УДК 550.388.2

# БЫСТРАЯ ДИНАМИКА ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СУББУРИ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО И НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2019 г. Д. В. Благовещенский\*

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия \*e-mail: donatbl@mail.ru

Поступила в редакцию 08.12.2017 г. После доработки 19.10.2018 г. Принята к публикации 24.01.2019 г.

Проведены синхронные исследования на высокоширотном ионозонде ст. Соданкюля и низкоширотном ионозонде на о-ве Кипр, а также на двух радиотрассах – субавроральной Соданкюля–Горьковская и среднеширотной Кипр–Горьковская во время интенсивной суббури 14.02.2011 г. Идентифицированы быстропротекающие процессы (в пределах 5–10 мин) по данным вертикального зондирования ст. Соданкюля: спорадические *Es*-слои с наклонным треком, многослойность в треках *Es*-слоев, аномальные *spread F*, выраженные слои в диффузных *F*-образованиях, быстрые изменения значений максимально наблюдаемых частот по слою *Es*, многоскачковые *Es*-слои и диффузность в *F2*-слое ионосферы. Обнаружено качественное сходство данных вертикального зондирования ст. Соданкюля и наклонного зондирования на трассе Соданкюля–Горьковская. Расстояние между ст. Соданкюля и точкой отражения трассы Соданкюля–Горьковская составляет 400 км в южном направлении. Тем самым процессы в ионосфере во время суббури качественно близки в пределах 400 км. Однако имеет место отличие указанных данных вертикального и наклонного зондирования от данных наклонного зондирования на трассе Горьковская–Кипр с точкой отражения вблизи г. Кишинева.

DOI: 10.1134/S0016794019040060

## 1.ВВЕДЕНИЕ

При решении задач космической погоды очень важно иметь представление о текущем состоянии событий и явлений, происходящих в околоземном пространстве, в частности, в ионосфере. Известно, что во время магнитных возмущений типа бурь или суббурь происходят быстро изменяющиеся процессы в ионосфере, особенно в высоких широтах. В полярных и приполярных районах магнитные бури и суббури проявляются в первую очередь и наиболее ярко. В отличие от бурь магнитосферные суббури [Lyons, 1996] представляют собой быстропротекающие процессы, при которых существенное, но далекое от максимума количество энергии, полученной из взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой, поступает в авроральную ионосферу и магнитосферу. Суббури имеют место, если скорость накапливаемой в магнитосфере энергии значительно перекрывает скорость потерь. Проявлениями магнитосферной суббури являются: магнитная суббуря, суббуря в полярных сияниях, ионосферная суббуря и т.д. Магнитная суббуря, или бухта в записи горизонтальной составляющей геомагнитного

поля Н, является следствием развития авроральных электроджетов, или струйных токов, текущих на высотах области Е ионосферы в зоне полярных сияний. Изолированная магнитосферная суббуря имеет три фазы: роста, экспансии (взрыва) и восстановления. Эффект фазы роста состоит в переходе магнитосферы к нестабильности. Во время фазы роста магнитное поле переходит от формы диполя к конфигурации хвоста. Для идентификации начала фазы взрыва используются следующие факты: авроральные брейкапы, резкое уменьшение в отрицательных бухтах в высоких широтах и др. Проявления авроральной интенсификации и начало отрицательной магнитной бухты сопутствуют друг другу и, как правило, имеют место в полуночной ионосфере авроральной зоны. Происходят изменения в ионосферном электрическом поле или соответственно в ионосферной конвекции. Поэтому суббуревыеэффекты в ионосфере высоких широт представляют значительный интерес. К сожалению, в высоких широтах, во-первых, станций вертикального зондирования (ВЗ) мало и, во-вторых, стандартная сеть ВЗ ионосферы не позволяет вы-

