

УДК 550.388.2

## ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ТРАНСАВРОРАЛЬНОЙ КВ РАДИОТРАССЕ

© 2011 г. Д. В. Благовещенский<sup>1</sup>, Д. Д. Рогов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

e-mail: [dvb@aanet.ru](mailto:dvb@aanet.ru)

Поступила в редакцию 17.08.2010 г.

После доработки 26.10.2010 г.

Рассмотрены результаты эксперимента, проведенного в мае 2002 г. на радиотрассе Санкт-Петербург – Шпицберген длиной  $D = 2150$  км, оборудованной аппаратурой наклонного зондирования ионосферы (НЗИ). Выявлены особенности ионограмм НЗИ при различной степени магнитной активности и проведено сравнение этих ионограмм с данными вертикального зондирования (ВЗ) обс. Соданкюля, Финляндия. Последняя расположена вблизи точки отражения рассматриваемой трассы. К анализу ионограмм НЗИ и ВЗ привлекались данные риометра в Соданкюле для оценки аврорального поглощения. Показаны преимущества метода наклонного зондирования ионосферы как диагностического средства ионосферной плазмы перед вертикальным зондированием в высоких широтах. Эти преимущества в основном сформулированы для магнито-возмущенных периодов: при наличии событий *B* (black-out), во время существования аномальных спорадических *Es*-образований и ряда других явлений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера, как известно, является весьма динамичной и изменчивой структурой. Она изучается с помощью различных методов наблюдений, к числу которых относится вертикальное и наклонное зондирование. Первый метод успешно используется на широкой сети ионозондов по всему миру, второй – на менее широкой сети КВ радиотрасс. Определенное количество ионозондов и трасс с наклонным зондированием специально предназначены собирать данные о параметрах высокоширотной ионосферы и радиоканалов в различных условиях. Это позволяет производить диагностику состояний ионосферы в реальном времени для практических нужд, а также реализовывать модели ионосферы и методики ее прогнозирования, важные для использования, например, в радиосвязи, навигации, загоризонтной локации. Экспериментальные исследования, проведенные до настоящего времени [Андреев и др., 2007; Благовещенский и др., 2009; Blagoveshchensky et al., 2005a, 2005b, 2008], в некоторых случаях свидетельствуют о том, что в высоких широтах ионограммы НЗИ значительно более информативны, чем ионограммы ВЗ, особенно во время магнитных возмущений. Этот вопрос до конца еще не исследован и нуждается в специальном дополнительном анализе. Главная цель работы – показать преимущества метода наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) как диагностического средства ионосферной плазмы перед вертикальным зондированием (ВЗ) в высоких широтах для возмущенных условий. Представляется целесообразным

выявить особенности ионограмм НЗИ на примере радиотрассы Санкт-Петербург–Шпицберген при различной степени магнитной активности и сравнить эти ионограммы с данными ионозонда обс. Соданкюля, Финляндия. Последняя расположена вблизи точки отражения рассматриваемой трассы, и ее данные по ионосфере в наилучшей степени могут быть использованы для исследований.

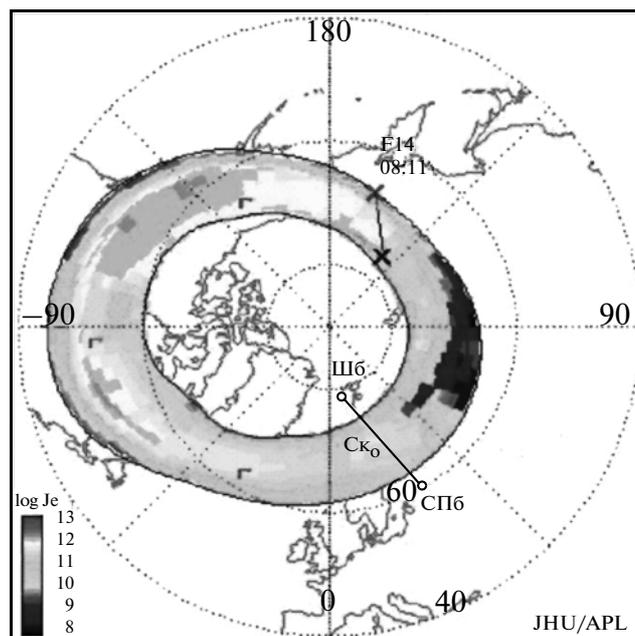
### 2. ОПИСАНИЕ РАДИОТРАССЫ НЗИ

Радиотрасса Санкт-Петербург–Шпицберген (Баренцбург) длиной  $D = 2150$  км направлена приблизительно вдоль долготного меридиана и перпендикулярна по отношению к авроральному овалу, рис. 1. На рисунке овал построен по данным системы OVATION (<http://www.jhuapl.edu>). Передатчик в Санкт-Петербурге и приемник в Баренцбурге расположены на геомагнитных широтах  $56.5^\circ$  N и  $75.2^\circ$  N соответственно. Точка отражения трассы лежит на геомагнитной широте  $65.5^\circ$  между Мурманском и Тромсе, а обсерватория Соданкюля находится ближе всего к точке отражения, рис. 1. Трасса оборудована аппаратурой НЗИ [Mirokhin et al., 1994], которая позволяет фиксировать основные параметры и характеристики распространяющихся радиоволн в диапазоне частот от 3.5 до 27.5 МГц. К числу этих параметров относятся текущие моды распространения (многолучевость), значения максимально наблюдаемой (МНЧ) и наименьшей наблюдаемой ННЧ частот, задержки сигналов во времени, явления рассеяния и поглощения в сигналах и др. Зондирование производится на 48-ой минуте каждого часа кругло-

суточно. Исследовались ионограммы НЗИ, полученные за период с 11 по 31 мая 2002 г. Общее число ионограмм составило около 500 единиц. Однако небольшая часть ионограмм не является информативной, поскольку во время сильных геомагнитных возмущений сигнал на трассе полностью поглощается. В настоящей работе, как указывалось, ставилась задача рассмотреть особенности распространения КВ на трассе при различной степени геомагнитной активности, оцениваемой в  $Kp$ -индексах. Выбирались следующие градации: если суточное значение  $\Sigma Kp < 15$ , то день считался слабо возмущенным; при  $15 \leq \Sigma Kp \leq 25$  день считался как средне возмущенный; и, наконец, при  $\Sigma Kp > 25$  день считался как сильно возмущенный. Исследуемый период с 11 по 31 мая характеризовался всеми тремя степенями магнитной активности. Слабо и средне возмущенный периоды наблюдались чаще, сильно возмущенный период – реже. Радиотрасса Санкт-Петербург–Шпицберген относится к числу трансавроральных, поскольку приемник расположен в полярной шапке, передатчик – в субавроральной зоне, и точка отражения трассы находится преимущественно в авроральном овале, рис. 1. Следовательно, геомагнитная активность в значительной степени должна влиять на состояние радиоканала и условия распространения радиоволн в нем.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

**3.1. Анализ данных НЗИ.** Полярная ионосфера, как отмечалось во введении, является крайне нестабильной и динамичной средой. Поэтому исследуемый радиоканал НЗИ Санкт-Петербург – Шпицберген обладает большой неустойчивостью и значительными вариациями параметров. Фактически, как показал анализ, все 500 ионограмм НЗИ отличны друг от друга, даже если они получены в одинаковых геофизических условиях. Чтобы выявить определенные закономерности в характере распространения волн и состоянии ионосферы, необходимо провести надлежащий подбор и упорядочение данных. А именно, из всей совокупности ионограмм НЗИ были сначала выбраны две группы данных: первая получена для дневных условий (14:48 UT), а вторая соответствует ночным условиям (02:48 UT). Здесь произведена привязка времени к средней точке трассы таким образом, чтобы днем ближайший сеанс НЗИ соответствовал полдню, а ночью – полуночи. Отметим, что для obs. Соданкюля, как средней точки трассы, LT = UT + 2 ч.. Далее отдельно взятая группа была разделена на подгруппы. Каждая подгруппа включала в себя ионограммы НЗИ, полученные для определенной магнитной активности, то есть слабой, средней и сильной именно так, как было указано выше. Итого, для анализа было подготовлено 6 наборов данных – три для полдня и три для полуночи. Каждый из трех наборов характеризовался конкретным уровнем магнитной активности.



