

УДК 550.388.2

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ/СУББУРЬ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КВ (ОБЗОР)

© 2013 г. Д. В. Благовещенский

Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург
e-mail: dvb@aanet.ru

Поступила в редакцию 20.02.2012 г.
После доработки 23.11.2012 г.

Проанализированы проявления так называемого главного эффекта в ионосфере во время геомагнитных бурь/суббурь в характере распространения дециметровых радиоволн. На КВ-радиотрассах главный эффект обнаруживает себя в виде изменений амплитуды сигнала и диапазона рабочих частот МНЧ–ННЧ аналогично критической частоте слоя F_2 ионосферы. А именно, происходит рост указанных параметров перед активной фазой возмущения, их уменьшение во время активной фазы и снова рост после активной фазы. На трассах во время бурь/суббурь также рассмотрено распространение вне дуги большого круга, смена механизмов распространения, поведение КВ-радиосигналов. Приводятся соображения о возможности прогнозирования начала развития бурь/суббурь.

DOI: 10.7868/S0016794013040032

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что геомагнитные возмущения наиболее ярко проявляются в высоких широтах, создавая там наибольшие проблемы, в частности, для распространения коротких волн (КВ). Поэтому ниже будет уделено главное внимание именно распространению КВ в высоких широтах.

Вопросы распространения КВ в последнее время получили новое, качественное развитие [Hunsucker and Hargreaves, 2003] и представляются актуальными и важными не только с научной точки зрения. Практическая значимость состоит в обоснованной организации КВ-радиосвязи, например, при освоении Арктического шельфа с целью добычи нефти, с судами Северного морского пути, с самолетами, пролетающими над Арктикой, а также в решении проблем навигации и загоризонтной радиолокации. Ряд недостатков радиосвязи в этом диапазоне объективно способствовал более быстрому развитию кабельных (в том числе и волоконно-оптических), радиорелейных и особенно спутниковых систем связи, получивших в 80-е годы прошлого столетия весьма широкое распространение и интенсивно развивающихся в настоящее время. Однако, учитывая современные технологические возможности, КВ-радиосвязь является серьезной альтернативой спутниковой связи. Благодаря внедрению современных средств цифровой обработки сигналов удается довольно быстро наращивать скорость передачи информации в радиоканалах [Kilgallen, 2001]. Так, скорость передачи данных с 1985 по 2005 гг. в КВ-диапазоне возросла в 1000 раз, причем наиболее существенный рост наблюдался в

последние годы. Сравнительные экономические оценки стоимости передачи сообщений в спутниковой системе связи SATCOM и КВ-радиолинии показывают, что стоимость сообщений по КВ-каналам в сотни раз ниже, чем у спутниковых, при невысокой интенсивности обмена, и лишь при большой интенсивности обмена спутниковые каналы могут быть предпочтительнее. Многолетний опыт центра *Shape* показал экономическую целесообразность комбинации спутниковой системы типа INMARSAT с КВ-линией связи лишь в случаях, если требуемая связь не должна прерываться во время аномальных явлений. При этом КВ-радиолинии обеспечивают пользователей дешевой связью большую часть времени, и только в моменты срыва КВ-связи используется дорогая спутниковая связь. Известно также, что возрождение интереса к КВ-радиосвязи, особенно специального назначения, в настоящее время объясняется еще и установленной в ходе исследований уязвимостью спутниковых систем связи в военное время.

Начиная с 1980-х годов КВ-диапазон подвергся радикальной трансформации. Широкая компьютеризация позволила КВ-радиоиндустрии экспериментировать с адаптивной техникой, которая серьезно оспорила утверждение, что КВ-диапазон нестабилен, непредсказуем и ненадежен. Взятые на вооружение новые модемы, расширяющие стандарт по отношению к передаче данных [Jodalen et al., 2001]. При проектировании и реорганизации высокоширотных радиолиний учитываются и используются основные тенденции развития КВ-связи на основе современных достиже-

ний науки и техники [Kilgallen, 2001; McNamara et al., 2010]. К ним относятся: 1) заметное увеличение скорости передачи данных за последнее время; 2) автоматическое вхождение в связь; 3) использование средств зондирования для сбора данных по распространению радиоволн; 4) объединение очень развитых моделей распространения и алгоритмов прогнозирования состояний радиоканала (трассы); 5) эффективная коррекция ошибок; 6) существенно улучшенное знание физики Солнца, космической погоды и ионосферы; 7) адаптивные формы сигналов, которые могут лучше приспособиться к искусственным и естественным радиопомехам.

Все перечисленное происходит на фоне традиционно существующей относительно низкой стоимости КВ-оборудования, программного обеспечения и всей инфраструктуры в целом. Влияние указанных тенденций очень велико. КВ-системы теперь гарантируют потребителям хорошее качество, надежность, высокоскоростную передачу данных посредством новых разработок, которые относительно дешевы. Опытные операторы уже не нужны, поскольку созданы алгоритмы, которые автоматически управляют замираниями, корректируют ошибки, выбирают частоты и моды распространения. У потребителей с неразвитой структурой телекоммуникаций появилась возможность надежного доступа к Интернету и электронной почте [Glase and Robertson, 2001]. На данный момент можно рассматривать КВ-системы как альтернативу спутниковым связным системам или системам с арендным доступом.

Увеличение надежности КВ-систем радиосвязи является очень сложной проблемой, поскольку распространение радиоволн ДКМ-диапазона в полярных областях полностью зависит от гелиогеофизической обстановки (космической погоды), определяющей степень магнитно-ионосферных возмущений. Важнейшей задачей является предсказание и смягчение проявлений космической погоды. Однако при этом недостаточно внимания уделяется эффектам, возникающим при распространении волн различного диапазона, хотя известно, что волны УНЧ-, СВ-, КВ-диапазонов реагируют на малейшие изменения состояния среды. В настоящее время уже существуют экспериментальные данные [Благовещенский и др., 1996; Blagoveshchensky and Borisova, 2000; Blagoveshchensky et al., 1992, 2003], которые позволяют ставить задачу, например, о диагностике и дальнейшем прогнозе начала возмущений по данным распространения радиоволн (РРВ). Здесь проясняющим данную постановку фактором является знание комплекса геофизических условий, предшествующих буре или суббуре. Однако этот вопрос проработан явно не достаточно, поскольку практически во всех работах, касающихся рассматриваемой проблемы, акцент делается на мо-

мент развития активной фазы или, по крайней мере, фазы роста, и определение их начал по разным признакам (поворот Bz к югу, появление геомагнитных пульсаций $Pc1$ и $Pi2$, диполизация магнитного поля и др.). Поэтому существует настоятельная потребность в анализе данных по всем возможным проявлениям солнечно-магнитосферно-ионосферных связей и их воздействию на распространяющиеся радиоволны в периоды возникновения суббурь и бурь. В первую очередь это касается высоких широт, поскольку здесь магнитные возмущения проявляются наиболее существенно и практически все время.

Известно, что в высоких широтах ионосфера весьма неоднородна, поскольку она состоит, прежде всего, из различных крупномасштабных структур со свойственными им особенностями поведения (главный ионосферный провал, овал полярных сияний, полярная шапка и т.п.). Кроме того, высокоширотная ионосфера подвержена воздействию выпадающих потоков частиц во время возмущений, электрических полей, ветров и т.д.

Как отмечалось в предыдущем обзоре автора по ионосфере, во время геомагнитных бурь/суббурь возникает так называемый главный эффект в ионосфере (ГЭ). Он проявляется в том, что критическая частота и высота F -области во время возмущения изменяются. Происходит рост критической частоты перед активной фазой бури/суббури, затем ее спад во время активной фазы и снова рост после активной фазы. Высота F -области, наоборот, — возрастает во время активной фазы и падает после ее окончания. На КВ-радиотрассах ГЭ проявляется в виде изменений амплитуды сигнала и диапазона рабочих частот аналогично критической частоте. Динамика ионосферы во время возмущений приводит к нарушению ее регулярной структуры и образованию мелкомасштабных неоднородностей и градиентов электронной концентрации. Неоднородности и градиенты при распространении радиоволн иногда приводят к изменению траектории волны в пространстве — вместо траектории вдоль дуги большого круга образуется новый путь сигнала (боковой), например, с отражением от градиентов электронной концентрации или в результате рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Подобные боковые сигналы являются существенной помехой при приеме сигналов в системах радиосвязи, навигации и радиолокации. Поэтому их изучению необходимо уделять должное внимание. Ранее предпринимались попытки исследования природы образования нестандартных мод распространения и условий их возникновения [Goodman and Ballard, 2004; Stocker et al., 2002]. Однако для высоких широт полученных результатов, особенно для различной геомагнитной возмущенности, явно не достаточно.

Именно анализу перечисленных вопросов и некоторых других посвящен настоящий обзор. Ввиду особой сложности рассматриваемых проблем, решением которых занимаются многие научно-исследовательские центры мира, здесь изложены лишь основные особенности распространения ДКМ-волн в высокоширотной ионосфере во время геомагнитных возмущений.

2. ЭФФЕКТЫ БУРЬ/СУББУРЬ В РАСПРОСТРАНЕНИИ КВ НА ТРАССАХ

2.1. Вариации МНЧ и ННЧ. Максимальная наблюдаемая частота (МНЧ) и наименьшая наблюдаемая частота (ННЧ) являются важнейшими характеристиками любого радиоканала, поскольку они характеризуют границы диапазона частот, в пределах которого можно выбрать рабочую частоту для передачи сигнала. Отметим, что МНЧ определяется критической частотой слоя ионосферы и его высотой, ННЧ зависит от степени поглощения в основном в слое *D* ионосферы и технического оснащения трассы [Vilella et al., 2009].

В работе [Milan et al., 1998] изучалась степень уменьшения КВ-диапазона частот МНЧ – ННЧ на четырех трассах во время магнитных бурь. Общий передатчик трасс расположен в полярной шапке. Одна из трасс также находится в полярной шапке, две других являются трансавроральными, и последняя трасса днем становится трансавроральной, а ночью она лежит в полярной шапке. Передатчик излучал одновременно 14 частот в пределах от 3 до 25 МГц. Обнаружено сужение диапазона нормально прошедших через радиоканал частот на всех трассах во время магнитных бурь. Объяснение этому – уменьшение во время бури электронной концентрации в *F*-области, что приводит к уменьшению значений МНЧ, а на полярной трассе рост ННЧ вызван поглощением типа ППШ. Так, на полярной трассе для активной фазы магнитной бури 20–21 января 1989 г. наблюдалось сужение диапазона от 6.8 до 10.2 МГц вместо 3–25 МГц. Характерно, что перед активной фазой магнитной бури и в конце ее на трассах наблюдается расширение диапазона частот МНЧ–ННЧ в течение нескольких часов.