явить и отразить с большой точностью процессы в ионосфере, поскольку сеансы зондирования в стандартном режиме происходят один раз в 15 мин. За это время может случиться очень большое количество явлений существенно различного характера. Поэтому представляют интерес процессы в ионосфере в режиме быстрого зондирования, например, через каждые 5 мин, а не каждые 15 мин. К тому же известно, что во время интенсивных бурь и суббурь в высоких широтах образуются обширные области с высоким уровнем поглощения радиоволн. Поэтому в высоких широтах ВЗ ионосферы во время мощных возмущений недееспособно и желательно иметь альтернативный инструмент наблюдений. В последнем случае удобно использовать метод наклонного зондирования ионосферы (H3) на радиотрассах. Этот метод позволяет значительно снизить влияние поглощения на радиосигналы. К тому же ионосферные станции ВЗ (ионозонды) имеются далеко не везде, и в местах отсутствия станций ВЗ удобно использовать возможности H3 [Hunsucker and Hargreaves, 2003]. Известно также, что отраженные от ионосферы сигналы могут быть нестандартными (аномальными) как в случае ВЗ, так и НЗ. Так, в работе [Гивишвили и Лещенко, 2017] показано, что при ВЗ на ст. Москва в спокойное время наблюдаются аномальные отражения (АО) – плоские, слоистые, диффузные смешанные. Они имеют облачную или слоистую структуру в виде вкраплений в толщу ионосферы сгустков плазмы большой плотности. В работе [Urvadov et al., 2005] представлены результаты исследований распространения КВ в период геомагнитных возмущений с помощью сети ЛЧМ-зондов. Показана роль аврорального овала и среднеширотного провала в создании условий для боковых отклонений сигналов от плоскости большого круга с аномально большими задержками. В работе [Vertogradov et al., 2007] проведено детальное изучение образования z-образного возмущения на луче Педерсена дистанционно-частотной характеристики НЗ. Показано, что z-отражения вызываются движением ПИВ. В работе [Kurkin et al., 2009] исследовано поведение ионосферных параметров foF2. hmF2 и МНЧ на двух трассах Магадан-Иркутск и Норильск-Иркутск. В периоды магнитных бурь наблюдались сильные положительные возмущения на всех станциях ВЗ и постоянное присутствие слоя *Es* на ионограммах обеих трасс.

В настоящем исследовании ставится задача комплексно изучить наиболее характерные процессы и явления в ионосфере во время интенсивной магнитной суббури, имевшей место 14 февраля 2011 г. Используются данные ВЗ ионосферы ст. Соданкюля (Финляндия) и ст. Никозия (о-в Кипр), а также данные НЗ на двух КВ-радиотрассах Соданкюля–Горьковская (возле Санкт-Петербурга) и Горьковская-Кипр. Особое значение здесь будут иметь пятиминутные ионограммы H3 на трассе Соданкюля-Горьковская и пятиминутные ионограммы B3 ст. Соданкюля. Эта станция расположена в уникальном месте – на геомагнитной широте 64.2° N, близкой к широте 65° N, где, как известно, в первую очередь проявляются магнитные возмущения типа бурь и суббурь [Lyons, 1996].

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящем исследовании использовались данные ВЗ ионосферы станций Соданкюля и о-ва Кипр, а также данные НЗ на двух радиотрассах Соданкюля—Горьковская длиной 800 км и Горьковская-Кипр длиной 2900 км. Область отражения сигнала на первой трассе находится на расстоянии ~400 км к югу от ст. Соданкюля. Область отражения второй трассы находится к югу от ст. Соданкюля и отстоит от нее на 2250 км. Это как раз над г. Кишиневом. Линия, соединяющая все три области, проходит преимущественно в южном направлении с небольшим отклонением к востоку на юге. Таким образом, мы имеем три области, где можно оценить состояние отраженных сигналов от ионосферы: одна в полярных широтах, точнее в авроральной зоне, другая – в субавроральной зоне и третья - на средних широтах. Сравнение характера отражений сигналов ВЗ и НЗ в указанных областях произведено на качественном уровне. А именно, выявлено, проявляется или нет тот или иной рассматриваемый специфический эффект, вызванный геомагнитным возмущением, в одно и то же время в разных точках одновременно, поскольку аппаратура ВЗ и НЗ работала синхронно с интервалом в 5 мин. Примеры ионограмм ВЗ и НЗ можно видеть на рисунках ниже.