**Рис. 1.** Положение радиотрассы Санкт-Петербург–Шпицберген относительно аврорального овала (OVATION) для 12.05.2002 г.,  $t = 08:48$  UT. Обозначения: Шб – Шпицберген, Ск – Соданкюля, СПб – Санкт-Петербург.

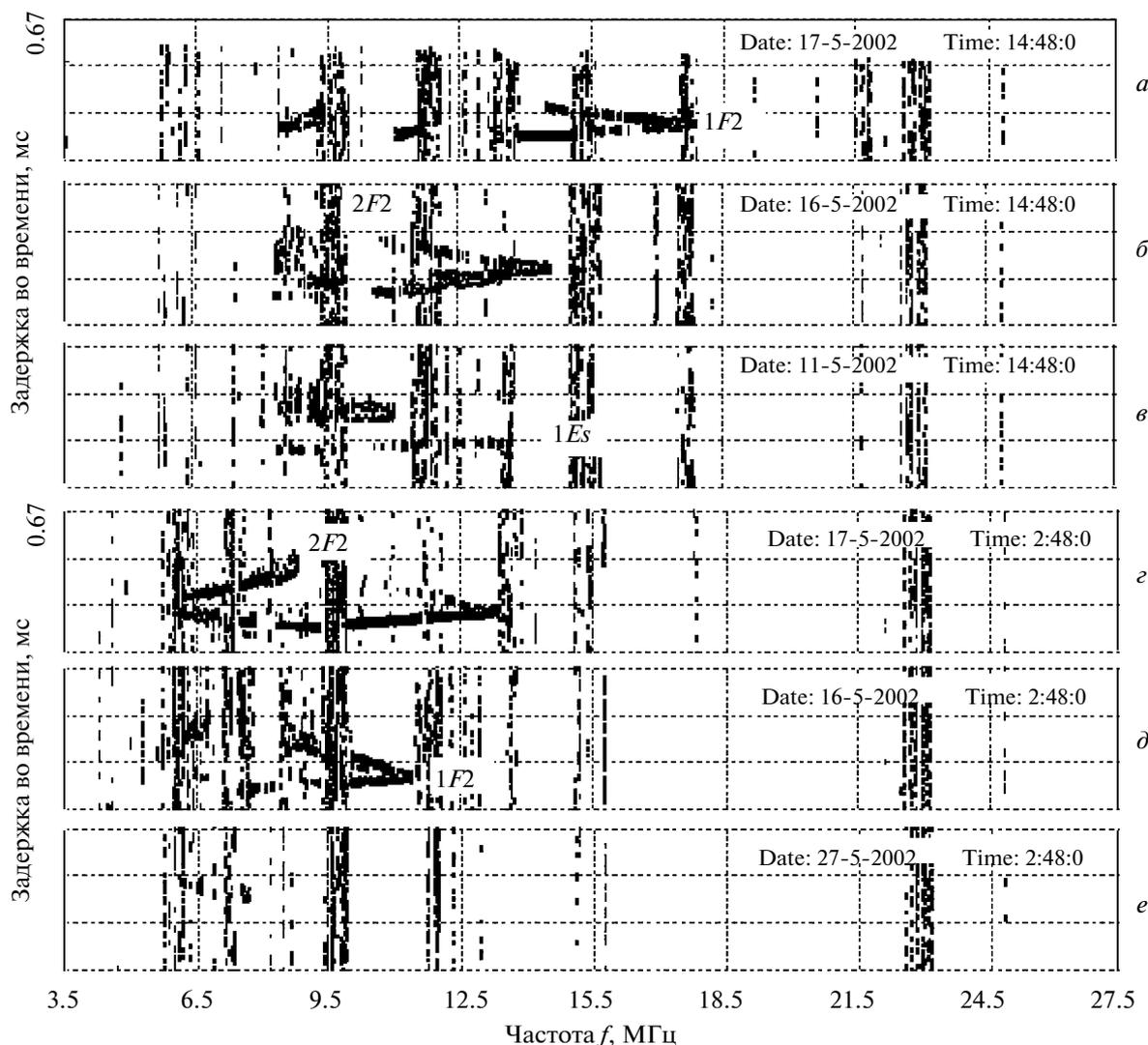
Как указывалось выше, даже в одинаковых условиях (по времени суток и магнитной активности) ионограммы НЗИ отличаются друг от друга. Эти отличия прежде всего сказываются в значениях МНЧ и ННЧ, характере модовой структуры сигнала, а также в уровне поглощения и степени рассеяния. Рассмотрим всю совокупность соответствующих данных.

а) Дневные условия (14:48 UT), слабо возмущенный период,  $\Sigma Kp < 15$ . На ионограммах преимущественно присутствуют моды  $1F2 + 2F2$ . Иногда к ним добавляются моды  $1F1$ , а также  $1Es$ ,  $2Es$  или  $1E$ ,  $2E$ . Значения  $F2$ МНЧ лежат в пределах от 13 до 18.5 МГц. Мода  $2F2$  иногда подвержена рассеянию.

б) Дневные условия, средняя магнитная возмущенность,  $15 \leq \Sigma Kp \leq 25$ . Здесь в основном наблюдаются моды  $1F2$ , иногда вместе с  $1F1$ ,  $1Es$ ,  $2Es$  (или  $1E$ ,  $2E$ ). Для моды  $2F2$  характерно рассеяние. Значения  $F2$ МНЧ сосредоточены в интервале от 13 до 17 МГц.

в) Дневные условия, сильное возмущение,  $\Sigma Kp > 25$ . Моды  $1F2 + 1Es$  преобладают. Мода  $2F2$  имеет рассеянный характер, ее сигнал ослаблен из-за поглощения. Сильное поглощение 23 мая при  $\Sigma Kp = 38+$  привело к полному ослаблению сигнала на трассе. Пределы вариаций  $F2$ МНЧ составляют 10.5–14 МГц.

г) Ночные условия (02:48 UT), слабое возмущение,  $\Sigma Kp < 15$ . Наиболее частыми модами являются  $1F2 + 2F2 + 1Es$  (редко). Ощутимо рассеяние сигнала.



**Рис. 2.** Ионограммы НЗИ, характерные для различных условий: верхние три – день, нижние три – ночь; (а), (е) – слабое возмущение; (б), (д) – среднее возмущение; (в), (е) – сильное возмущение.  $1F2$ ,  $2F2$ ,  $1Es$  – моды распространения.

ла. Однако заметного поглощения не наблюдается. Значения  $F2MНЧ$  лежат в пределах от 10 до 15 МГц.

д) Ночные условия, средняя магнитная активность,  $15 \leq \Sigma Kp \leq 25$ . Моды аналогичны предыдущему случаю:  $1F2 + 2F2 + 1Es$  (редко), однако для моды  $2F2$  часто наблюдается рассеяние. Поглощение сигнала явно не выражено. Разброс значений  $F2MНЧ$  велик и лежит в пределах от 9.5 до 18 МГц.

е) Ночные условия, сильная магнитная активность,  $\Sigma Kp > 25$ . Как правило, имеет место рассеяние сигнала даже на моде  $1F2$ . Поглощение велико, вплоть до полного исчезновения сигнала на трассе. Значения  $F2MНЧ$  низки, порядка 8 МГц и менее.

Представляется целесообразным наглядно проиллюстрировать специфику ионограмм НЗИ, описанных выше в пунктах а) – е). Для этого из каждой подгруппы данных была выбрана одна реальная ионограмма в качестве представителя этой группы.