На рисунке 1 (средняя панель *б*) представлены вариации МНЧ и ННЧ по данным наклонного зондирования ионосферы на КВ-трассе Санкт-Петербург–о-в. Хейса во время широко известной магнитной бури 10–11 января 1997 г. [Благовещенский, 2011]. Трасса длиной $D = 2450$ км является трансавроральной, имеет точку отражения внутри аврорального овала на широте $\Phi^1 = 66^\circ$. На верхней панели (*а*) представлен *AE*-индекс, на нижней (*в*) – поглощение по данным риометра в обс. Соданкюля. Моменты T_0 и T_e – начало и конец активной фазы бури. Из рисунка можно видеть расширение диапазона частот МНЧ–ННЧ в

течение 3 ч перед и в районе момента T_0 , затем в промежутке T_0 – T_e (активная фаза) сужение диапазона и далее после момента T_e снова расширение диапазона в течение нескольких часов. Резкий рост ННЧ в промежутке 08:00–12:00 УТ 10 января вызван, скорее всего, скачком поглощения в этот период (см. панель *в*).

Итог приведенных рассмотрений состоит в следующем. Во Введении отмечалось, что ГЭ в ионосфере возможен для магнитных бурь. Здесь же на КВ-трассах фактически наблюдается аналогичная картина проявления ГЭ: расширение диапазона частот перед активной фазой бури, сужение его во время активной фазы и снова расширение диапазона в конце активной фазы.

Теперь обратимся к суббурям. Как показывают результаты экспериментов на трассах во время суббурь [Благовещенский, 2011; LaBelle, 2004; Milan et al., 1996; Wagner et al., 1995], в принципе значения МНЧ и ННЧ претерпевают изменения, очень похожие на изменения этих параметров во время магнитных бурь. Пример вариаций F_2 МНЧ во время суббури представлен на рис. 2. Можно видеть, что на большинстве трасс, позиции *б*, *в* и *г*, выполняются условия ГЭ: перед моментом T_0 имеет место повышение значений F_2 МНЧ, затем их спад в промежутке T_0 – T_e , и снова повышение F_2 МНЧ после момента T_e . Подобное поведение по характеру аналогично данным на рис. 6 слева из обзора по ионосфере, что физически и следовало ожидать. На самой высокоширотной трассе, рис. 2*а*, подъем значений F_2 МНЧ в интервале T_0 – T_e вызван высыпаниями частиц, что приводит к увеличению ионизации в *F*-области. Значения E_s МНЧ, как видно из рис. 2, имеют тенденцию повышаться с ростом широты. Распространение КВ посредством *E_s*-слоя с большими значениями E_s МНЧ исследовалось в работах [Milan et al., 1997; Goodman and Ballard, 2004]. Если провести усреднение по всем значениям E_s МНЧ на рис. 2, то результат будет близок к тому, который показан на рис. 7 обзора по ионосфере для foE_s . На рисунке 2*д* рассматриваемая суббуря является интенсивной с отрицательной B_z -компонентой ММП.

Что касается значений ННЧ, то они в значительной степени определяются ориентацией трассы относительно крупномасштабных ионосферных структур (ГИП, авроральный овал, полярная шапка и т.п.) и ее длиной. Так, если во время суббури наблюдается рост поглощения за счет *D*-слоя на трассе, то значения ННЧ в промежутке T_0 – T_e будут повышаться, что приведет к сужению диапазона частот. С другой стороны, если трасса подвержена воздействию нежестких высыпавшихся частиц, и поглощение мало или отсутствует, то за счет роста foF_2 и соответственно МНЧ в интервале T_0 – T_e диапазон МНЧ–ННЧ может

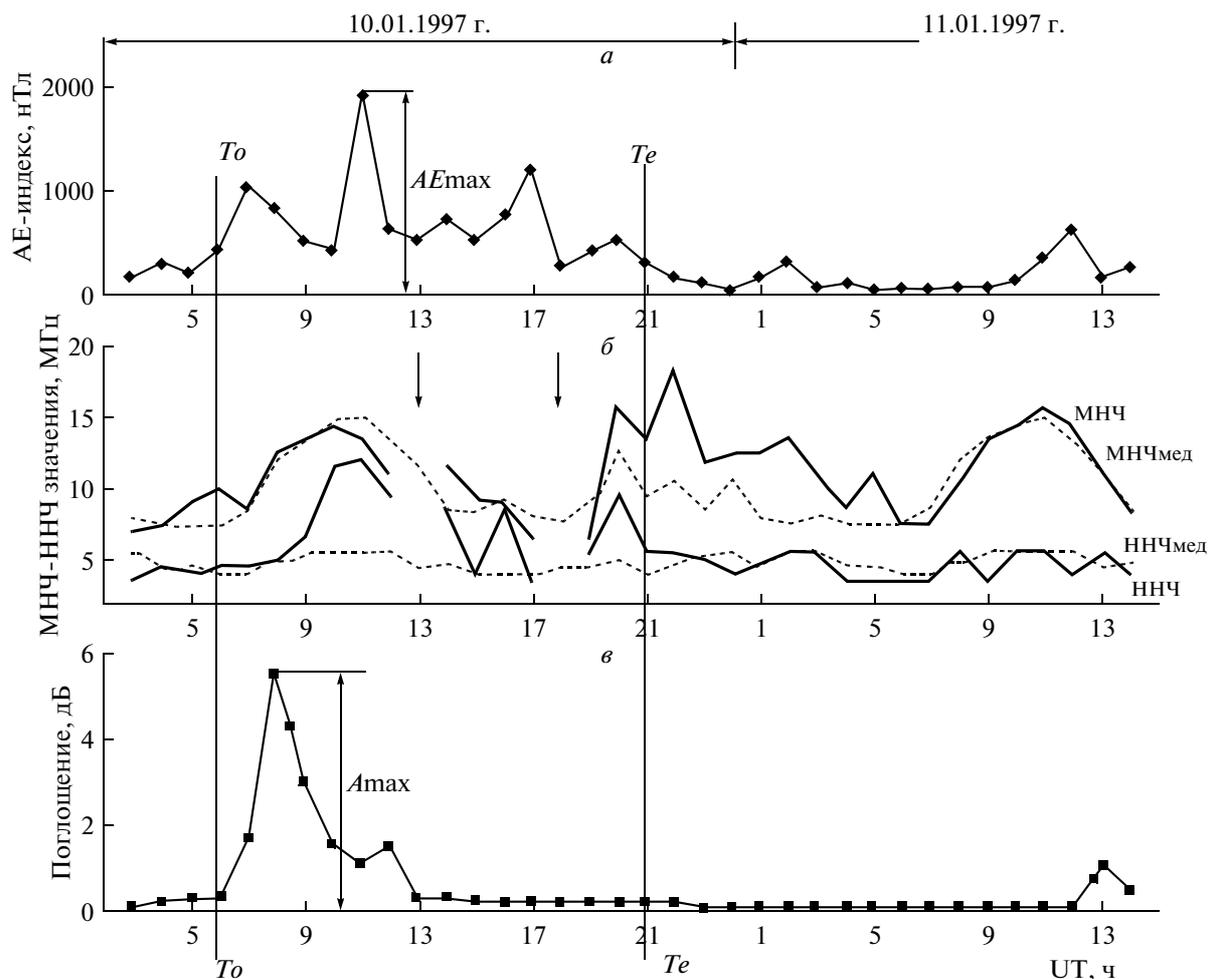


Рис. 1. Вариации AE -индекса (a), изменения значений МНЧ и ННЧ на трассе Санкт-Петербург–о-в. Хейса (b) и уровень поглощения по риометру (c) в течение магнитной бури 10–11 января 1997 г. Отсутствие распространения сигнала показано стрелками.

расширяться. Поэтому относительно поведения ННЧ во время суббури существует некоторая неопределенность. Нужно конкретизировать трассу и оценить степень возможных высыпаний частиц в тех или иных условиях. Во время магнитных бурь подобная неопределенность скорее всего отсутствует, поскольку поглощение, как правило, велико.

2.2. Изменения амплитуды сигналов на трассах во время бурь/суббурь. Усиление интенсивности сигналов декаметрового диапазона волн перед и после ионосферных возмущений описывалось, например, в работах [Ondoh and Obu, 1980; Milan et al., 1998; LaBelle, 2004]. В первой работе [Ondoh and Obu, 1980] исследованы магнитно-ионосферные условия и характер прохождения сигналов с частотами $f=20$ и 25 МГц на КВ-радиотрассе Вашингтон (США) – Хираисо (Япония). Трасса пересекает авроральную зону и дневной полярный касп. Эксперимент проводился во время 50-ти геомагнитных бурь средней интенсивности, рис. 3а. Обнаружен

рост интенсивности сигнала в месте приема за ~ 10 ч до SSC и второй рост спустя ~ 18 ч после SSC, рис. 3б. Первый максимум ассоциируется с наблюдаемым ростом электронной концентрации в области F ионосферы в районе дневного каспа за ~ 17 ч до SSC, рис. 3в. Показано, что рост $foF2$ до SSC имеет место на инвариантных широтах $57\text{--}83^\circ$ и возле местного полдня ($LT \sim 12$ ч). Дополнительная ионизация создается высыпанием в каспе электронов с энергией $1\text{--}2$ кэВ, потоки которых возрастают по интенсивности за $16\text{--}20$ ч до SSC. Второй максимум амплитуды сигнала через ~ 18 ч после SSC, рис. 3б, имеет место на спаде возмущения.