## 3. МАГНИТНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ

Рассматривался один день 14 февраля 2011 г., где в конце дня имела место достаточно интенсивная суббуря. На рисунке 1 представлены ее параметры. Верхняя панель (а) показывает вариации Х-компоненты магнитного поля, записанные магнитометром на ст. Соданкюля. Видно, что на почти абсолютно спокойном фоне возникло интенсивное возмущение. Время появления - предполуночное, длительность суббури ~3 ч, интенсивность в максимуме с 21:00 до 22:00 UT равна – 700 нТл. На второй панели (б) показан уровень поглощения A по риометру ( $f = 30 \text{ M}\Gamma\mu$ ) на ст. Соданкюля. Максимальное значение поглощения, как можно видеть, также соответствует периоду с 21:00 до 22:00 UT, где A = 1.5 дБ. Этим двум максимумам в Х-компоненте и поглощении А соответствует тем не менее сравнительно невысокое



**Рис. 1.** Данные вариаций геомагнитных индексов X(a), AE(e) и Kp(e), а также поглощения по риометру ст. Соданкюля ( $\delta$ ) за период магнитосферной суббури 14 февраля 2011 г.

максимальное значение индекса Dst = -35 нТл. Следовательно, эффекты суббури были в основном сосредоточены в высоких широтах. Данное обстоятельство подтверждает третья панель (в), где представлены вариации АЕ-индекса. Из нее можно видеть, что суббуря имела продолжительность с 18:30 до 23:00 UT и два максимума: в 19:00-20:00 и 21:00-22:00 UT. Эти два максимума в АЕ соответствуют максимумам поглощения на второй панели. Самое большое значение АЕ в промежутке от 18:30 до 23:00 UT составляет 1200 нТл, что можно считать высоким. Данная величина характеризует интенсивное возмущение именно для высоких широт в соответствии с определением АЕ-индекса. В нижней части рис. 1 на панели (г) показаны значения Кр-индексов. Видно, что утром и днем геомагнитная возмущенность практически отсутствует и лишь с 15:00 UT она начинает возрастать, достигая значения Kp = 5 + c 21:00 до 24:00 UT.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

# 4.1. Вариации сигналов

Рассмотрим сначала общий ход вариаций сигналов на ионограммах ВЗ и НЗ в процессе развития суббури. Рисунки 2*a*, *б* иллюстрирует последовательность ионограмм с 16:00 UT до 23:00 UT через каждый час так, чтобы охватить предвозмущенный период, само возмущение и окончание возмущения (суббуря). В первом ряду по вертикали представлены данные ВЗ ст. Соданкюля. Соответственно во втором и третьем ряду показаны ионограммы НЗ для трассы Соданкюля–Горьковская и Кипр–Горьковская.

# 4.1.1. Данные вертикального зондирования

Представляет интерес рассмотреть события во времени по данным ионограмм ВЗ, как наиболее информативных, за 14 февраля 2011 г. Здесь имеем следующее. До 16:00 UT (начала суббури по АЕ-индексу) никаких особенностей за счет возмущения в ионограммах не наблюдалось. Но с 16:00 UT и до 17:20 UT возникает диффузность отражений от слоя F2 в отраженных сигналах и спорадический Es-слой. По поводу последнего целесообразно напомнить следующее [Hunsucker and Hargreaves, 2003]. С временной изменчивостью и пространственной неоднородностью высыпаний энергичных заряженных частиц из магнитосферы связано существование разнообразных типов спорадических слоев в области Е полярной ионосферы, которые делят на два основных класса. Спорадические образования первого класса похожи по структуре на регулярные Е-слои, занимают большую площадь, сравнительно стабильны по времени и однородны по горизонтали, к ним обычно относятся слои типа Esr, отличающиеся групповым запаздыванием на высокочастотном конце следа отражения на ионограмме ВЗ. Их на-

# БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ



Рис. 2. (*a*) – Последовательность ионограмм ВЗ по ст. Соданкюля (первый столбец), НЗ на радиотрассе Соданкюля– Горьковская (второй столбец) и НЗ на радиотрассе Кипр–Горьковская (третий столбец) за 14.02.2011 г. с 16:00 по 19:00 UT; (*б*) – Последовательность ионограмм ВЗ по ст. Соданкюля (первый столбец), НЗ на радиотрассе Соданкюля–Горьковская (второй столбец) и НЗ на радиотрассе Кипр–Горьковская (третий столбец) за 14.02.2011 г. с 20:00 по 23:00 UT.