Структура и содержание данной ионограммы НЗИ является среднестатистической и наиболее часто встречаемой по сравнению с другими ионограммами из подгруппы. Естественно, что эти другие ионограммы чем-то отличаются от выбранной, как упоминалось. Рисунок 2 демонстрирует 6 реальных ионограмм НЗИ с указанием даты и времени наблюдений. Справа от ионограмм на рис. 2 указаны позиции а) – е), которые как раз соответствуют описанным выше. Следовательно, верхняя ионограмма (а) соответствует дневным условиям и слабой магнитной возмущенности, а третья сверху (в) тоже соответствует дневным условиям, но сильной магнитной возмущенности. Три нижние ионограммы являются ночными, нижняя (е) характеризуется сильной магнитной активностью. Из рисунка 2 можно видеть определенные закономерности. Как в дневных, так и ночных условиях рост магнитной активности при-

водит к уменьшению значений  $F2MНЧ$  и повышению степени рассеяния сигнала. Отличие дневных и ночных ионограмм состоит в том, что значения  $F2MНЧ$  в среднем днем выше, чем ночью. Представляет интерес количественно оценить, насколько быстро происходит спад значений  $F2MНЧ$  в зависимости от  $\Sigma Kp$ -индекса. Рисунок 3 демонстрирует данные закономерности для дневных условий (а) и соответственно ночных (б). Сплошные линии построены по всем имеющимся данным, они показывают общие тенденции изменений. Из рисунка можно видеть, что для ночных условий разброс данных относительно средней линии существенно выше, чем для дневных. Это соответствует физическим представлениям о том, что ночью полярная ионосфера более изменчива, чем днем. К тому же следует отметить следующие экспериментальные факты, которые вносят дополнительные разбросы параметров сигналов на трассе. 1) Моды распространения и значения МНЧ существенно зависят от предыстории в степени магнитной активности из-за инерционности ионосферы. Так, если накануне рассматриваемого спокойного дня имело место сильное возмущение, то в этот спокойный день очень вероятно рассеяние сигнала и низкие значения МНЧ. Если накануне спокойно, а возмущение развивается в начале рассматриваемого дня, то ночью характер ионограмм НЗИ аналогичен спокойным условиям. Указанные обстоятельства отчетливо наблюдаются, если характеризовать возмущение в течение дня в виде  $\Sigma Kp$ -индекса. 2) Параметры распространения на ионограммах проявляют заметную изменчивость во время суббурь (как ночных явлений), которые  $\Sigma Kp$ -индекса не описывают. Примеры ионограмм в одно и тоже время суток показаны на рис. 4. Верхние три относятся к 17–18 мая 2002 г. Суббуря с амплитудой 200 нТл имела место с 22:00 UT 17.05 до 01:00 UT 18.05. То есть “спокойные” ионограммы (а) и (б) зафиксированы вне суббури, а ионограмма (в) – во время нее. Для ионограммы (в) характерно рассеяние сигнала и низкое значение МНЧ. Нижние четыре ионограммы относятся к 26–27 мая. Здесь суббуря с интенсивностью 350 нТл имела место за интервал с 22:00 UT 26.05 до 03:00 UT 27.05. Ионограммы (г) и (ж) сняты в спокойных условиях, а (д) и (е) – во время суббури. На последних двух (д) и (е) можно видеть рассеяние сигнала и низкие значения МНЧ, отличные от представленных на ионограммах (б) и (в).

**3.2. Анализ данных ВЗ.** Для всех 500 ионограмм наклонного зондирования за период наблюдений с 11 по 31 мая 2002 г. были рассмотрены соответствующие ионограммы вертикального зондирования ионосферы по обс. Соданкюля (Финляндия). Как указывалось выше, Соданкюля может быть приблизительно принята в качестве места, непосредственно расположенного под точкой отражения радиотрассы Санкт-Петербург–Шпицберген. Поэтому ее данные ВЗ в определенной степени приемлемы для решения поставленной в настоящей работе задачи –

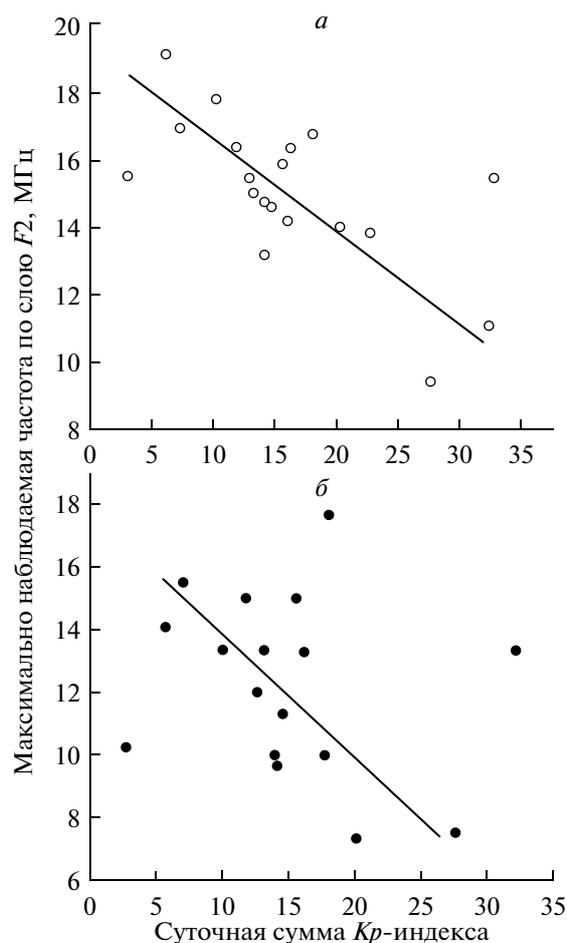


Рис. 3. Зависимости максимально наблюдаемых частот на трассе от  $\Sigma Kp$ -индексов; (а) – день, (б) – ночь, май 2002 г.

сравнение эффективности методов НЗ и ВЗ ионосферы как средств диагностики высокоширотной ионосферы. Указанный период с 11 по 31 мая (21 полный день) характеризовался различной степенью возмущения за счет геомагнитной активности. Выяснилось, что общее число сильно возмущенных дней с  $\Sigma Kp > 25$  было 4 (11, 14, 23 и 27 мая), сумма дней со средней возмущенностью  $15 \leq \Sigma Kp \leq 25$  составила 8 (12, 15, 16, 18, 20–22 и 28 мая) и количество дней с  $\Sigma Kp < 15$  (13, 17, 19, 24–26 и 29–31 мая) было самым большим, всего 9. Анализу подлежали все дни из каждой группы, объединяющей ионограммы ВЗ по трем степеням возмущенности. Отметим, что данные ВЗ обс. Соданкюля характеризуют ионосферу главным образом аврорального овала, где весьма вероятными являются высыпания частиц, полярные сияния, авроральное поглощение, развитие токовых структур и т. д. Было выявлено, что в силу неустойчивости высокоширотной ионосферы из всей совокупности двадцати одного дня мая восемнадцать дней (более 85%) характеризуются параметрами ионосферы, существенно отличающимися от