На рисунке 4 из работы [Milan et al., 1998] представлены данные по приему сигналов на трассах во время трех бурь за период 1988–89 гг. Описание трасс приведено выше в разделе 2.1, второй абзац. Рисунок 4 (нижняя панель) иллюстрирует степень опознавания сигнала в месте приема на трассах. Степень опознавания в первую оче-

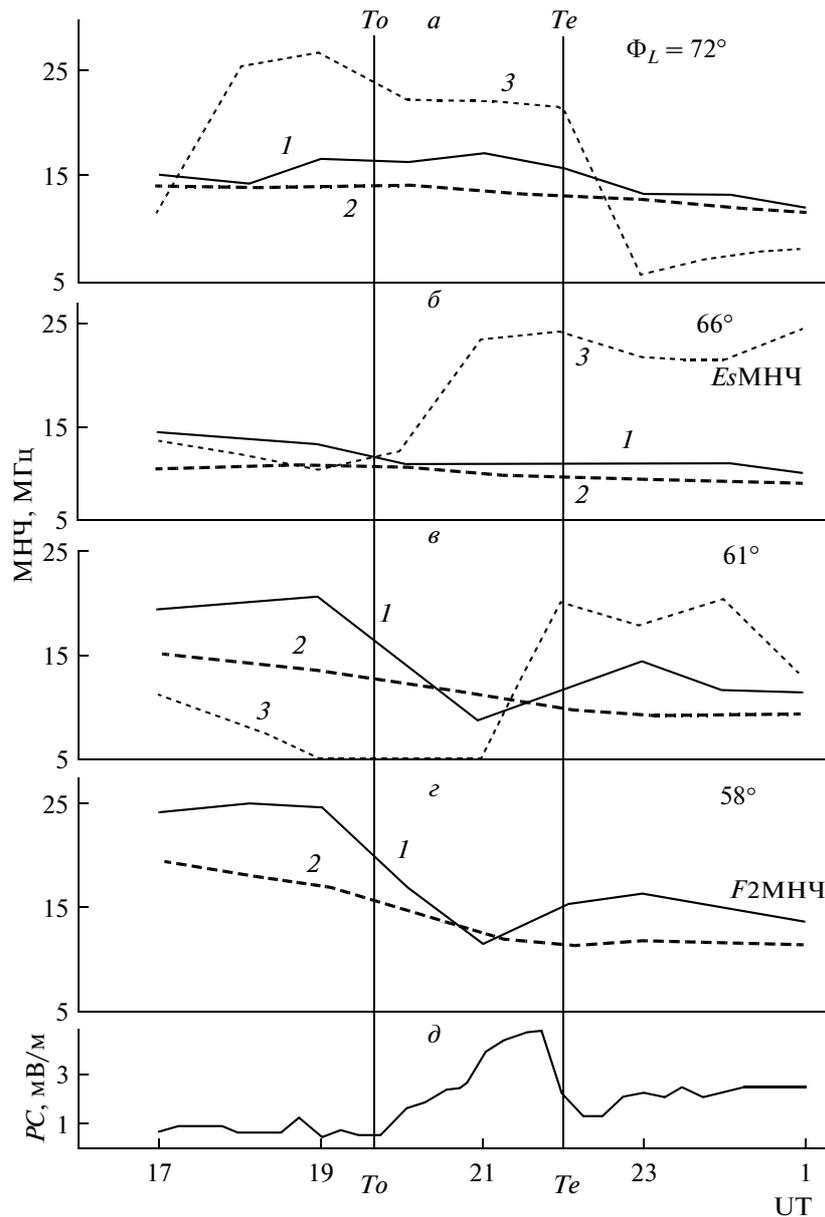


Рис. 2. Изменение значений F_2MUF и E_sMUF во время суббури 08 сентября 1990 г. на трассах: *a* – о-в. Хейса–НИС, полярная, $D = 2850$ км; *б* – Мурманск–НИС, аврорально-полярная, $D = 1550$ км; *в* – Санкт-Петербург–НИС, трансавроральная, $D = 1800$ км; *г* – Москва–НИС, трансполярная, $D = 2300$ км (НИС – научно-исследовательское судно ААНИИ в Норвежском море; Φ_L – инвариантная широта средней точки трассы, 1 – F_2MUF , 2 – “спокойная” медиана F_2MUF ; 3 – E_sMUF); *д* – PC -индекс магнитной активности.

редь зависит от интенсивности сигнала. Поэтому степень опознания можно приблизительно рассматривать как интенсивность сигнала. Из рисунка 4 видно, что степень опознания (интенсивность) сигналов на трассах минимальна во время максимума активной фазы бури (Dst min) и максимальна перед началом активной фазы и в конце ее. Важным является то, что минимум в степени опознания скорее всего не всегда вызван поглощением сигнала на трассе. Дело в следующем. В работе [Gonzales et al., 1994] введены градации

для магнитных бурь: интенсивные те, для которых значение $Dst = -100$ нТл или меньше, умеренные те, для которых это значение находится между -50 и -100 нТл, и слабые те, для которых это значение находится между -30 и -50 нТл. Первые две бури I и II на рис. 4 являются слабыми, а последняя III является интенсивной. Для слабых бурь поглощение на трассах должно быть пренебрежимо малым или отсутствовать, а для интенсивной бури поглощение более вероятно. Поэтому есть основание считать, что минимум в

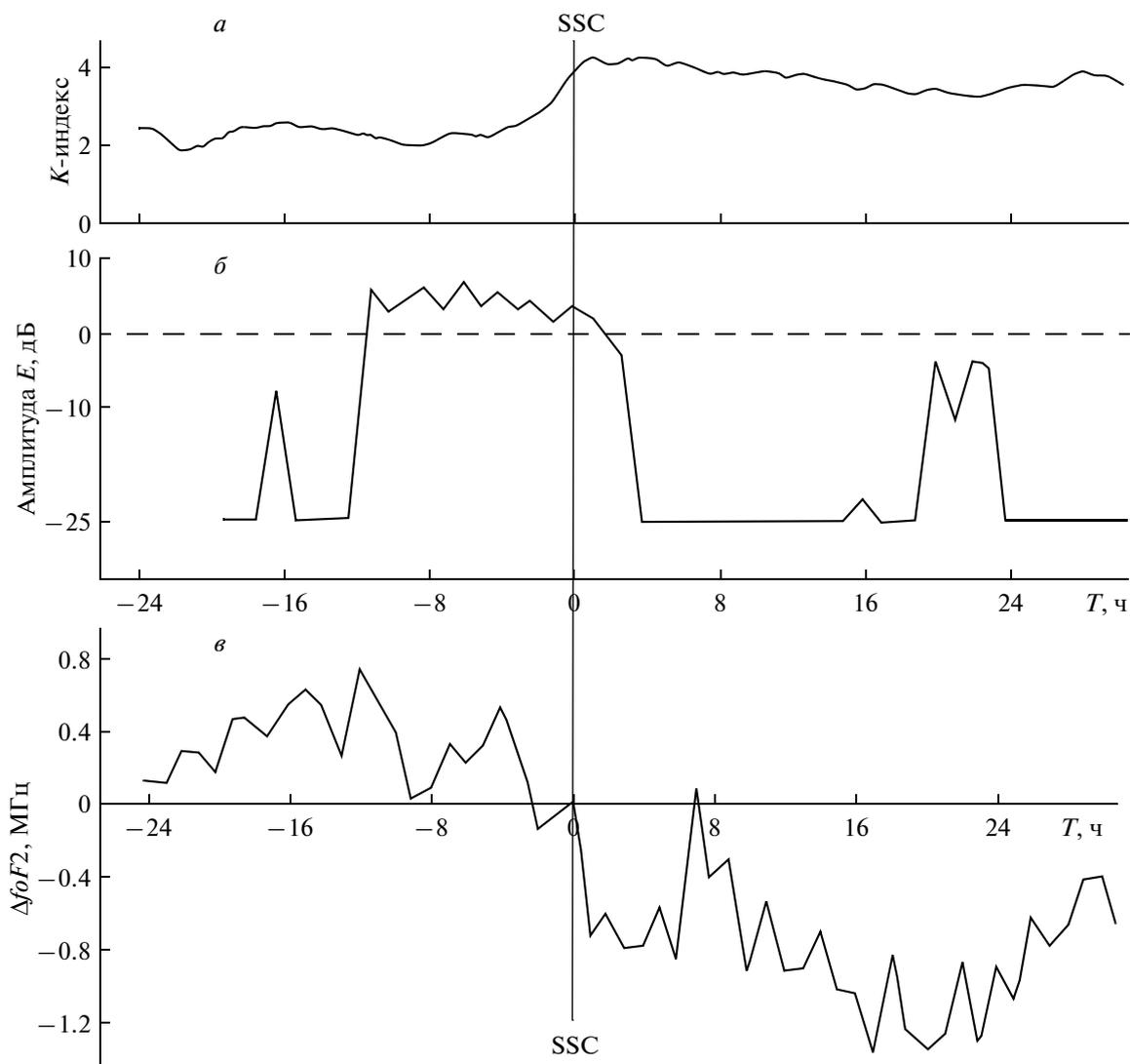


Рис. 3. Вариации усредненных по 50-ти геомагнитным бурям с августа 1957 по февраль 1959 г. параметров: *a* – K_p -индексов магнитной активности по ст. Колледж, Аляска, за период бури; *b* – усредненной амплитуды сигнала, принимаемого в Хираисо (Япония) станции WWW(Вашингтон, США) на частоте $f=20$ МГц; *c* – отклонения от месячной медианы значений $foF2$ по ст. Фэрбенкс. Здесь SSC – начало магнитной бури.

степени опознавания сигнала, по крайней мере для первых двух бурь, не связан с поглощением. Однако характер вариаций степени опознавания для всех трех бурь на рис. 4 приблизительно одинаков. Следовательно, вариации степени опознавания на трассах, скорее всего, подчиняются закономерностям ГЭ: рост этого параметра перед активной фазой бури, затем его спад во время активной фазы и снова рост в конце активной фазы. Т.е. картина приблизительно такая же, как и на рис. 3.

