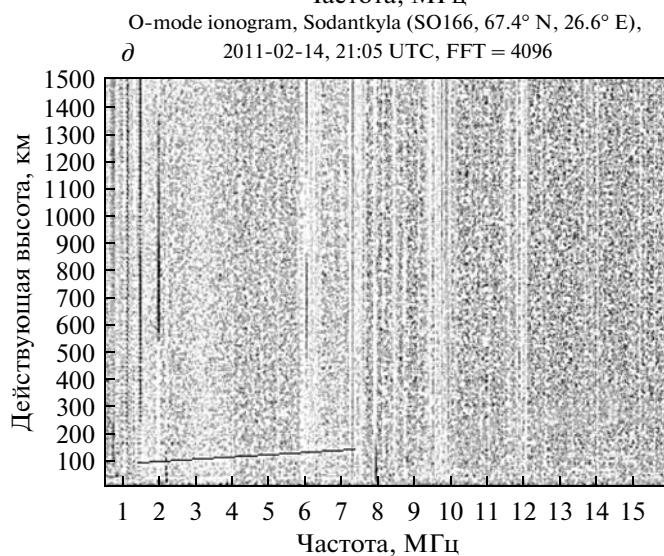
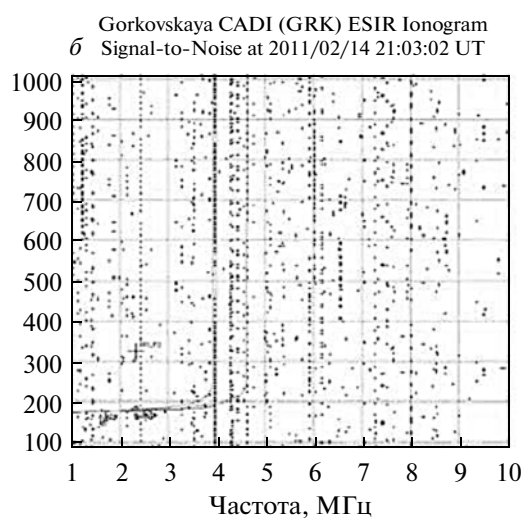
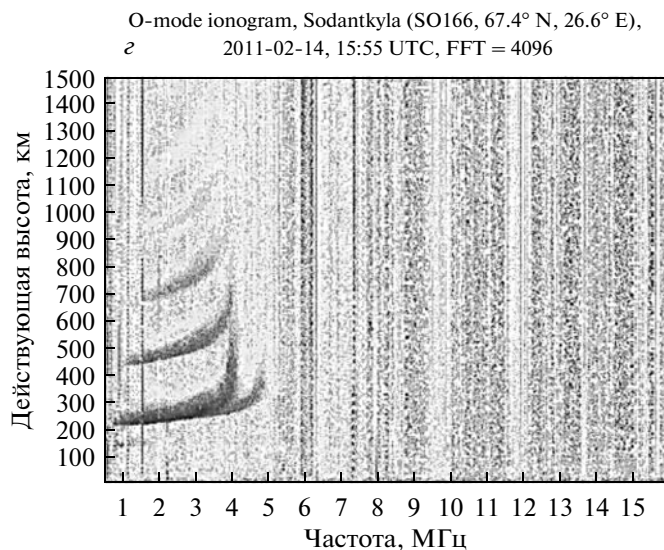
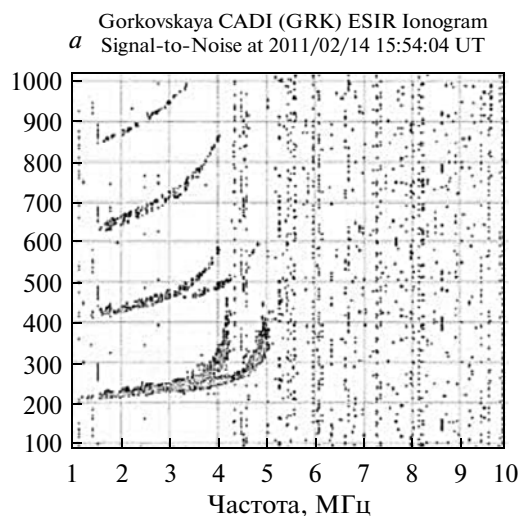


Рис. 8. Ионограммы ВЗ Санкт-Петербурга (слева) и ВЗ obs. Соданкюля (справа) за 14 февраля 2011 г.: *a* – 15:54 UT; *b* – 15:55 UT; *в* – 21:03 UT; *г* – 21:05 UT; *д* – 23:24 UT; *e* – 23:25 UT.