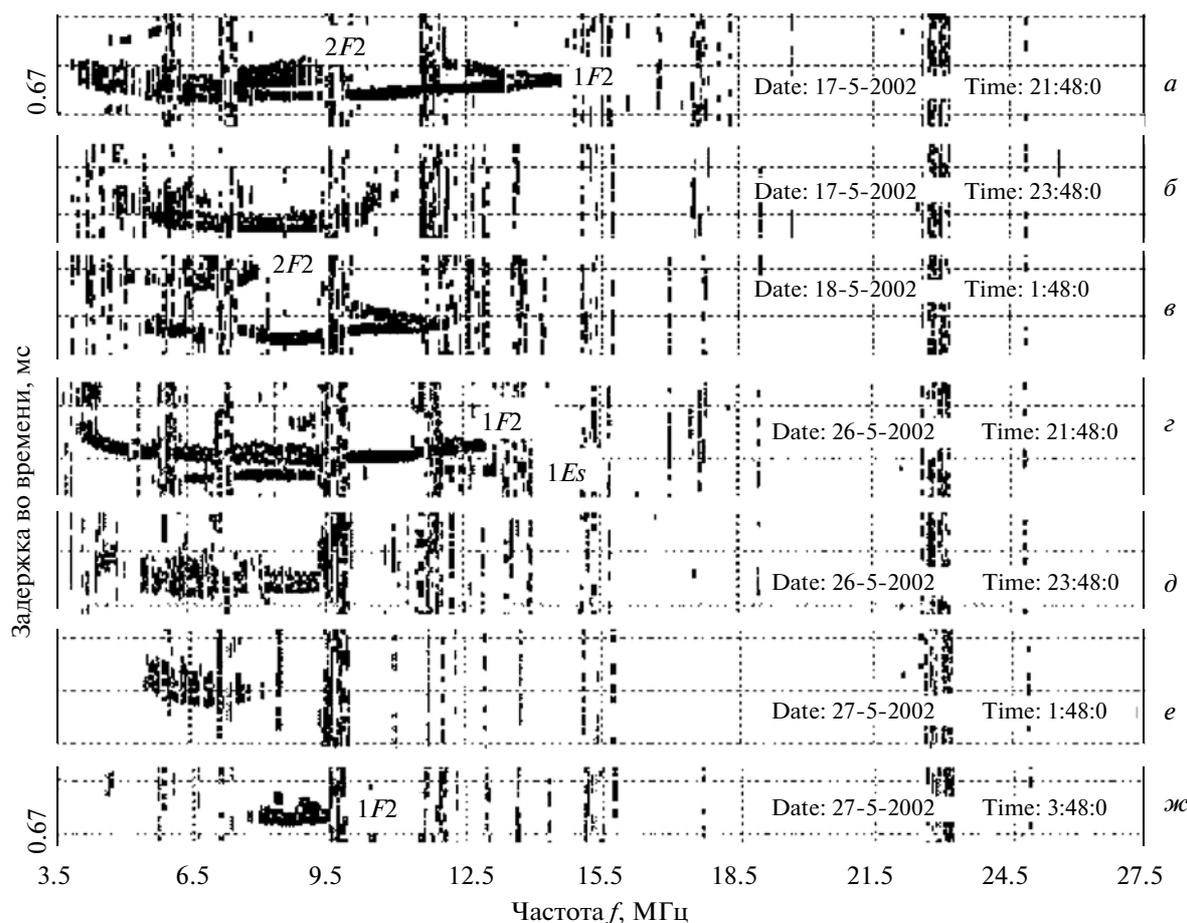


Рис. 4. Ионограммы НЗИ за период суббури. Верхние три — для суббури с интенсивностью  $I = 200$  нТл и с продолжительностью  $\Delta t = 22:00\text{--}01:00$  UT. Нижние четыре ионограммы — для суббури с  $I = 350$  нТл и с  $\Delta t = 22:00\text{--}03:00$  UT.  $1F2$ ,  $2F2$ ,  $1Es$  — моды распространения.

месячной медианы. К числу аномальных проявлений (отличия от медианы) относятся наиболее характерные: 1) событие *B* (black-out), когда ВЗ отражения от ионосферы по всем слоям полностью отсутствуют наиболее вероятно из-за повышенного поглощения; 2) наличие только *Es*-отражений без отражений от *F2*, *F1* и других слоев; 3) наличие только *F2* и *Es*-отражений, хотя должны быть и другие; 4) случаи близости критической частоты слоя *Es* к критической частоте слоя *F2* ( $foEs \geq foF2$  или  $foEs \leq foF2$ ). Рассмотрим характерные особенности в суточном ходе критических частот для дней с различной степенью возмущенности.

Пример вариаций параметров ионосферы за слабо возмущенный день 19 мая и их отличий от месячной медианы показан на рис. 5. На верхнем рисунке (*a*) показан усредненный за май 2002 г. медианный суточный ход критических частот основных слоев ионосферы по obs. Соданкюля. Рисунок 5*б* демонстрирует суточный ход критических частот за 19 мая. Подчеркнем, что день 19 мая по выбранной нами классификации относится к дням именно со слабым возмущением, поскольку его  $\Sigma Kp = 14+$ , и

здесь формально  $\Sigma Kp < 15$ . Из рисунка 5*б* можно видеть, что хотя день 19 мая и является слабо возмущенным, отличия в суточном ходе критических частот этого дня от медианных значений существенны. Так, 19 мая имеют место два события *B* в 03:00 и 11:00 LT. Только *Es*-отражения имеют место в 02:00 и 04:00 LT. Только *F2* и *Es*-отражения, хотя должны быть, например, и *F1*-отражения, можно видеть в 05:00 LT. Ситуация, когда  $foEs \geq foF2$ , произошла в 02:00 и 16:00 LT, а когда  $foEs \leq foF2$  — в 05:00, 19:00 и 21:00 LT. Здесь же имеют место необычные для слабо возмущенных дней *Es*-отражения с весьма высокими значениями  $foEs$  с 00:00 до 09:00 LT и с 15:00 до 21:00 LT. Все перечисленные отличия (отклонения) от медианы скорее всего можно объяснить тем, что согласно данным финской цепочки магнетометров 19 мая имели место небольшие возмущения магнитного поля (с амплитудой менее 100 нТл) за периоды 00:00–14:00 LT и 16:00–23:00 LT. При этом риометры по obs. Соданкюля зафиксировали два максимума поглощения в 03:00 и 11:00 LT со значениями 1.1 и 1.3 дБ. Указанные максимумы поглощения совпадают по времени с событиями *B* на рис. 5*б* и являются

главной причиной возникновения этих событий. Таким образом, даже в период слабого возмущения, в зоне полярных сияний наблюдаются существенные отклонения параметров ионосферы от месячных медианных значений.

Как указывалось, за рассматриваемый период с 11 по 31 мая более 85% всех ионограмм ВЗ по обс. Соданкюля имеют отклонения параметров ионосферы от месячной медианы. В приблизительно спокойных условиях 17 мая ( $\Sigma Kp = 10+$ ), 24 мая ( $\Sigma Kp = 3$ ), 25 мая ( $\Sigma Kp = 7+$ ) и 31 мая ( $\Sigma Kp = 6$ ) отклонения минимальны, хотя тоже имеют место, что и следовало ожидать. Что касается слабо и средне возмущенных условий, то количество ионограмм с параметрами ионосферы, отличными от медианных значений, здесь заметно возрастает – пример был рассмотрен на рис. 5. Наибольший интерес представляют сильно возмущенные условия с  $\Sigma Kp > 25$ . Таких дней четыре: 11 мая с  $\Sigma Kp = 32+$ , 14 мая с  $\Sigma Kp = 33-$ , 23 мая с  $\Sigma Kp = 38+$  и 27 мая с  $\Sigma Kp = 28-$ . Основная особенность данных дней состоит в том, что здесь увеличена продолжительность и общее количество событий *B*. В конце и начале событий *B* (даже если они случаются в дневные часы) практически всегда возникают *Es*-отражения. В вечернее время, начиная примерно с 16:00 LT и до конца дня наиболее часто имеют место только *Es*- и *F2*-отражения. Подобная картина наблюдается и в послеполуденные несколько часов (если отсутствуют события *B*). В дневное время *Es*-отражения также случаются, хотя и эпизодически. Таким образом, для сильно возмущенных дней характерны продолжительные события *B* и *Es*-отражения, которые наиболее вероятно встречаются в пред- и послеполуденные часы, а также встречаются днем.

**3.3. Анализ данных риометра.** Представляется целесообразным изучить особенности вариаций поглощения по данным риометра, поскольку именно поглощение является одним из основных факторов ослабления (вплоть до полного исчезновения) сигналов, отраженных от ионосферы как в случае вертикального, так и наклонного ее зондирования. Известно, что метод измерения поглощения космического радиоизлучения (РИОМЕТР) используется для изучения ионизации нижней ионосферы высоких широт, где аномальная ионизация приводит к авроральному поглощению и поглощению типа полярной шапки [Дриацкий, 1974]. Поскольку объектом изучения в настоящей работе является область аврорального овала, где расположена обс. Соданкюля и точка отражения радиотрассы, то дальнейший анализ относится к авроральному поглощению. Сначала был исследован характер связи между степенью геомагнитной возмущенности по данным магнетометра обс. Соданкюля и уровнем поглощения за май 2002 г. Рассматривалась горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Получено, что ночью повышенное поглощение возникает на фоне отрицательных бухт магнитного поля. Днем