Рассмотрим далее эффекты суббурь. В работе [LaBelle, 2004] исследовались условия приема сигналов естественного и искусственного происхождения в диапазоне 50–5000 кГц на трассах высоких широт. Данные по приему СВ/КВ радио-

сигналов от множества дальних станций на 5-ти обсерваториях, лежащих в интервале инвариантных широт $67-79^\circ$, показывают, в частности, следующее. Перед началом активной фазы суббури, на фазе ее роста, создаются благоприятные условия для распространения радиосигналов от дальних станций. Благоприятные условия характеризуются ростом интенсивности принимаемых сигналов. На рисунке 5 (верхние две панели) показаны изменения усредненных по диапазонам 1.8–2.8 и 3.5–4.5 МГц интенсивностей сигналов во время суббури 27 февраля 1998 г. Можно видеть рост интенсивности сигнала за 7–8 ч до момента T_0 (07:56 UT) – начала взрывной фазы суббури, которая показана на нижней панели рис. 5. Далее в интервале T_0-T_e (10:00 UT) сигнал отсутствует. И

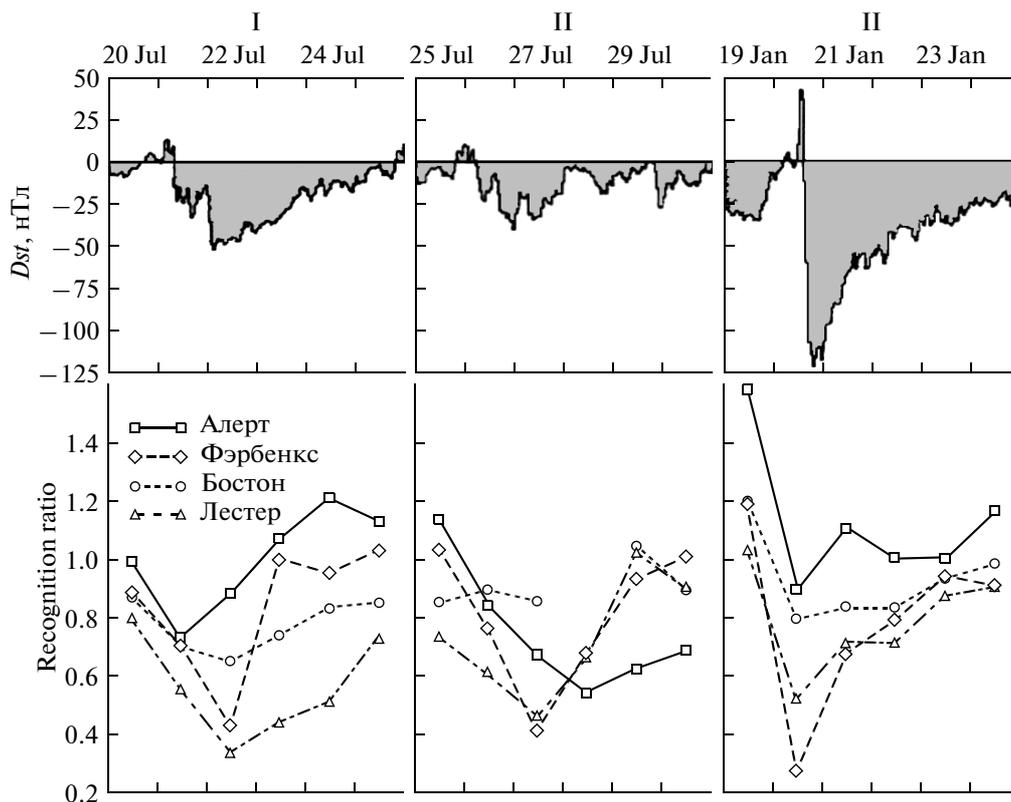


Рис. 4. Вариации Dst -индекса и степени опознавания сигнала в месте приема для четырех экспериментальных трасс во время трех магнитных бурь I–III. Общий передатчик Клайд Ривер имеет координаты (70° N; 291° E), приемные центры трасс: 1) Алерт (82° N; 298° E), $D = 1340$ км; 2) Фэрбенкс (71° N; 204° E), $D = 2960$ км; 3) Бостон (42° N; 289° E), $D = 3120$ км; 4) Лестер (53° N; 359° E), $D = 3800$ км.

после T_e он наблюдается вновь. Скорее всего, здесь имеют место проявления, характерные для ГЭ.

Другой пример проявлений ГЭ на протяженных радиотрассах приведен на рис. 6 [Благовещенский и др., 1996]. Объектом изучения была усредненная за интервал ~ 2 мин амплитуда сигнала в месте приема Санкт-Петербург. Для трассы Санкт-Петербург–Форт Коллинз, рис. 6а, наблюдается не ярко выраженный ГЭ: рост амплитуды сигнала за 1.5 ч до начала активной фазы суббури, потом спад амплитуды во время активной фазы и снова подъем амплитуды в районе окончания активной фазы. Для двух других трасс Санкт-Петербург–Сан-Франциско и Санкт-Петербург–Ванкувер, рис. 6а, 6б, ГЭ выражен более четко. Здесь характерная особенность состоит в том, что начало роста амплитуды сигнала на всех трассах происходит за ~ 1.5 ч до начала активной фазы, а не за 6–8 ч, как отмечалось выше. И второе, что следует отметить, амплитуда сигнала на трассах во время активной фазы суббури очень редко падает до нуля, что свидетельствует о пренебрежимо малой роли поглощения, хотя сама суббуря достаточно интенсивна. Тем самым, ГЭ здесь скорее вызван изменениями в F -области ионосферы, чем в D , во время суббури.

Как итог вышеприведенных рассмотрений, следует подчеркнуть, что проявления ГЭ на трассах в амплитуде принимаемого сигнала имеют место как во время бурь, так и во время суббурь. Например, в соответствии с рис. 7 обзора по ионосфере рост амплитуды сигнала перед началом активной фазы суббури может быть объяснен с физической точки зрения двумя причинами: 1) снижением электронной концентрации $F2$ -слоя, что приводит к приближению частоты сигнала к значению максимальной наблюдаемой частоты, а также к уменьшению расходимости поля сигнала; 2) ростом высоты $F2$ -слоя, который вызывает уменьшение эффективной частоты соударений. Что касается магнитных бурь, то здесь все обстоит сложнее, и лишь усреднения, как отмечалось выше, позволяют выявить некоторые тенденции в изменениях тех или иных параметров.

2.3. Распространение вне дуги большого круга. Данный вид распространения волн более характерен для высоких широт. Он изучается уже достаточно давно, поэтому получены статистические оценки вероятности появления его в тех или иных условиях. Например, для трансавроральной трассы и трассы, полностью лежащей в полярной

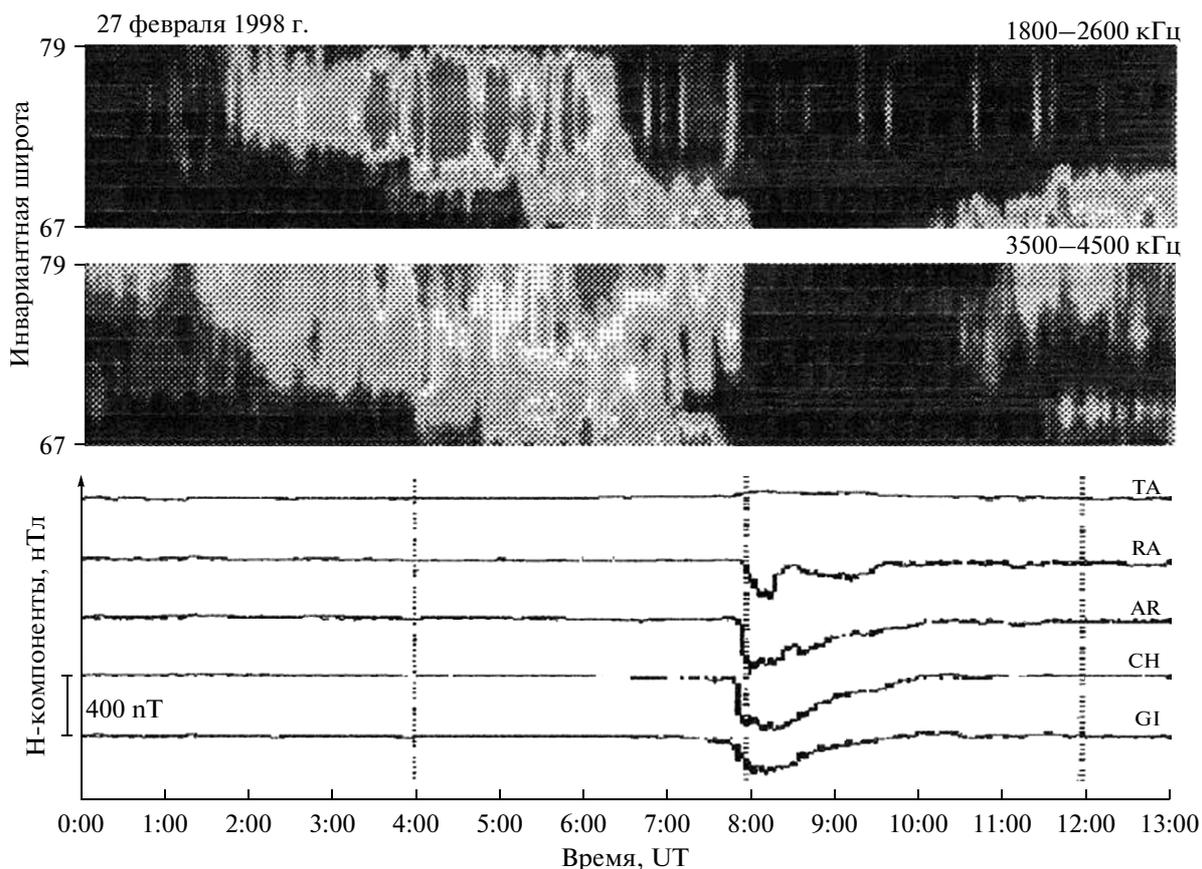


Рис. 5. Изменения усредненных интенсивностей сигналов, принятых от дальних радиостанций на 5-ти меридиональных обсерваториях северной Канады, расположенных в интервале 67–79° инвариантной широты, во время суббури 27 февраля 1998 г. (верхние две панели, где интенсивности сигналов усреднены по диапазону 1.8–2.8 МГц и соответственно 3.5–4.5 МГц); записи *H*-компоненты магнитного поля Земли, измеренной на 5-ти станциях системы CANOPUS в том же интервале широт (нижняя панель).

шапке, распространение вне дуги большого круга является нормальной особенностью [Warrington and Stocker, 2003]. Если трасса проходит внутри главный ионосферного провала или пересекает его, то отражения возможны от северной стенки провала или от градиентов и/или неоднородностей в области аврорального овала. А именно, возможно рассеяние от магнито-ориентированных неоднородностей, вызванных высыпанием частиц в области северной стенки провала и/или аврорального овала. Что касается магнитных бурь и суббурь, то во время их протекания высыпания практически существуют всегда, следовательно, вероятность появления распространения вне дуги большого круга на высокоширотных трассах во время возмущений велика.