Рис. 2. Окончание.

зывают также авроральным Es. Образования второго класса сушественно иррегулярны. К ним относятся слои типа *Esa*, отражение от которых характеризуется очень рассеянным следом с хорошо выраженным нижним краем. Критические частоты *Es* первого класса в спокойных условиях составляют 2–3 МГц. толшины порядка 10 км. а высоты обычно 120-130 км. Слой Es этого типа связывают с протонными высыпаниями на том основании, что зона их появления приблизительно совпадает с проекцией на ионосферу области протонов кольцевого тока. Пример для 16:00 UT можно видеть на рис. 2a (верхняя панель (a), слева). С 17:20 UT и до 18:50 UT появляются диффузные спорадические слои Es, пример на ионограмме ВЗ в 18:00 UT. Затем с 19:00 UT F2-отражения исчезают и появляются отражения от плоских (не диффузных) авроральных спорадических Es-слоев с групповым запаздыванием на конце. Это свидетельствует о том, что эти слои достаточно толстые. Пример показан на ионограмме в 19:00 UT. С 19:40 UT наблюдается мощная диффузность в слое F2 и интенсивные слои Es, пример на рис. 26 для ионограммы ВЗ в 20:00 UT. С 21:00 до 21:50 UT имеет место полное поглощение отраженных сигналов на ионограммах (пример ионограммы в 21:00 UT) в соответствии с данными по поглощению на рис. 1. Далее, начиная с 21:50 UT снова возникают интенсивные слои Es с групповым запаздыванием на конце, пример ионограммы в 22:00 UT. С 23:00 UT к отражениям от спорадических Es добавляются вновь F2-отражения сигналов (нижняя ионограмма).

### 4.1.2. Данные наклонного зондирования

Перейдем теперь к анализу ионограмм НЗ на трассе Соданкюля-Горьковская. Результаты исследования показывают следующее. С 16:00 до 17:15 UT наблюдаются 3 луча, отраженных от слоя F2, в результате односкачкового, двухскачкового и трехскачкового распространения. Имеет место небольшая диффузность верхних лучей. Присутствует также отражение от спорадического слоя Es, на рис. 2a две верхних ионограммы для 16:00 и 17:00 UT. В 17:15 UT наблюдается два F2-луча плюс *Es*-отражение. С 17:20 до 18:45 UT имеет место уже один F2-луч (диффузный) и Es-отражение, ионограмма для 18:00 UT. С 18:50 UTостаются только *Es*-отражения, ионограмма для 19:00 UT. Далее с 19:10 до 21:30 UT наблюдаются мощные Es-отражения с одним и двумя скачками, ионограммы для 20:00 и 21:00 UT. Ионограмма в 21:45 UT демонстрирует полное поглощение сигналов (их отсутствие) в соответствии с рис. 1. С 22:00 UT наблюдаются Es-отражения и иногда F2-отражения, ионограммы на рис. 26 для 22:00 и 23:00 UT. С 23:10 UT и до конца дня появляются

уже стабильно *F*2-отражения и затем с 23:40 UT до конца дня пропадают *Es*-отражения.

## 4.1.3. НЗ на среднеширотной трассе

Рассмотрим в заключение ионограммы НЗ на трассе Горьковская-Кипр. Точка отражения этой трассы, как указывалось выше, находится над г. Кишиневом, и эффекты суббури на этой среднеширотной трассе, как показывает анализ, иные, чем на трассе Соданкюля-Горьковская. А именно, с 16:00 до 16:55 UT на ионограммах наблюдаются 3 отражения – в результате соответственно односкачкового, двухскачкового и трехскачкового распространения, пример на ионограмме в 16:00 UT, рис. 2а. Далее с 17:00 до 18:15 UT остаются только 2 отражения – односкачковое и двускачковое, см. ионограммы в 17:00 и 18:00 UT. С 18:20 UT и до конца дня имеет место только односкачковое отражение. При этом значения F2 МНЧ с 16:00 до 19:20 UT падают с 16 до 13 МГц. Однако с 19:25 до 20:15 UT происходит рост F2 МНЧ до 14 МГц (см. ионограмму в 20:00 UT). В этом интервале проявляется эффект суббури, поскольку в нормальных условиях этого быть не должно. Данный интервал соответствует второму максимуму в *AE*-индексе (*AE* > 500 нТл) на рис. 1. С 20:20 UT происходит спад F2 МНЧ до конца дня, как можно видеть из ионограмм в 21:00, 22:00 и 23:00 UT на рис. 2б. Эффекта поглощения сигналов в промежутке с 21:00 до 22:00 UT (рис. 1) здесь не наблюдается.