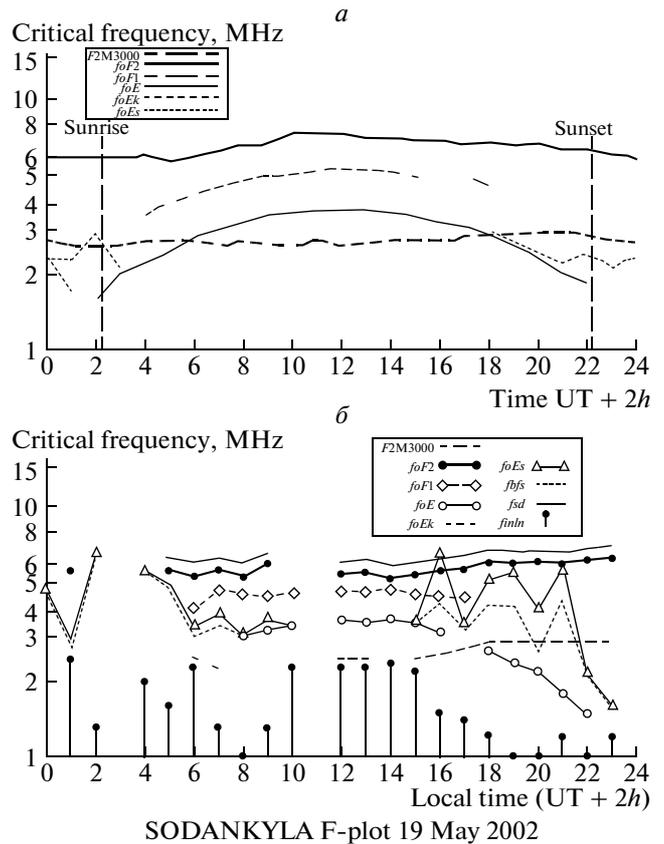


Рис. 5. Данные обс. Соданкюля (Финляндия): (а) – медианные за май 2002 г. вариации критических частот ионосферы, (б) – вариации критических частот за 19 мая 2002 г.

рост поглощения возможен при спокойном магнитном поле. В вечерние часы положительные бухты преобладают за периоды повышенного уровня поглощения. Данные результаты не находятся в противоречии с выводами, полученными в работе [Дриацкий, 1974].

Далее была произведена оценка, каким образом степень поглощения (в децибелах) влияет на характер отражения сигналов ионозонда обс. Соданкюля. Рассматривались все три ситуации – слабо возмущенные, средние и сильно возмущенные условия. По данным риометра обс. Соданкюля ( $f = 30$  МГц) были выбраны из всех исходных 21 дня те характерные дни, когда наблюдались пики повышенного поглощения. Таких дней оказалось 15, среди которых имелись дни со слабой (4), средней (7) и сильной (4) магнитной возмущенностью. Причем уровни повышенного поглощения в течение 5-ти дней не приводили к событию *B*, и соответственно повышенное поглощение в течение 10-ти дней вызывало событие *B*. Что касается указанных 5-ти дней, то как следует из анализа, пики поглощения по статистике за эти дни имели уровни менее  $1 \pm 0.1$  дБ. Во время существования пиков с данными уровнями на ионо-

граммах ВЗ, как правило, присутствовали не только обычные для данного времени отражения, но и дополнительные спорадические *Es*-отражения с большими предельными частотами  $f_oEs$  (например, см. рис. 5б, интервал 16–21 LT). В течение 10-ти дней, отмеченных выше, уровни поглощения превышали  $1 \pm 0.1$  дБ, что вызывало событие *B* на ионограммах ВЗ. Анализ показал, что все рассматриваемые пики поглощения наблюдаются за периоды суббурь (*H*-компоненты ММП в обл. Соданкюля) независимо от времени суток. Причем, когда поглощение менее  $1 \pm 0.1$  дБ и условия *B* отсутствуют, то средняя интенсивность суббурь составляет 80 нТл с пределами изменений от 30 до 160 нТл, а когда поглощение более  $1 \pm 0.1$  дБ и события *B* имеют место, то средняя интенсивность суббурь составляет 250 нТл с пределами изменений от 60 до 450 нТл. Физически эти факты можно объяснить сравнительно кратковременными событиями высыпаний менее или более энергичных частиц, которые вызывают пики поглощения и, следовательно, события *B* или спорадические *Es*. Сравним характер высыпаний по данным спутника POES (Polar Operational Environmental Satellite) для пиков поглощения с амплитудой более  $1 \pm 0.1$  дБ (события *B*) и пиков с амплитудой менее  $1 \pm 0.1$  дБ (спорадические *Es*).

Спутник POES позволяет регистрировать широкий спектр энергий электронов и протонов с питч-углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  на высоте около 840 км. Известно, что авроральное поглощение радиоволн в нижней ионосфере является следствием вторжения в основном потока электронов с энергией более 40 кэВ, при этом высыпаящимися считаются частицы с питч-углами от  $0^\circ$  до  $43^\circ$  [Дриацкий, 1974]. Поэтому для анализа были выбраны данные детекторов спутника, измеряющих высыпание электронов с энергиями  $>30$  кэВ,  $>100$  кэВ и  $>300$  кэВ с питч-углом  $0^\circ$ . Рассматривались траектории спутников, проходящие как можно ближе к району обл. Соданкюля в моменты времени, когда наблюдались пики поглощения по риометру и повышенные значения  $f_{o\min}$  по данным ионозонда ВЗ. Рисунок 6 демонстрирует спектры частиц для относительно спокойного (*a*), средне возмущенного (*b*) и сильно возмущенного (*e*) периодов. Условия наблюдений следующие:

рис. 6а — пролет NOAA n16, 01:53 UT, 16.05.2002 г., поглощение  $\sim 0.25$  дБ ( $f_{o\min} = 1.2$  МГц);

рис. 6б — пролет NOAA n15, 06:37 UT, 15.05.2002 г., поглощение  $\sim 0.8$  дБ ( $f_{o\min} = 3.6$  МГц);

рис. 6в — пролет NOAA n16, 02:04 UT, 15.05.2002 г., поглощение  $\sim 3.5$  дБ (условие *B*).

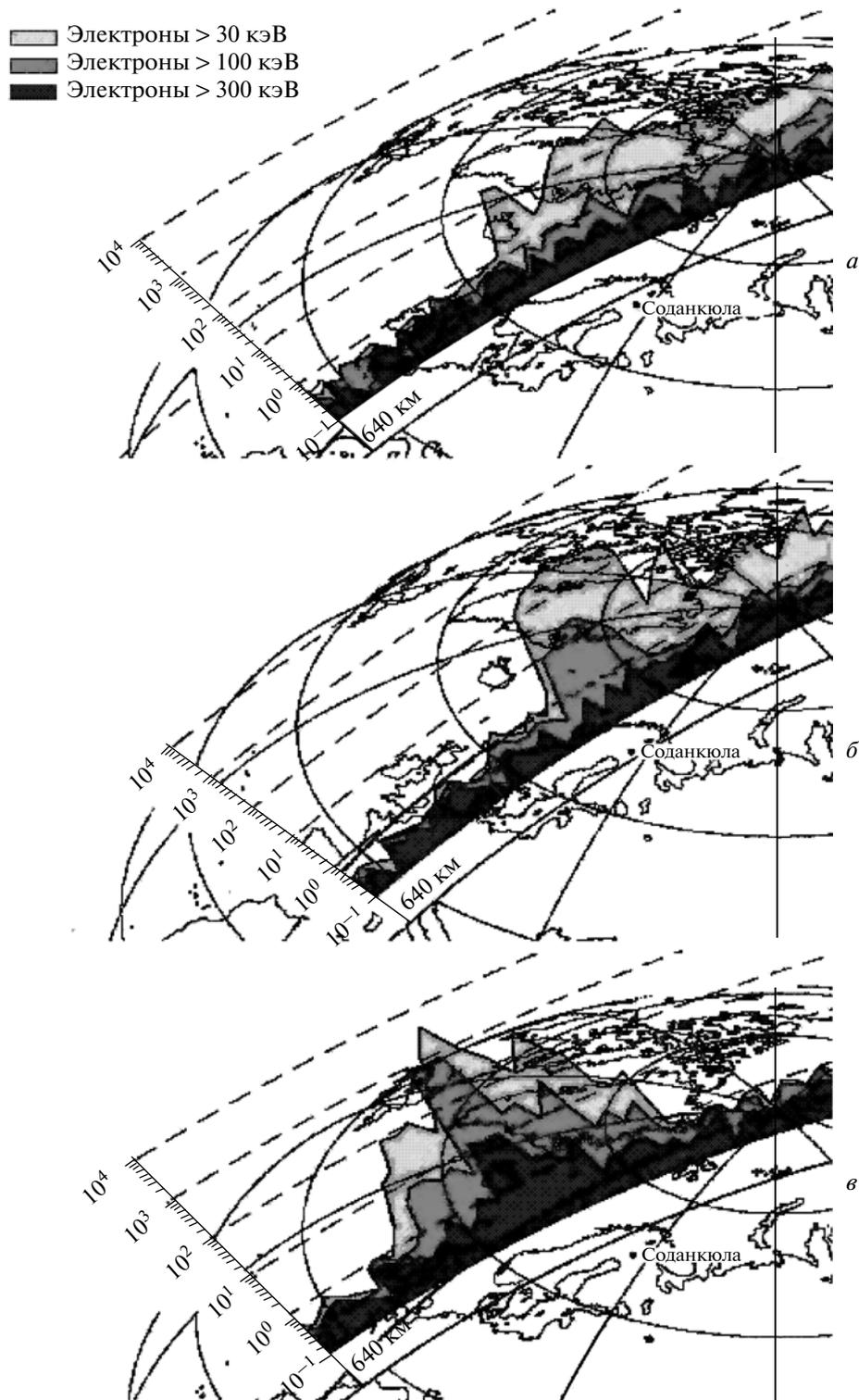
Вдоль траектории спутника отложена в логарифмическом масштабе количественная характеристика высыпаящихся электронов указанного выше диапазона энергий. Тонкая линия на поверхности Земли — проекция орбиты спутника. Как отмечено в работе [Дриацкий, 1974], высота проникновения электронов в атмосферу Земли для энергий 40 кэВ