Рассмотрим пример распространения вне дуги большого круга во время суббури 25 октября 2003 г. [Благовещенский, 2011]. Суббуря по данным сети магнитометров IMAGE длилась с 13:00 до 18:00 UT и имела амплитуду ~200 нТл.

Рисунок 7а иллюстрирует ионограмму НЗИ на трассе Мурманск–Санкт-Петербург в 13:48 UT 25 октября. Этот момент соответствует фазе взрыва суббури. Ионограмма характеризует два типа распространения: нормальное в интервале дальностей 1800–1950 км и вне дуги большого круга (боковое отражение) на дальности 2250 км с задержкой относительно нормального сигнала порядка $\Delta t = 300 \text{ км} / C = 1 \text{ мс}$. Нормальное распространение радиоволн вдоль дуги большого круга происходит посредством слоя *F2* и слоя *E*. Боковой сигнал на рис. 7а характеризуется отражением с групповым запаздыванием, что свидетельствует о высокой плотности плазмы в отражающей области и о ее большом объеме. Последний можно оценить по данным КВ-радаров.

На рисунке 7б показаны данные радара CUTLASS, характеризующие мощность рассеянного от ионосферных неоднородностей сигнала. Из рисунка видно, что в спокойное время с 11:00 до 13:00 UT область неоднородностей сосредоточена на широтах 76–79° несколько южнее дневного каспа. Однако с началом суббури в 13:00 UT об-

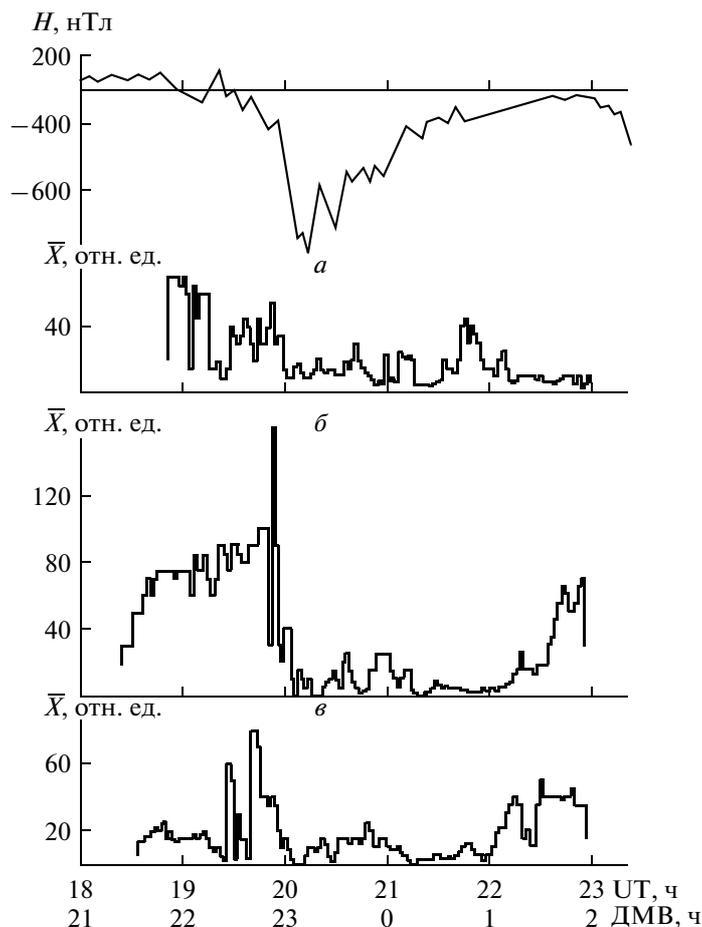


Рис. 6. Изменения средних значений амплитуды сигналов X на многоскачковых трассах во время суббури 28 декабря 1977 г. Трассы: Санкт-Петербург–Форт Коллинз, $D = 7200$ км, $f = 13$ МГц (*a*); Санкт-Петербург–Сан-Франциско, $D = 8800$ км, $f = 15$ МГц (*б*); Санкт-Петербург–Ванкувер, $D = 7600$ км, $f = 17$ МГц (*в*). ДМВ – декретное московское время.

ласть высыпаний, вызывающих неоднородности, резко смещается к югу до широт $62\text{--}64^\circ$ (the hard “drizzle” precipitation) [Hunsucker and Hargreaves, 2003]. Скорость смещения к югу согласно рис. 7б составляет порядка 15° в час. Аналогичное смещение к югу в ночное время по данным работы [Lewis et al., 1998] составляет 3.1° в час, т. е. почти в 5 раз медленнее. Сравнение данных рис. 7а и рис. 7б показывает, что в 13:48 UT боковой сигнал вызван тем, что точка отражения трассы, лежащая на геомагнитной широте 60.5° (кружок на рис. 7б), находится вблизи области высыпаний с интенсивными неоднородностями.

Основной вывод состоит в следующем. Не каждая суббуря вызывает боковые сигналы. Они возможны с большой вероятностью, если точка отражения трассы находится вблизи области высыпаний (с неоднородностями), которая быстро перемещается во время суббури от высоких широт к более низким. Указанный эффект появления боковых сигналов является достаточно новым, малоизученным.

2.4. Смена механизмов распространения радиоволн и углы прихода. Здесь имеется в виду следующий экспериментальный факт. Нормальный механизм распространения радиоволн вдоль дуги большого круга иногда меняется от отражения по слоям $F2$ и E (если последний существует) только к отражению по слою E_s . Расположение трасс, безусловно, играет определяющую роль в рассматриваемом явлении. Вместе с тем немаловажное значение имеет и характер геомагнитного возмущения, прежде всего интенсивность бурь/суббурь. Так, если радиотрасса является среднеширотной, и магнитное возмущение даже достаточно интенсивно, то смены механизма распространения в указанном смысле может не происходить. Для высокоширотных трасс картина иная. Прежде всего, интенсивная буря или суббуря приводят к поглощению сигналов на трассах, и все механизмы распространения пропадают. При средней или умеренной буре/суббуре, когда точка отражения трассы попадает в область высыпания частиц и при этом образуется спорадический слой E_s , то

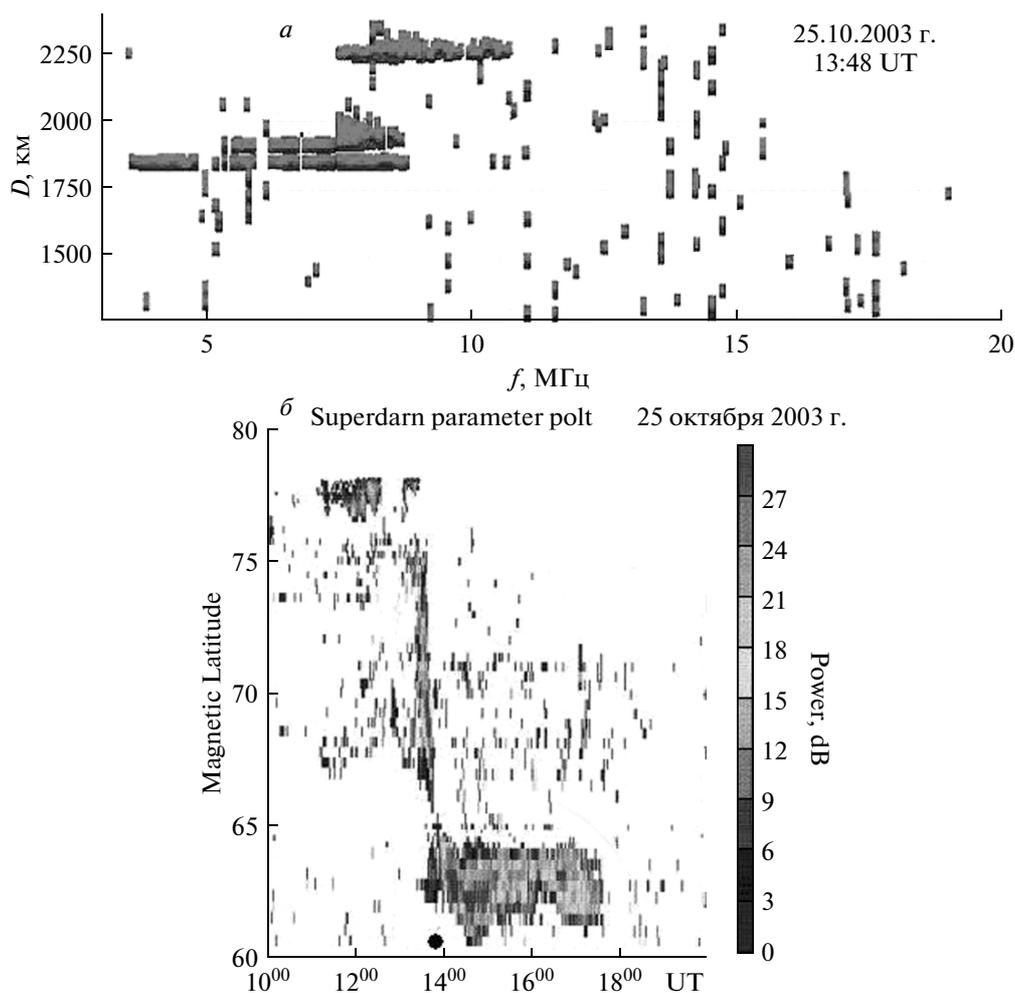


Рис. 7. Ионограмма наклонного зондирования ионосферы для трассы Санкт-Петербург–Мурманск во время суббури 25 октября 2003 г. с боковым сигналом на $D = 2250$ км (а); мощность рассеянного сигнала радара CUTLASS для 25 октября 2003 г., где кружком показана область отражения трассы в 13:48 UT (б).

смена механизма распространения возможна [Ritchie and Honary, 2009]. Однако и здесь имеется особенность. Если слой E_s существует, но он не интенсивен, то возможны отражения сигналов как от $F2$ -слоя, так и от E_s -слоя одновременно, см. рис. 7 (верхняя панель). В случае появления очень интенсивного E_s -слоя, он полностью может блокировать отражение сигнала от $F2$ -слоя, и сигнал отражается только от E_s -слоя. Именно в этом случае происходит смена механизма распространения. Вид распространения посредством E_s -слоя с точки зрения использования его на радиотрассах подробно анализировался в работах [Goodman and Ballard, 2004; Milan et al., 1997; Hunsucker et al., 1996].