Представляет интерес на качественном уровне сравнить за период суббури характер отражений на ионограммах ВЗ и НЗ на рис. 2*a*, *б* в один и тот же момент времени (по горизонтали). Рассмотрим кратко каждые три ионограммы на рис. 2 сверху вниз. Для удобства изложения ионограммы обозначены цифрами: Соданкюля – 1, Соданкюля – 2 и Горьковская – Кипр – 3.

16:00 UT. 1 – Отражения 1*Es*, 1*F*2, 2*F*2, 3*F*2, 4*F*2 все диффузные. 2 – 1*Es*, 1*F*2, 2*F*2, 3*F*2 все диффузные. 3 – 1*F*2, 2*F*2.

17:00 UT. 1 — Отражения 1Es,1F2 все диффузные. 2 — 1Es, 1F2, 2F2, 3F2 все диффузные. 3 — 1F2, 2F2.

18:00 UT. 1 – Отражение 1*Es* диффузное. 2 – 1*Es*, 1*F*2 диффузное. 3 – 1*F*2, 2*F*2.

19:00 UT. 1 – Отражения 1*Es*, 2*Es*, 3*Es* все плоские. 2 – 1*Es* диффузный. 3 – 1*F*2.

20:00 UT. 1 — Многоскачковые *Es*, диффузность в *F*2-слое. 2 — 1*Es*, 2*Es*. 3 — 1*F*2.

21:00 UT. 1 — Полное поглощение сигналов. 2 - 1Es, 2Es. 3 - 1F2.

22:00 UT. 1 – Отражения 1*Es*, 2*Es*. 2 – 1*Es*. 3 – 1*F*2. 23:00 UT. 1 – Отражения 1*Es*, 1*F*2. 2 – 1*Es*. 3 – 1*F*2.

Таким образом, можно видеть качественное сходство данных B3 ст. Соданкюля и H3 на трассе Соданкюля—Горьковская. Как указывалось выше, расстояние между ст. Соданкюля и точкой отражения трассы Соданкюля—Горьковская составляет 400 км. Тем самым процессы в ионосфере во время суббури качественно близки в пределах 400 км. Однако имеет место отличие указанных данных B3 и H3 от данных H3 на трассе Горьковская—Кипр.

#### 4.2. Учащенные ионограммы

Перейдем к анализу ионограмм с пятиминутными интервалами между ними. Здесь интересно знать, каков характер быстрой динамики ионосферы в пределах 5–10 мин во время суббури и каковы особенности этой динамики.