составляет примерно 90 км, для 100 кэВ — 84 км, а для 300 кэВ — около 70 км. Из рисунка 6 видно, что наибольший вклад в интегральное поглощение вносит более жесткий спектр высыпаящихся частиц, вызывающий ионизацию на меньших высотах области *D* ионосферы.

Пики поглощения с большой амплитудой, вызывающие события *B*, соответствуют, как следовало бы ожидать, значительной магнитной возмущенности, а более слабые пики — слабой возмущенности. Подобная связь была проанализирована и получено следующее. Если рассматривать степень возмущенности в виде  $\Sigma Kp$ -индексов, то установлена линейная зависимость между  $\Sigma Kp$  и величиной поглощения. При значениях  $\Sigma Kp = 3$  (24 мая) уровень поглощения равен  $A_{\max} = 0.95$  дБ, при  $\Sigma Kp = 16$  (21 мая)  $A_{\max} = 2.1$  дБ, при  $\Sigma Kp = 23$ – (12 мая)  $A_{\max} = 3.0$  дБ и при  $\Sigma Kp = 28$ – (27 мая)  $A_{\max} = 3.5$  дБ. Эти цифры носят оценочный характер и приведены в качестве примера (выборки). Можно видеть, что тенденция изменений явно выражена. А именно, с увеличением степени магнитного возмущения наблюдается рост (начиная с  $1 \pm 0.1$  дБ) уровня аврорального поглощения, приводящий к полному исчезновению отраженных сигналов на ионограммах ВЗ обл. Соданкюля.

3.4. Сравнение данных ВЗ и НЗИ. Следует отметить, что настоящее сравнение будет производиться на основе имеющейся в наличии и реально действующей радиоаппаратуры вертикального и наклонного зондирования. То есть, чем располагаем, то и сравниваем, без специальных отклонений в анализ различных конструкций, с различными мощностными характеристиками и антеннами. Итак, имеется в виду аппаратура ВЗ обл. Соданкюля и комплекс НЗИ, который используется на радиотрассе Санкт-Петербург–Шпицберген. Их технические характеристики приведены в соответствующих источниках [Mirokhin et al., 1994; ftp://sgodata.sgo.fi]. Приступим непосредственно к анализу в соответствии с классификацией аномальных проявлений (отличия от медианы) в ионосфере по данным ВЗ, приведенной в разделе 3.2.

1) Имеет смысл начать с главного аномального явления. Суть его заключается в том, что вертикальное зондирование в определенные интервалы времени, как отмечалось выше, не фиксирует никаких отражений сигналов от ионосферы скорее всего из-за их полного поглощения. Это так называемое событие *B*. Вместе с тем, в рассматриваемые временные интервалы наклонное зондирование демонстрирует в большинстве случаев прохождение сигналов на трассе и уверенный их прием на Шпицбергене, рис. 7. Этот рисунок иллюстрирует примеры ионограмм НЗИ, которые были получены во время событий *B* при ВЗ. Две верхние ионограммы (*a*) и (*b*) на рисунке соответствуют слабо возмущенным дням, две следующие (*e*) и (*e*) характеризуются



**Рис. 6.** Характер высыпаний электронов различных энергий по данным спутника POES для относительно спокойного (*a*), средне возмущенного (*b*) и сильно возмущенного (*c*) периодов; (*a*) – поглощение по риометру obs. Соданкюля 0.25 дБ, (*b*) – поглощение 0.8 дБ, (*c*) – поглощение 3.5 дБ.

ют средне возмущенные дни и последние две ионограммы (*d*) и (*e*) относятся к сильно возмущенным дням по принятой выше классификации. Если рас-

сматривать временной интервал 07:48 – 08:48 UT, то на всех четырех ионограммах (*b*)–(*d*) можно видеть приблизительно одинаковый характер модовой

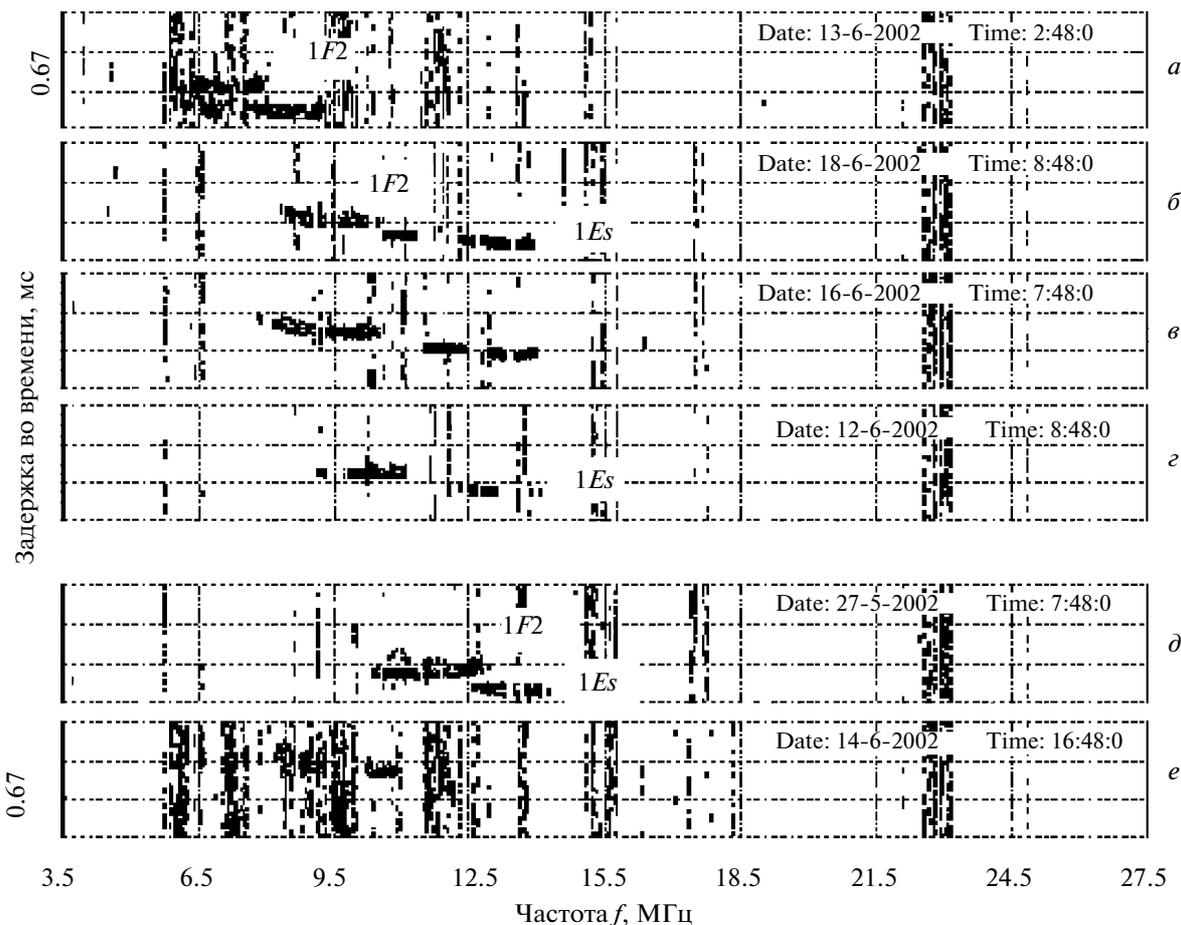


Рис. 7. Ионограммы НЗИ для различных условий: (а) во время средней суббури, (б) после суббури, (в) спокойно, (г) спокойно, (д) во время слабой суббури, (е) в конце интенсивной суббури. 1F2, 2F2, 1Es – моды распространения.