На рисунке 8а из работы [Milan et al., 1999] в качестве примера представлены данные радара некогерентного рассеяния EISCAT, который расположен в высоких широтах возле г. Тромсё, Норвегия (69.7° N, 18.9° E). Слева показан типичный

Ne -профиль в 20:00 UT для спокойных условий: максимум электронной концентрации в F -области составляет $2.1 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$, и нет выраженного выступа в области E . Во время активной фазы суббури в 01:52 UT картина принципиально изменяется. За счет высыпаний образуется мощный максимум электронной концентрации на высоте ~ 120 км – спорадический слой E_s . Причем электронная концентрация в E -области значительно выше, чем в F -области. Подобная закономерность отражена также на рис. 7 обзора по ионосфере, где во время активной фазы суббури (интервал T_0 – T_e) значение foE_s имеет максимум, а соответственно $foF2$ минимально. Таким образом, появление интенсивного слоя E_s во время суббури скорее всего приведет к изменению механизма распространения волн на радиотрассе, на точку отражения которой оказывает влияние спорадический E_s -слой. Причем это влияние скажется в изменении амплитуды сигнала и углов прихода радиоволн. Так,

по данным работы [Hunsucker et al., 1996], сигнал, отраженный от слоя E_s , может возрасти (но не всегда) по амплитуде на 20–30 дБ. Что касается углов прихода волн, то их изменение во время суббури целесообразнее рассмотреть на следующем примере.

На рисунке 8б из работы [Бояринцев, 1976] представлены результаты измерений углов прихода декаметровых радиоволн во время суббури на трассе Мурманск–Нижний Новгород. Трасса является односкачковой субавроральной, поэтому во время достаточно интенсивной суббури (~300 нТл) за 13–14 июля 1975 г. вблизи области отражения ночью можно ожидать появление спорадического E_s -слоя. В подобных условиях очень вероятно смена механизма распространения радиоволн во время этой суббури. Действительно, угол места (вертикальный) β_m° на рисунке меняется в пределах от 40 до 80° во время суббури. Возможное объяснение этому состоит в следующем. За 3.5 ч до момента T_0 отражение сигнала происходит от F_2 -слоя. Далее, согласно рис. 7 обзора по ионосфере, за 3 ч до момента T_0 этот слой начинает подниматься вплоть до момента T_0 . В это же время значения foF_2 падают, поэтому траектория волны поднимается вверх, и угол места растет от 50 до 80°. В интервале T_0 – T_e сигнал уже отражается от E_s -слоя на высоте ~110–120 км. Потому траектория волны резко понижается, и угол места уменьшается до 40°. Далее после момента T_e сигнал снова отражается от F_2 -слоя, траектория поднимается, и угол места растет от 40 до 75°. Согласно рис. 7 обзора по ионосфере после момента T_e в течение нескольких часов F_2 -слой понижается, что приводит к уменьшению угла места от 75 до 40° на рис. 8б. Азимутальный угол $\Delta\alpha^\circ$ на рис. 8б во время суббури меняется в пределах от –12 до 4°. Основные изменения происходят в отрицательной области углов. Это скорее всего связано с тем, что градиенты и неоднородности, образующиеся в районе точки отражения трассы во время суббури, перемещаются к югу во время нее. Трасса ориентирована в значительной степени по широте. Поэтому отклонения азимутальных углов за счет отражения волн от неоднородностей,двигающихся к югу, будут отрицательными, что можно видеть из рис. 8б.

Таким образом, во время суббури происходит смена механизмов распространения радиоволн и вызванные ею существенные изменения углов прихода волн. Азимутальные углы изменяются от –8 до 8°, вертикальные – от 0 до 40° относительно исходных (невозмущенных) значений.

2.5. Вариации отношения сигнал/шум на трассах. Здесь основное внимание будет уделено анализу отношения сигнал/шум на высокоширотных трассах во время геомагнитных возмущений. Подобные исследования нашли отражение в работах

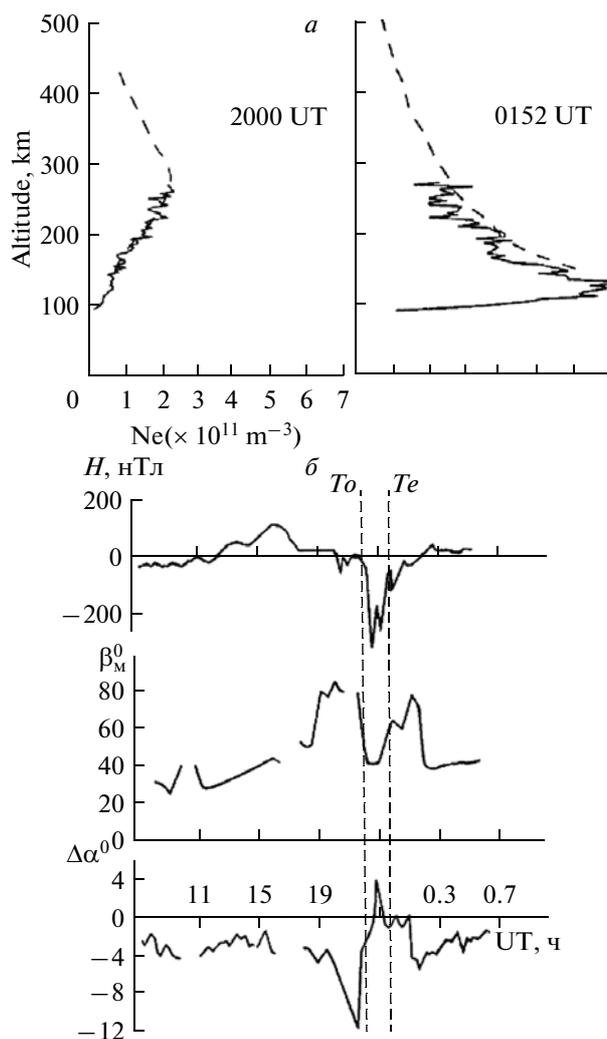


Рис. 8. Вертикальные профили электронной концентрации по данным радара EISCAT перед суббурей 18–19 июня 1996 г. в 20:00 UT и во время активной ее фазы в 01:52 UT (а); вариации углов прихода радиоволн β_m° (вертикального) и $\Delta\alpha^\circ$ (азимутального) на трассе Мурманск–Нижний Новгород в течение суббури 13–14 июля 1975 г. (б).

[Weatherwax et al., 1994; Milan et al., 1998; LaBelle, 2004; Milan et al., 1997].

Из результатов работы [Weatherwax et al., 1994] следует, что существует прямая зависимость между уровнем шума в СВ/КВ диапазоне и степенью геомагнитной активности в авроральной зоне (Аляска). Отмечается, что возможными естественными источниками роста уровня шума во время возмущений могут быть синхротронная радиация, циклотронная мазерная радиация и транзитная радиация, хотя не исключаются и искусственно созданные человеком источники, например, сигналы от дальних передатчиков.

В работе [Milan et al., 1997] изучалось, в частности, поведение сигналов и шумов на четырех

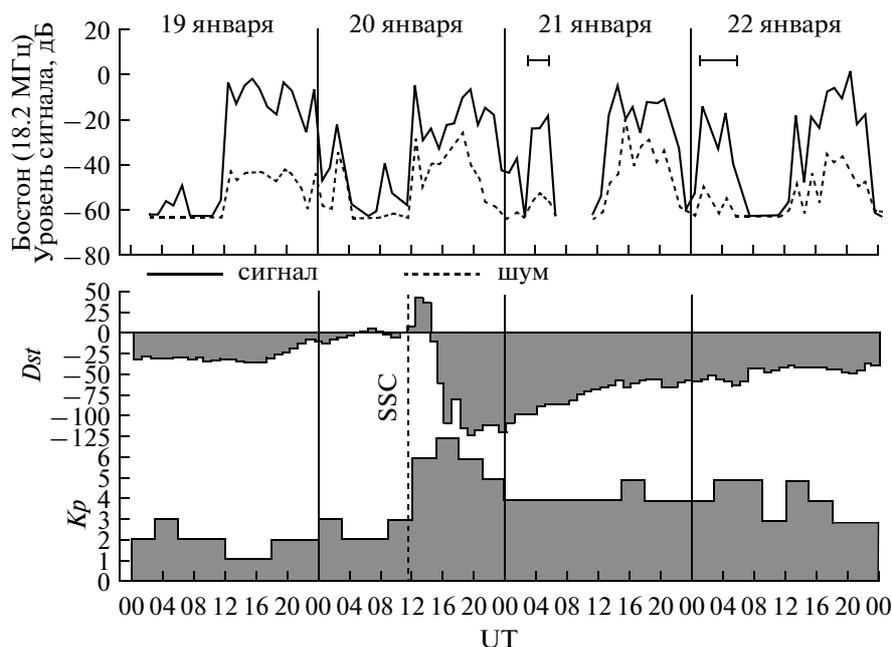


Рис. 9. Вариации амплитуды сигнала (сплошная линия) и радиозумов (штриховая линия) на трансавроральной трассе Клайд Ривер–Бостон, $D = 3120$ км, $f = 18.2$ МГц (верхняя панель) во время магнитной бури 20–22 января 1989 г. (нижняя панель).

радиотрассах с общим передатчиком, расположенным в полярной шапке. Одна из трасс, Клайд Ривер–Бостон длиной $D = 3120$ км, является трансавроральной и имеет точку отражения, лежащую в авроральном овале. На рисунке 9 из рассматриваемой работы, в качестве типичного примера, представлены результаты наблюдений на трассе во время магнитной бури 20–22 января 1989 г. Рабочая частота $f = 18.2$ МГц, сигнал обозначен на рисунке сплошной линией, шум – штриховой. Прежде всего, из рисунка можно видеть, что для 19 января днем с 12:00 до 23:00 UT, когда имеют место почти спокойные условия ($Dst = -25 \dots -5$ нТл) отношение сигнал/шум на трассе составляет порядка 35 дБ. Однако для дневных часов 20 и 21 января, когда достигается максимум активной фазы магнитной бури ($Dst = -125 \dots -75$ нТл) отношение сигнал/шум уменьшается и составляет не более 20 дБ. Днем 22 января, на спаде активной фазы бури ($Dst = -40 \dots -30$ нТл), отношение сигнал/шум снова становится выше и достигает порядка 30 дБ. Причем характерным является то, что уровень сигнала в дневные часы с 19 по 22 января остается приблизительно одинаковым. Следовательно, явно наблюдается рост уровня шума во время активной фазы магнитной бури. Данное обстоятельство находится в соответствии с результатами, отмеченными выше в работе [Weatherwax et al., 1994].