# 4.2.1. Данные ВЗ

Представляет интерес сначала рассмотреть данные ионозонда. На рисунке 3 приведены ионограммы ст. Соданкюля для специфических отражений сигналов и их вариаций. Исходя из всей совокупности данных, наиболее аномальные отражения имели место в пяти случаях за время геомагнитного возмущения: 1- с 19:30 до 19:40 UT; 2 – с 19:45 до 19:55 UT; 3 – с 20:45 до 20:55 UT; 4 – с 22:15 до 22:25 UT и 5 – с 23:40 до 23:50 UT. Все пять указанных сеансов представлены на рис. 3 последовательно сверху вниз. Из них прежде всего следует, что характер отражений на ионограммах быстро изменяется в пределах 5-10 мин. Так, из панели (*a*) на рис. 3 видно появление спорадического слоя *Es* (6.5–9.5 МГц) с наклонным треком в 19:35 UT и на следующей ионограмме – области диффузности (6–7.5 МГц). Панель ( $\delta$ ) демонстрирует существенные изменения характера отражений в области диффузности (4-7.5 МГц). Панель (в) показывает кратковременное возникновение мощных спорадических слоев Es и вариации облаков диффузности. Панель (г) демонстрирует вариации многослойных треков в области Es. Ионозонд B3 ст. Соданкюля работал в сложных условиях горизонтально неоднородной ионосферы, формируемой неоднородным ионизирующим потоком частиц, и, по-видимому, имеющей облачную структуру, особенно, на высотах Е-слоя ионосферы. В данных условиях ионограмма не имеет однозначного соответствия с вертикальной структурой ионосферы и следы на ионограмме могут формироваться боковыми отражениями. То есть многослойность в следах ионограммы не означает многослойности в геофизическом ионосферном слое. Из пятой панели ( $\partial$ ) (в середине) видно кратковременное появление spread F (6.5-8.5 МГц). Следует подчеркнуть, что рассмотренные здесь отражения во время суббури существенно отличаются от аномальных отражений (плоских, слоистых, диффузных, смешанных), полученных по данным сети отечественных станций ВЗ на средних широтах [Гивишвили и Лещенко, 2017].

### 4.2.2. Данные НЗ

Рассмотрим ситуацию по данным H3 на трассе Соданкюля—Горьковская. Рис. 4 показывает примеры ионограмм за те же самые интервалы, что и по ст. Соданкюля. Здесь за 5—10 мин также имеют место вариации в характере отражений сигналов, но не такие существенные, как по ст. Соданкюля. Так, из панели (*a*) видно возникновение *Es* с наклонным треком в 19:35 UT и рост *Es* MHЧ с 11 до 15 МГц за 5 мин. Панель ( $\delta$ ) демонстрирует мощные *Es*-отражения без диффузности. На панели (*в*) можно видеть также мощные *Es*-отражения, но с диффузностью в *F*2-слое. Из панели (*е*) видны изменения в значениях *Es* МНЧ за несколько минут. На последней панели ( $\partial$ ) отражения от *Es*-слоя отсутствуют, а имеются только *F*2-отражения.

### 4.2.3. Сравнение данных ВЗ и НЗ

Сравним данные ВЗ на рис. 3 и данные НЗ на рис. 4. Здесь целесообразно выделить элементы сходства и отличий.

Из первой панели (*a*) обоих рисунков видно наличие отражений от спорадических слоев *Es*. Причем на средних ионограммах панели имеет место *Es* с наклонным треком. В этом сходство. С другой стороны диффузность от слоя  $F^2$  на правой ионограмме B3 отсутствует на такой же ионограмме H3. В этом отличие.

Вторая панель ( $\delta$ ) показывает наличие мощных отражений от слоя *Es* как по данным B3, так и H3. Но данные B3 демонстрируют диффузность по слою *F*2, тогда как по данным H3 она отсутствует.

Из третьей панели (в) можно видеть наличие отражений от интенсивных *Es*-слоев на всех ионограммах. Но *F*2-диффузность по всем данным ВЗ проявляется только на двух последних ионограммах H3.

На четвертой панели (г) видны *Es*-отражения как по данным B3, так и по данным H3. Хотя структура этих отражений на ионограммах B3 несколько иная, чем на ионограммах H3. Пятая панель ( $\partial$ ) (конец возмущения) показывает существенные отличия в характере отражений на ионограммах B3 и H3. Если на первых фиксируются преимущественно мощные *Es*-отражения, то на вторых – *F*2-отражения и крайне слабые *Es*-отражения.

Таким образом, здесь общий вывод следующий. Характер отражений сигналов на ионограм-



Рис. 3. Ионограммы ВЗ ст. Соданкюля с аномальными отражениями.



Рис. 4. Ионограммы НЗ по радиотрассе Соданкюля-Горьковская, соответствующие ионограммам ВЗ на рис. 3.



Рис. 5. Ионограмма в 22:00 UT (время максимума суббури) за 14.02.2011 г. по ст. Никозия (Кипр).

мах ВЗ и НЗ во время магнитного возмущения в большинстве случаев близок на качественном уровне. Имеются отличия, которые, видимо, объясняются разносом между точками отражения ВЗ и НЗ в 400 км.