структуры сигнала в месте приема: Es- и F2-отражения. Тем самым, степень магнитной возмущенности, оцениваемая как  $\Sigma Kp$  для каждого дня, здесь в явном виде не проявляется, и скорей всего оценки должны быть более тонкие, например, с помощью магнетометра obs. Соданкюля. Подобный анализ был проведен и оказалось, что структура НЗИ сигнала существенно зависит от локальной магнитной активности. Рассмотрим последовательно ионограммы на рис. 7. Первая ионограмма (а) – магнитная активность (X-компонента) составила минус 130 нТл во время суббури с максимумом 180 нТл, авроральное поглощение  $AA = 2$  дБ. Вторая ионограмма (б), соответствует времени 11:00 LT на рис. 7б, – магнитная активность плюс 10 нТл после суббури с максимумом минус 100 нТл, поглощение  $AA = 1.4$  дБ. Третья ионограмма (в) – плюс 10 нТл, спокойно,  $AA = 1$  дБ. Четвертая ионограмма (г) – плюс 60 нТл, спокойно,  $AA = 2.5$  дБ соответствует положению трассы относительно аврорального овала на рис. 1. Пятая ионограмма (д) – минус 70 нТл во время слабой суббури с максимумом минус 120 нТл, поглощение 3 дБ. Последняя ионограмма (е) – минус 60 нТл

в конце суббури с максимумом минус 450 нТл,  $AA = 2$  дБ. Таким образом, заметная магнитная активность имеет место для первой и последней ионограмм. Эта активность является причиной размытия сигнала на ионограммах (а) и (е). Как показал анализ, сигналы на ионограммах, полученных в вечерние и ночные часы, в среднем являются более слабыми, чем в другое время суток. Возможно, это связано с более вероятным появлением магнитных возмущений в вечерне-ночные часы. Что касается уровня поглощения в средней точке трассы (obs. Соданкюля), то, исходя из анализа, оно практически не влияет на амплитуду сигнала НЗИ в месте приема.

По всем ионограммам ВЗ в Соданкюле в исследуемый период с 11 по 31 мая, как указывалось, выявлено 10 дней, когда имели место события В: 12–15, 19, 21–24 и 27 мая. Следует заметить, что 13, 19 и 24 мая являются слабо возмущенными днями, 12, 15, 21, 22 мая – средне возмущенные дни, а 14, 23 и 28 мая – сильно возмущенные дни. Как можно видеть, события В при ВЗ возникают практически независимо от  $\Sigma Kp$  данного дня, и скорей всего они связаны с характером высыпающихся частиц и ло-

кальной магнитной активностью. За указанные 10 дней события *B* на ионограммах ВЗ были зафиксированы в 25-ти случаях (сеансах). Этим сеансам ВЗ были сопоставлены соответствующие сеансы НЗИ. Сопоставление показало, что в 19-ти сеансах НЗИ имело место прохождение сигналов на трассе и только в 6-ти сеансах (24%) сигнал в месте приема отсутствовал. Был проведен соответствующий анализ с целью выяснения причин пропадания сигнала на трассе за время условий *B* при ВЗ. Обнаружено, что за период съемки в месте приема трех сеансов НЗИ из шести (00:48, 01:48 и 02:48 UT, 12 мая) имела место мощная суббуря. Данная суббуря была зафиксирована магнетометром обс. Соданкюля и имела амплитуду *X*-компоненты магнитного поля порядка минус 400 нТл. При этом поглощение по риометру обс. Соданкюля составило для первого сеанса 0.8 дБ, для второго – 1 дБ и для третьего – 2 дБ. В то же время сеансы НЗИ уже в 07:48 и 08:48 UT 12 мая характеризовались поглощением 3.5 и 2.8 дБ, амплитудой магнитного поля плюс 70 и 60 нТл, и тем не менее сигналы в этих сеансах были успешно приняты, см. пример на рис. 7г. Два следующих случая из шести (00:48 и 01:48 UT, 21 мая) также сопровождалась мощной суббурей с амплитудой *X*-компоненты 450 нТл. Здесь уровни поглощения были соответственно 2 и 1.3 дБ. Последний случай из шести в 18:48 UT 14 мая также имел место во время сильной суббури с амплитудой около минус 400 нТл и для него поглощение составило 1.8 дБ. Тогда как следующий сеанс в 19:48 UT с поглощением 2 дБ и амплитудой магнитного поля минус 60 нТл был успешным в смысле наличия сигнала в месте приема, см. рис. 7е. Тем самым, хотя статистика невелика, в первом приближении можно полагать, что на прохождение сигнала вдоль трассы НЗИ поглощение по данным риометра в ее средней точке играет значительно меньшую роль, чем степень локального магнитного возмущения. Скорее всего, при интенсивном магнитном возмущении типа суббури глубоко разрушается сама структура ионосферы, ее слоистая композиция видоизменяется, возникают неоднородности и динамические процессы в ионосфере и т.п. Поэтому нормальное распространение сигнала нарушается даже в условиях низкого поглощения в средней точке трассы. Из вышесказанного следует, что существует очевидное преимущество метода НЗИ перед методом ВЗ во время существования событий *B*.

2) Теперь рассмотрим аномальные случаи, когда ионозонд обс. Соданкюля за период с 11 по 31 мая фиксировал на ионограммах сигналы, отраженные только от спорадических *Es*, тогда как согласно месячной медиане, рис. 5а, их быть не должно, особенно днем, или помимо *Es*-отражений должны быть другие. Указанные *Es*-отражения обсуждались выше, в разделе 3.2 и при описании рис. 5б. Они, как правило, характеризуются высокими значениями *foEs*, иногда в несколько раз превышающими меди-

анные. Всего рассматриваемые отражения наблюдались в течение 6-ти дней из общего количества 21 день. Из шести дней два дня, 11 и 27 мая, являются сильно возмущенными, три дня, 12, 18 и 28 мая, – средне возмущенные и один день 19 мая, рис. 5б, – слабо возмущенный. Так что здесь тоже зависимость от степени магнитной активности не наблюдается. Всем сеансам с анализируемыми аномальными *Es*-отражениями при ВЗ были сопоставлены соответствующие сеансы НЗИ. Главное, что получено при сопоставлении, это наличие на ионограммах НЗИ помимо ожидаемых *Es*-отражений, как правило, также *F2*-отражений. Пример ионограммы НЗИ с подобными *Es*- и *F2*-отражениями показан на рис. 2в. Таким образом, если ионозонд фиксирует только аномальные *Es*-отражения, то аппаратура НЗИ в это же время фиксирует как *Es*-, так и *F2*-отражения. Получение большей информации об ионосфере и составляет преимущество метода НЗИ перед методом ВЗ для данных условий.

3) Перейдем к изучению аномальных отражений при ВЗ, когда наблюдаются только *Es*- плюс *F2*-отражения, хотя в нормальных условиях были бы возможны и другие, например, *E*- и/или *F1*-отражения. Последние два, согласно месячным медианам на рис. 5а, возможны в интервале с 02:00 по 16:00 UT включительно. Поэтому наш дальнейший анализ был выполнен именно в этом интервале. Общее число дней, в пределах которых наблюдались аномальные случаи только *Es*- плюс *F2*-отражений составило 15 из общей суммы 21 день, то есть более 70%. Из 15 дней слабо возмущенных – 6, средне возмущенных – 6 и сильно возмущенных – 3. Очевидно, что и здесь явная зависимость от степени возмущенности того или иного дня отсутствует. Сравнение данных ВЗ и НЗИ показало, что исходные *Es*- и *F2*-отражения при ВЗ, как правило, обнаруживаются и на ионограммах НЗИ, что можно было предположить. Однако, наряду с указанными отражениями на ионограммах НЗИ дополнительно существуют отражения от *F1*-слоя, особенно в дневное время, и отражения от *E*-слоя. Последние более редки и также наблюдаются с большей вероятностью в дневное время. Таким образом, в рассматриваемых условиях преимущество метода НЗИ перед ВЗ состоит в выявлении, хотя и не всегда, дополнительных мод распространения за счет отражения сигналов от *E* и *F1* – слоев ионосферы, что при вертикальном зондировании не наблюдается.