Другой особенностью на рассматриваемой трассе является поведение отношения сигнал/шум в ночные часы. Имеются в виду так на-

зываемые события распространения посредством аврорального E -слоя (auroral E propagation events, или APE) длительностью 2–6 ч [Milan et al., 1997]. На рисунке 9 для 21 и 22 января они возникают в интервале 01:00 – 06:00 UT и обозначены толстыми горизонтальными линиями. Явление APE случается во время бурь/суббурь, когда имеют место высыпания в авроральном овале и создается повышенная электронная концентрация в E -слое. Пример этого показан на рис. 8а для 01:52 UT, а возможность распространения посредством E -слоя обсуждалась выше в разделе 2.4. Из рисунка 9 для 21 и 22 января уровень сигнала во время APE на ~ 10 дБ меньше, чем этот уровень днем 20 и 21 января. Однако уровень шума во время APE низкий, и отношение сигнал/шум здесь равно ~ 35 дБ, тогда как днем оно составляло ~ 20 дБ. Подобное уменьшение уровня шума, возможно, вызвано следующими причинами: (1) пространственным ограничением области, из которой КВ-сигналы дальних передатчиков могут распространяться к приемнику в Бостоне посредством локального аврорального E -слоя и (2) уменьшением числа работающих КВ-передатчиков ночью и, следовательно, уменьшением межканальной интерференции на рабочей частоте 18.2 МГц [Milan et al., 1997].

Таким образом, можно сделать следующее заключение. Уровень шума в КВ-диапазоне возрастает во время магнитных бурь или суббурь на радиотрассе, пересекающей авроральный овал. Днем повышение шума во время возмущений приводит к существенному уменьшению отноше-

ния сигнал/шум. Ночью, во время возникновения аврорального E -слоя за периоды возмущений, отношение сигнал/шум достаточно велико, что дает возможность использовать этот канал распространения для радиосвязи.

2.6. Доплеровский метод на трассах. Данный метод регистрации характеристик сигналов на КВ-радиотрассах позволяет наблюдать быстропротекающие процессы в ионосфере как естественного, так и искусственного происхождения. Доплеровским методом обычно изучаются эффекты геомагнитных возмущений (бурь/суббурь), солнечных вспышек, восходно-заходных явлений в ионосфере, процессов в нижней атмосфере, а также искусственные ионосферные возмущения, вызванные взрывами, мощным КВ-радиоизлучением, стартами мощных ракет и т.д. Преимуществом метода является высокое временное разрешение, возможность проведения непрерывных наблюдений, относительная простота и дешевизна аппаратуры. Недостаток – интерпретация экспериментальных данных осложняется интегральным эффектом по всей траектории волны на трассе. Для получения более достоверной информации о пространственной структуре ионосферных возмущений и идентификации их типа осуществляют многоканальный прием доплеровских сигналов, т.е. проводят наблюдения одновременно на сети пространственно-частотно-разнесенных радиотрасс, а также сочетают доплеровские измерения с другими видами наблюдений.

На рисунке 10а из работы [Благовещенский, 2011] в качестве примера представлен динамический доплеровский спектр КВ-сигнала (сонограмма) для среднеширотной трассы Кипр–Санкт-Петербург ($D = 3900$ км, $f = 9410$ кГц) за период взрывной фазы суббури интенсивностью $I_{\text{макс}} = 400$ нТл с 02:00 до 03:00 UT 29.04.2001 г. Здесь ширина доплеровского спектра $\Delta f_D = 4$ Гц. Из рисунка видно, что имеют место волновые возмущения с квазипериодом $T_w = 30$ мин и амплитудой $f_{D\text{макс}} = 2$ Гц. Наблюдаемые волновые процессы относятся к классу среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), которые проявляются в том числе и на средних широтах во время бурь/суббурь.

На рисунке 10б приведена сонограмма во время солнечной вспышки 18 ноября 2003 г. на радиотрассе Лондон–Санкт-Петербург ($D = 3500$ км, $f = 12095$ кГц). Из рисунка следует, что внезапное ионосферное возмущение типа SFD началось в 16:21 UT, достигло максимума в 16:24:30 UT и закончилось в 16:30 UT (длительность возмущения 9 мин). Во время максимума SFD положительное доплеровское смещение частоты $f_{d\text{макс}}$ составило 4.8 Гц на трассе. Таким образом, характеристики SFD 18 ноября 2003 г. (амплитуда и длительность

возмущения, незначительное поглощение диагностических КВ-сигналов в нижней ионосфере) свидетельствуют о том, что рассматриваемая вспышка сопровождалась значительным увеличением интенсивности ультрафиолетового, а не рентгеновского, излучения Солнца. По классификации вспышка на Солнце 18 ноября 2003 г. относится к типу M солнечных вспышек.

3. О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БУРЬ/СУББУРЬ

Ранее в обзоре по ионосфере автором был сформулирован подход для краткосрочного (2–3 ч) прогнозирования развития бурь/суббурь по данным ВЗ ионосферы. Здесь подход аналогичен, но он основан на данных распространения радиоволн на трассах.

3.1. Данные наклонного зондирования ионосферы. Имеется в виду метод наклонного зондирования, в котором отсутствуют измерения амплитуды сигнала. В сущности ионограммы НЗИ не являются существенно более информативными, чем ионограммы ВЗИ, с точки зрения выявления предвестников возмущений. Они, как известно, более информативны только во время самих возмущений [Благовещенский, 2011], а не перед ними. Поэтому ионограммы НЗИ типа представленной на рис. 7а могут быть полезны для опознавания предвестников возмущений в тех районах, где отсутствуют ионозонды ВЗИ. Имеются в виду высокие широты, горные массивы и малолюдные места, где ионозондов крайне мало, или протяженные водные поверхности, где ионозонды отсутствуют вообще. Пример подобных измерений максимальных наблюдаемых частот на трассах над морем представлен на рис. 2. В частности, из рис. 2а видно, что на широте порядка 72° предвестником возмущений является появление E_s -отражений с большими значениями $E_s\text{МНЧ}$ за ~3 ч до начала суббури (момента T_0). На более низких широтах предвестником служит $F2\text{МНЧ}$. Некоторым преимуществом НЗИ перед ВЗ можно признать значительно более широкий охват территории, если используются несколько передатчиков НЗИ, сигналы от которых принимаются в одном общем центре. Помимо роста $F2\text{МНЧ}$ и $E_s\text{МНЧ}$ на трассах перед возмущением, рис. 2, предвестником возмущений может быть расширение диапазона частот МНЧ–ННЧ за несколько часов до момента T_0 , см. пример на рис. 1.

3.2. Измерения амплитуды сигнала на КВ-трассах. Уровень амплитуды сигнала в месте приема трассы, как отмечалось в разделе 2.2, существенно зависит от характера магнитного возмущения. Но примечательно то, что перед бурей или суббурей за несколько часов до момента T_0 , происходит заметный рост амплитуды сигнала, который можно рассматривать как предвестник возмуще-

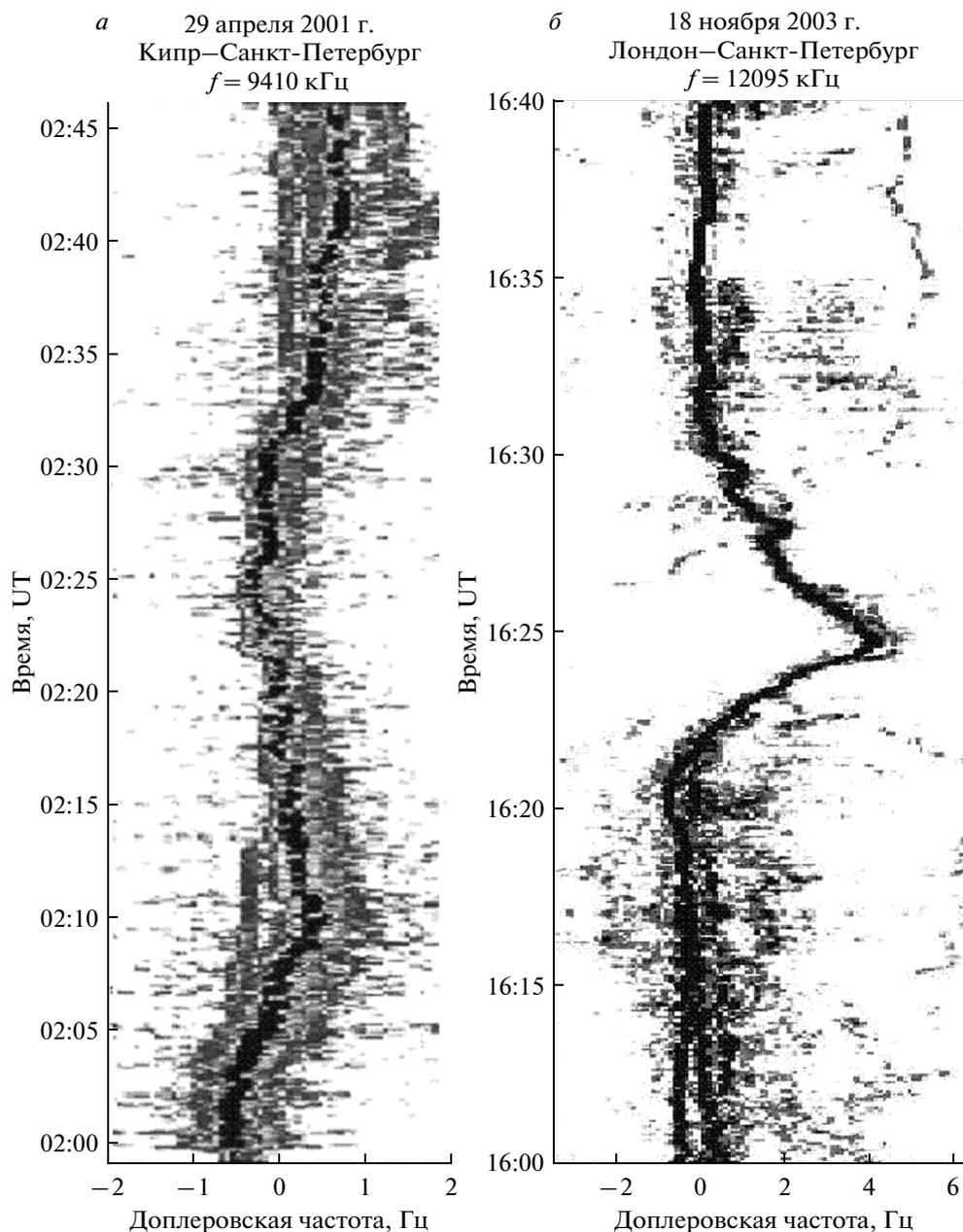


Рис. 10. Динамические доплеровские спектры КВ-сигналов (сонограммы) для радиотрассы Кипр—Санкт-Петербург с 02:00 до 02:46 UT во время суббури 29 апреля 2001 г. (а) и для радиотрассы Лондон—Санкт-Петербург с 16:10 до 16:40 UT во время солнечной вспышки 18 ноября 2003 г. (б).