#### 4.3. Сравнение ионограмм

В силу существенного удаления точки отражения трассы Горьковская-Кипр (г. Кишинев) от точки отражения трассы Соданкюля-Горьковская и от ионозонда ст. Соданкюля процессы в ионосфере над г. Кишиневом должны заметно отличаться от первых двух (см. рис. 2), поскольку они характерны для средних широт. Данные ионозонда ст. Соданкюля, расположенного на широте больше 60° N, естественно, также существенно отличаются от данных ионозонда о-ва Кипр, расположенного на широте 35°. Пример сравнения двух ионограмм для 22:00 UT по ст. Соданкюля и по ст. Кипр можно видеть из рис. 2 и рис. 5. Из рис. 2 следует, что во время суббури в 22:00 UT на ионограмме ст. Соданкюля имеет место только отражение от толстого спорадического слоя Es с групповым запаздыванием. Тогда как в это же время на ионограмме ст. Кипр наблюдаются только первое и второе отражения по слою F2.

Заслуживающий внимания наблюдательный факт: по ст. Кипр был зафиксирован в поведении критической частоты *foF2* на ионограммах с 17:00 до 22:00 UT (на рис. 6) так называемый главный эффект (ГЭ) в ионосфере во время суббури [Blagoveshchensky et al., 2017]. В последней работе представлено схематическое изображение усредненных вариаций ионосферных параметров, в частности *foF2*, во время обобщенной суббури. Усреднение производилось методом наложения эпох по 72 суббурям продолжительностью To - Te = 2-3 ч, где *To* и *Te* – начало и конец активной фазы суббури. Исходными являются данные

ионозондов, расположенных в интервале геомагнитных широт 40°-70° N Европы, центральной Сибири и Северной Америки. В общем случае для классической суббури ГЭ заключается в следующем. Значения foF2 за 6-8 ч до момента To растут выше спокойного уровня, достигая максимума за 2-3 ч до То. Затем к моменту То происходит резкий спад значений foF2 до минимума, ниже спокойного уровня, и далее их подъем за время протекания взрывной фазы. Второй максимум имеет место через 1-2 ч после момента *Te*. Далее снова происходит спад значений foF2 до спокойного уровня в течение 3-4 ч после второго максимума. Что касается хода значений высоты максимума hmF2, то здесь она антикоррелирует по отношению к вариациям foF2. Чтобы ГЭ состоялся, параметры суббури должны удовлетворять, как правило, следующим условиям.

1. Амплитуда в *AE*-индексах в максимуме не менее 250–300 нТл.

2. Одиночная суббуря на спокойном фоне продолжительностью 5–7 ч, протяженность суббури 2–4 ч.

3. Резкое начало взрывной фазы.

4. Вечерне-ночной сектор местного времени в пределах 20–05 ч.

В рассматриваемом нами случае суббуря удовлетворяет всем перечисленным выше четырем пунктам. Для нее To = 20:30 UT. Из рисунке 6, где представлены вариации *foF2*, *hmF2* и медианы за период суббури, следует, что максимум *foF2* имеет место в ~18:00 UT, т.е. за 2.5 ч до *To*. Он превышает медианное значение почти на 1 МГц. Затем происходит резкий спад значений *foF2* к 19:00 UT, т.е. процесс идет в соответствии с поведением ГЭ. Второй максимум, однако, здесь не ярко выражен, поскольку суббуря носит не классический характер с одним максимумом *AE*-индекса, а состоит из двух – в 19:30 и 21:30 UT. Тем не менее, в



Рис. 6. Проявление главного эффекта в ионосфере во время суббури по ст. Кипр. Представлены три кривые: *foF2*, *hmF2* и медианы. По вертикальной шкале отложены значения в МГц для *foF2* и медианы, а значение в км  $\times 100$  означает, что цифру на шкале надо увеличить в 100 раз, чтобы получить величину *hmF2*, км.

рассматриваемом случае на начальной фазе суббури имеет место ГЭ с отчетливым максимумом *foF2* перед началом суббури. Что касается значений высоты максимума *hmF2*, то его вариации, как следует из рис. 6, антикоррелируют по отношению к ходу *foF2*, что характерно для ГЭ.