4) В конце остановимся на аномальных случаях, отличающихся тем, что, во-первых, на ионограммах ВЗ фиксируются спорадические *Es*-отражения в утренние, дневные и вечерние часы, когда в нормальных условиях их быть не должно, рис. 5а, и, во-вторых, критические частоты спорадических *Es*-образований достигают величин, близких к критической частоте слоя *F2* ( $foEs \geq foF2$  или  $foEs \leq foF2$ ), рис. 5б. Количество дней с подобными отражениями составило 13 из общей суммы 21 день (более

60%). Сопоставление данных ВЗ и НЗИ показало, что  $E_s$ -отражения на ионограммах НЗИ в основном соответствуют  $E_s$ -отражениям на ионограммах ВЗ. Значения  $E_s$ МНЧ либо выше, либо ниже  $F_2$ МНЧ. Иногда имеет место частичное экранирование вышележащих слоев нижележащими исходя из структуры отражений. В среднем характер отражений на ионограммах НЗИ достаточно сложный и неоднозначный, поскольку рассматриваются аномальные ситуации образования спорадических образований в возмущенных условиях. Таким образом, явные преимущества метода НЗИ перед ВЗ здесь не совсем очевидны. Тем не менее, метод НЗИ дает реальную картину характера распространения на трассе во время возмущений, тогда как предсказать этот характер распространения по данным ВЗ в средней точке трассы представляется делом совершенно невозможным. В любом случае, диагностика ионосферы несколько лучше осуществляется методом НЗИ, чем ВЗ, поскольку, например, многоскачковые моды распространения при НЗИ могут дать информацию о порядке протяженности слоя отражения сигнала, характере его рассеяния, боковых отражениях (отклонениях от дуги большого круга) и т.п., чего нельзя получить при ВЗ.

#### 4. ВЫВОДЫ

1) По всей совокупности ионограмм НЗИ (около 500) произведена классификация характерных мод распространения на трассе Санкт-Петербург—Шпицберген в различных условиях для мая 2002 г. Как днем, так и ночью рост магнитной активности, в виде  $\Sigma Kp$ -индексов, приводит к уменьшению значений  $F_2$ МНЧ и повышению степени рассеяния сигнала. Отличие дневных и ночных ионограмм состоит в том, что значения  $F_2$ МНЧ в среднем днем выше, чем ночью в том числе и во время возмущений. Последние приводят к существенному разбросу параметров распространения на трассе.

2) По данным ионозонда обс. Соданкюля получено, что даже в период слабого магнитного возмущения в зоне полярных сияний наблюдаются существенные отклонения параметров ионосферы от месячных медианных значений. Для сильно возмущенных дней характерны продолжительные события  $B$  (полное отсутствие сигналов при ВЗ), а также  $E_s$ -отражения, которые наиболее вероятно встречаются в пред- и послеполуночные часы, хотя эпизодически встречаются и днем. События  $B$  при ВЗ возникают практически независимо от  $\Sigma Kp$  исследуемого дня.

3) Данные риометра обс. Соданкюля ( $f = 30$  МГц) показывают, что с увеличением степени магнитного возмущения наблюдается рост, начиная с  $1 \pm 0.1$  дБ, уровня аврорального поглощения, приводящий к полному исчезновению отраженных сигналов на ионограммах ВЗ. На прохождение сигнала вдоль трассы НЗИ поглощение по риометру в ее средней точке играет значительно меньшую роль, чем сте-

пень локального магнитного возмущения. Скорее всего, при интенсивном магнитном возмущении типа суббури разрушается само строение ионосферы, ее слоистая структура видоизменяется, возникают неоднородности и динамические процессы в ионосфере. Поэтому нормальное распространение сигнала нарушается даже в условиях низкого поглощения в средней точке трассы.

4) Выявлено важное обстоятельство — существует очевидное преимущество метода НЗИ перед методом ВЗ во время аномальных (возмущенных) периодов. Рассмотрены четыре ситуации.

— Во время событий  $B$  сопоставление НЗИ и ВЗ ионограмм показало, что в 76% сеансов НЗИ имело место прохождение сигналов на трассе и только в 24% сеансов сигнал в месте приема отсутствовал. Причина последнего заключается в том, что структура НЗИ сигнала существенно зависит от локальной магнитной активности и при сильном магнитном возмущении сигнал на радиотрассе пропадает даже при слабом поглощении (см. предыдущий пункт).

— Если ионозонд в середине трассы фиксирует только  $E_s$ -отражения с высокими значениями  $foE_s$ , то аппаратура НЗИ в это же время фиксирует как  $E_s$ , так и  $F_2$ -отражения. Получение дополнительной информации об ионосфере и составляет преимущество метода НЗИ перед методом ВЗ для данных условий.

— Случай аномальных отражений при ВЗ, когда наблюдаются только  $E_s$ - плюс  $F_2$ -отражения. В рассматриваемых условиях преимущество метода НЗИ перед ВЗ состоит в выявлении, хотя и не всегда, дополнительных мод распространения за счет отражения сигналов от  $E$  и  $F_1$  — слоев ионосферы, что при вертикальном зондировании не наблюдается.

— Аномальная ситуация, когда, во-первых, на ионограммах ВЗ фиксируются спорадические  $E_s$ -отражения в утренние, дневные и вечерние часы, тогда как в нормальных условиях их быть не должно и, во-вторых, критические частоты спорадических  $E_s$ -образований достигают величин, близких к критической частоте слоя  $F_2$  ( $foE_s \geq foF_2$  или  $foE_s \leq foF_2$ ). Метод НЗИ дает реальную картину характера распространения на трассе во время возмущений. Диагностика ионосферы несколько лучше осуществляется методом НЗИ, чем ВЗ, поскольку, например, многоскачковые моды распространения при НЗИ могут дать информацию о порядке протяженности слоя отражения сигнала, характере его рассеяния, боковых отражениях (отклонениях от дуги большого круга) и т.п., чего нельзя получить при ВЗ.

Авторы выражают благодарность службам обс. Соданкюля, Финляндия, за возможность доступа к риометрическим и ионосферным данным посредством Интернета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев М.Ю., Благовещенский Д.В., Выставной В.М., Мингалев В.С., Мингалева Г.И. Интерпретация экспериментальных данных распространения коротких радиоволн на трассе Санкт-Петербург – Арх. Шпицберген // Геомагнетизм и аэрномия, Т. 47. № 4. С. 534–542. 2007.
- Благовещенский Д.В., Борисова Т.Д., Калишин А.С. Нестандартные (боковые) моды распространения на высокоширотной коротковолновой радиотрассе. Изв. вузов. Радиофизика. Т. 52. № 4. С. 101–112. 2009.
- Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат. 224 с. 1974.
- Blagoveshchensky D.V., Kalishin A.S., Sergeyeva M.A. Space weather effects on radio propagation: study of the CEDAR, GEM and ISTP storm events // Ann. Geophysicae. V. 26. N 4. P. 1479–1490. 2008.
- Blagoveshchensky D.V., Lester M., Kornienko V.A., Shagimuratov I.I., Stocker A.J., Warrington E.M. Observations by the CUTLASS radar, HF Doppler, oblique ionospheric sounding, and TEC from GPS during a magnetic storm // Ann. Geophysicae. V. 23. P. 1697–1709. 2005a.
- Blagoveshchensky D.V., Nozdrachev S.V., Sergeeva M.A., Sinyansky P.A. Magnetic storm effects on a HF transauroral radio path // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 5. G13006. doi: 10.1029/2005GI00010. 2005b.
- Mirokhin A.M., Blagoveshchenskaya N.F., Shirochkov A.V., Troshichev O.A. The new Russian advanced digital ionosonde—BIZON // Ionosonde Network Advisory Group. INAG–60. Australia. P. 25–29. 1994.