8. ВЫВОДЫ

1. В ходе эксперимента по ионограммам ВЗ обс. Соданкюля выявлены аномальные типы отражений, которые имели место во время суббури 14.02.2011 г. Сюда относятся просто диффузные, “высотные” F -отражения, E_s вместе с косыми E_s , диффузные облака, многослойные E_s (с 2–4-мя слоями). Времена жизни аномальных отражений существенно различаются. Просто диффузность может существовать от 1.5 до 3 ч; диффузные облака наблюдаются ~1.5 ч; “высотные” F -отражения – 1 ч; многослойные E_s – 15 мин; спорадические E_s вместе с косыми E_s – несколько минут. Диффузность сигналов возникает в периоды сравнительно слабой магнитной возмущенности перед взрывной фазой суббури и в конце суббури. Облака наблюдались перед наиболее интенсивным максимумом AE -индекса. На фазе восстановления суббури (спад AE -индекса) имели место другие аномальные сигналы – “высотные” F -отражения, многослойные E_s и E_s вместе с косыми E_s . Особенность состоит в том, что все аномальные виды отражений не описываются стандартными f -графиками. Это не ошибка, а принятый метод обработки ионограмм ВЗ, который не учитывает аномальные отражения. Но в реальности они существуют и игнорировать их нельзя, поскольку они могут оказать негативное влияние на организацию радиосвязи на трассах.

2. Произведена количественная оценка, насколько значения максимально наблюдаемых частот по F_2 -слою $1F_2MНЧ$ и по E_s -слою $1E_sMНЧ$ при наклонном односкачковом распространении волн соответствуют значениям при вертикальном падении волны на ионосферу. Для спокойных магнитных условий получено, что имеет место удовлетворительное совпадение.

3. Во время взрывной фазы суббури (максимума AE -индекса) обнаружено, что повышенное поглощение, согласно данным риометра в обс. Соданкюля, на характер сигналов НЗ, в отличие от ВЗ, не влияет. Физически это объясняется тем, что трасса Соданкюля–Санкт-Петербург расположена к югу от обс. Соданкюля. При этом по данным наблюдений магнитная активность во время суббури существенно понижается на станциях южнее обс. Соданкюля. То же самое относится и к степени поглощения по данным риометров к югу от обс. Соданкюля. Поэтому сигналы НЗ практически не поглощаются.

4. Сравнение ионограмм НЗ и ВЗ обс. Соданкюля показало, что корреляция между данными НЗ и ВЗ существует во время спокойных или слабо возмущенных условий, а также во время сильного возмущения. Но в периоды умеренного магнитного возмущения рассматриваемая корреляция отсутствует. Данный вывод основан на анализе единственного случая суббурного возмущения, поэто-

му есть необходимость продолжить подобные исследования.

5. Радиус пространственной корреляции в 400 км между точками отражения ВЗ и НЗ во время магнитного возмущения может рассматриваться как приемлемый на трех этапах возмущения. Это начальная фаза, когда еще не началась перестройка ионосферы, взрывная фаза (максимум возмущения), когда отражающим слоем в ионосфере является только спорадический E_s , и фаза восстановления, когда возмущение уже затухает, и строение ионосферы приобретает исходную невозмущенную структуру. На других этапах возмущения радиус корреляции фактически близок к нулю. В этом состоит новизна проведенного исследования.

6. Перед возмущением и на стадии его окончания имеются признаки наличия корреляции по характеру отраженных сигналов от слоя F_2 на двух ионозондах с расстоянием между ними в 800 км. В максимуме возмущения схожесть сигналов (E_s -отражения) на ионограммах двух ионозондов также наблюдается. Если слой отражения один и тот же для двух ионозондов, то радиус корреляции в 800 км существует. Если слой выражен в виде нескольких разных структур, то корреляции нет.

Авторы выражают свою благодарность службам обс. Соданкюля и OMNIweb за возможность использования различных геофизических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 480 с. 2006.
- Благовещенский Д.В. Короткие волны в аномальных радиоканалах. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG, 422 с. 2011.
- Благовещенский Д.В., Рогов Д.Д. Проявления геомагнитной активности на трансавроральной КВ-радиотрассе // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 4. С. 540–551. 2011.
- Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 46. № 11. С. 919–952. 2003.
- Blagoveshchensky D.V., Borisova T.D., MacDougall J.W. Irregular HF radio propagation on a subauroral path during magnetospheric substorms // Ann. Geophysicae. V. 24. № 7. P. 1839–1849. 2006.
- Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Rodger A.S. Ionosphere dynamics over Europe and Western Asia during magnetospheric substorms 1998–99 // Ann. Geophysicae. V. 21. № 5. P. 1141–1151. 2003.
- Davis K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd., 376 p. 1990.
- Special meeting in memory of Henry Rishbeth. Southampton, UK, 27–28 September. 2010 (www.mist.ac.uk).