# 5. ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований сводятся к следующим.

1. Обнаружены быстропротекающие процессы (в пределах 5–10 мин) в высокоширотной ионосфере во время интенсивной геомагнитной суббури по данным ВЗ ст. Соданкюля. К ним относятся основные 6 эффектов: спорадические *Es*-слои с наклонным треком, многослойность треков в *Es*-слоях, аномальные *spread F*, выраженные слои в диффузных *F*-образованиях, быстрые изменения значений *Es* МНЧ, многоскачковые *Es*-отражения сигналов. Выявленные здесь отражения во время суббури существенно отличаются от аномальных отражений (плоских, слоистых, диффузных, смешанных), полученных по данным сети станций ВЗ на средних широтах.

2. Наиболее устойчивыми во время суббури являются спорадические *Es*-слои, которые существуют более длительное время, чем 10 мин, как в виде толстых (с групповым запаздыванием), так и в виде тонких без запаздывания. Мощные по интенсивности сигнала отражения имеют место во время максимума суббури. Однако высокая сте-

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ том 59 № 4 2019

пень поглощения в это время приводит к полному исчезновению отраженных сигналов на ионограммах ВЗ и НЗ трассы Соданкюля—Горьковская. Другим регулярным эффектом во время суббури можно считать диффузность в F2-слое ионосферы.

3. Ионограммы ВЗ и НЗ при их сравнении показывают следующие закономерности.

Обнаружено качественное сходство данных ВЗ ст. Соданкюля и НЗ на трассе Соданкюля-Горьковская. Расстояние между ст. Соданкюля и точкой отражения трассы Соданкюля-Горьковская составляет 400 км в южном направлении. Тем самым процессы в ионосфере во время суббури качественно близки в пределах 400 км. Зато имеет место отличие указанных данных ВЗ и НЗ от данных НЗ на трассе Кипр-Горьковская. Расстояние между точкой отражения ионозонда ст. Соданкюля и точкой отражения трассы Кипр-Горьковская (г. Кишинев) составляет 2250 км. Здесь даже качественное сходство процессов в ионосфере во время суббури не наблюдается, хотя суббуря вызывает кратковременное повышение электронной концентрации Ne в области ионосферы над г. Кишиневом.

4. На ионозонде о-ва Кипр был зафиксирован так называемый главный эффект (ГЭ) в ионосфере во время суббури. Он наблюдался в поведении критических частот *foF2* и высоты максимума *hmF2* на ионограммах. Данный результат является несколько необычным, поскольку ГЭ в максимальной степени обычно проявляется на широтах  $45^{\circ}$ - $60^{\circ}$  N.

# 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность службам ст. Соданкюля за возможность использования их геофизических данных в Интернете и Д.Д. Рогову за предоставление данных вертикального зондирования (ВЗ) и наклонного зондирования (НЗ) ионосферы Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (ААНИИ). Особая благодарность – Кристине Ойкономоу (Christina Oikonomou) за предоставление ионограмм о-ва Кипр (г. Никозия).

# 7. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 18-05-00343.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*— Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Пространственно-временны́е характеристики аномальных отражений от ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 4. С. 472–480. 2017. - Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A.V. Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. 2017. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.013

- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge: Cambridge University Press. P. 477–482. 2003.

- Kurkin V.I., Polekh N.M., Pirog O.M., Moshkova V.A., Poddel'sky I.N. Ionospheric disturbances in the years of solar activity minimum and their influence on HF radiowave propagation // Geomagn. Aeronomy. V. 49. № 8 (Special Issue 2). P. 1249–1253. 2009. - Lyons L.R. Substorms: Fundamental observational features, distinction from other disturbances, and external triggering // J. Geophys. Res. V. 101. P. 13011–13025. 1996.

- Uryadov V.P., Ponyatov A.A., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Kurkin V.I., Ponomarchuk S.N. Dynamics of the auroral oval during geomagnetic disturbances observed by oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector // Int. J. Geomagn. Aeron.  $\mathbb{N}$  6. GI1002. P. 1– 13. 2005.

- Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Uryadov V.P. Oblique chirp sounding and modeling of ionospheric HF channel at paths of different length and orientation // Int. J. Geomagn. Aeron. № 7. GI2002. P. 1–18. 2007.