ния. На рисунке 3 данным предвестником можно считать рост амплитуды сигнала на трассе Вашингтон—Хираисо за ~10 ч до момента SSC бури. Причем данный рост происходит на фоне роста значений $foF2$ в районе точки отражения трассы. Скорее всего, рост $foF2$ и амплитуды сигнала вызван ГЭ в ионосфере. На рисунке 5 показан рост амплитуды сигнала на трассах за 6–8 ч до момента T_0 суббури. Для многоскачковых протяженных трасс, рис. 6, рост амплитуды сигнала перед моментом T_0 суббури несколько меньше и составля-

ет 1–1.5 ч. Важно то, что данный рост амплитуды существует и если приобрести опыт работы на трассе с точки зрения правильной идентификации амплитуд сигналов, то по ним, в принципе, можно пытаться осуществлять краткосрочный прогноз начала возмущения.

4. ВЫВОДЫ

Результаты приведенных рассмотрений состоят в следующем.

1. На КВ-трассах во время бурь/суббурь наблюдается картина, аналогичная проявлениям ГЭ в ионосфере: расширение диапазона частот МПЧ-ННЧ перед активной фазой бури/суббури, сужение его во время активной фазы и снова расширение диапазона в конце активной фазы.

2. Проявления ГЭ на трассах в амплитуде принимаемого сигнала имеют место как во время бурь, так и во время суббурь. Например, рост амплитуды сигнала перед началом активной фазы суббури может быть объяснен с физической точки зрения двумя причинами: 1) снижением электронной концентрации F_2 -слоя, что приводит к приближению частоты сигнала к значению максимальной наблюдаемой частоты, а также к уменьшению расходимости поля сигнала; 2) ростом высоты F_2 -слоя, который вызывает уменьшение эффективной частоты соударений. Что касается магнитных бурь, то здесь все обстоит сложнее.

3. Не каждая суббуря вызывает боковые сигналы. Они возможны с большой вероятностью, если точка отражения трассы находится вблизи области высыпаний (с неоднородностями), которая быстро перемещается во время суббури от высоких широт к более низким. Указанный эффект появления боковых сигналов является достаточно новым, малоизученным.

4. Во время суббури происходит смена механизмов распространения радиоволн и вызванные ею существенные изменения углов прихода волн.

5. Уровень шума в КВ-диапазоне возрастает во время магнитных бурь или суббурь на радиотрассе, пересекающей авроральный овал. Днем повышение шума во время возмущений приводит к существенному уменьшению отношения сигнал/шум. Ночью, во время возникновения аврорального E -слоя за периоды возмущений, отношение сигнал/шум достаточно велико, что дает возможность использовать этот канал распространения для радиосвязи.

6. Перед бурей или суббурей за несколько часов до начала активной фазы возмущения, как отмечалось, происходит заметный рост амплитуды сигнала и расширение диапазона частот МНЧ-ННЧ. Данные эффекты можно рассматривать как предвестники возмущения. Если приобрести опыт работы на трассе с точки зрения правильной идентификации диапазона частот и амплитуд сигналов, то по ним, в принципе, можно пытаться осуществлять краткосрочный прогноз начала возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский Д. В. Короткие волны в аномальных радиоканалах. Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co. KG. 422 с. 2011.
- Благовещенский Д. В., Борисова Т. Д., Егорова Л. В. Пред- и послебуревые ситуации в ионосфере и распространение декаметровых радиоволн // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 36. №4. С. 125–134. 1996.
- Бояринцев Е. Л. Анализ углов прихода радиоволн на КВ трассе Мурманск – Горький в течение авроральной суббури 13–14.VII.1975 г. / Распространение декаметровых радиоволн. Ред. Ю.Н. Черкашин. М.: Наука, С. 56–63. 1976.
- Blagoveshchensky D.V., Borisova T.D. Substorm effects of ionosphere and HF propagation // Radio Sci. V. 35. № 5. P. 1165–1171. 2000.
- Blagoveshchensky D.V., Egorova L.V., Lukashkin V.M. High-latitude ionospheric phenomena diagnostics by high-frequency radio wave propagation observations // Radio Sci. V. 27. № 2. P. 267–274. 1992.
- Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A., Rodger A.S. Ionosphere dynamics over Europe and western Asia during magnetospheric substorms 1998-99 // Ann. Geophys. V. 21. № 5B. P. 1141–1151. 2003.
- Blagoveshchensky D.V., MacDougall J.W., Piatkova A.V. Ionospheric effects preceding the October 2003 Halloween storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 11. P. 821–831. 2006.
- Glase W.E., Robertson G.R. Advances in IP data transfer over HF channels. Nordic Shortwave Conference / Conference proceedings. Sweden. P. 7.4.1–7.4.10. 2001.
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide D., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas P. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. V. 99. № A4. P. 5771–5792. 1994.
- Goodman J.M., Ballard J.W. An examination of elevated frequency propagation over a transpolar path // Radio Sci. V. 39. № 2. P. 204–212. 2004.
- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge University Press. Ed. J.T. Houghton, M.J. Rycroff, A.J. Dessler. P. 477–482. 2003.
- Hunsucker R.D., Rose R.B., Adler R.W., Lott G.K. Auroral- E mode oblique HF propagation and its dependence on auroral oval position // IEEE T. Antenn. Propag. V. 44. № 3. P. 383–388. 1996.
- Jodalen V., Bergsvik T., Cannon P.S., Arthur P.C. Performance of HF modems on high-latitude paths using multiple frequencies // Radio Sci. V. 36. № 6. P. 1687–1698. 2001.
- Kilgallen J. Wideband search and collection techniques reveal elusive HF communications // Nordic Shortwave Conference. Conference proceedings. Sweden. P. 7.2.1–7.2.7. 2001.
- LaBelle J. High-latitude propagation studies using a meridional chain of LF/MF/HF receivers // Ann. Geophysicae. V. 22. № 5. P. 1705–1718. 2004.
- Lewis R.V., Freeman M.P., Reeves G.D. The relationship of HF radar backscatter to the accumulation of open magnetic flux prior to substorm onset // J. Geophys. Res. V. 103. № A11. P. 26.613–26.619. 1998.
- McNamara L.F., Baker C.R., Borer W.S. Real-time specification of HF propagation support based on a global assimilative model of the ionosphere // Radio Sci., 44,

- RS0A15, doi:10.1029/2008RS004004, printed 45(1). 2010.
- *Milan S.E., Davies J.A., Lester M.* Coherent HF radar backscatter characteristics associated with auroral forms identified by incoherent radar techniques: A comparison of CUTLASS and EISCAT observations // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A2. P. 22.591–22.604. 1999.
 - *Milan S.E., Jones T.B., Lester M., Warrington E.M., Reeves G.D.* Substorm correlated absorption on a 3200 km trans-auroral HF propagation path // *Ann. Geophysicae.* V. 14. № 2. P. 182–190. 1996.
 - *Milan S.E., Jones T.B., Warrington E.M.* Enhanced MUF propagation of HF radio waves in the auroral zone // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 59. № 2–3. P. 237–249. 1997.
 - *Milan S.E., Lester M., Jones T.B., Warrington E.M.* Observation of the reduction in the available HF band on four high latitude paths during periods of geomagnetic disturbance // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 60. № 4. P. 617–629. 1998.
 - *Ondoh T., Obu K.* Prediction of HF communications disturbances by pre-SC HF field increase on polar paths crossing the auroral zone // *Solar-Terr. Predict. Proc.* V. 4. P. D2-21–D2-30. 1980.
 - *Ritchie S.E., Honary F.* Storm sudden commencement and its effect on high-latitude HF communication links // *Space Weather*, 7, S06005, doi:10.1029/2008SW000461. 2009.
 - *Stocker A.J., Warrington E.M., Zaalov N.Y.* The effect of the mid-latitude trough on the direction of arrival and time-of-flight of HF radio signals // *Acta Geod. Geophys. Hu.* V. 37. № 5. P. 351–163. 2002.
 - *Vilella C., Miralles D., Altadill D., Acosta F., Solé J.G., Torta J.M., Pijoan J.L.* Vertical and oblique ionospheric soundings over a very long multihop HF radio link from polar to midlatitudes: Results and relationships. *Radio Sci.*, 44, RS2014, doi:10.1029/2008RS004001. 2009.
 - *Wagner L.S., Goldstein J.A., Rupar M.A., Kennedy E.J.* Delay, Doppler, and amplitude characteristics of HF signals received over a 1300-km transauroral sky wave channel // *Radio Sci.* V. 30. № 3. P. 659–676. 1995.
 - *Warrington E.M., Stocker A.J.* Measurements of the Doppler and multipath spread of HF signals received over a path oriented along the midlatitude trough // *Radio Sci.* V. 38. № 5. RS1080, doi:10.1029/2002RS002815. 2003.
 - *Weatherwax A.T., LaBelle J., Trimpi M.L., Brittain R., Treumann R.A.* Ground-based observations of MF/HF radio noise in the auroral zone // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A2. P. 2109–2119. 1994.