

УДК 550.385.37+550.383

ВЛИЯНИЕ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ШУМОВЫХ УНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0–7 Гц

© 2019 г. Б. В. Довбня¹, *, Б. И. Клайн¹, **, Н. А. Куражковская¹, ***

¹Геофизическая обсерватория Борок филиал института физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН, п. Борок (Ярославская обл.), Россия

*e-mail: dovbnya@inbox.ru

**e-mail: klain@borok.yar.ru

***e-mail: knady@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 29.05.2018 г.

После доработки 18.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Приведены результаты исследования одновременных наблюдений среднеширотных шумовых ультранизкочастотных излучений в диапазоне частот 0–7 Гц и возмущений в ночном секторе аврорального овала. Для анализа использованы данные наблюдений магнитного поля на среднеширотной обс. Борок ($L = 2.8$) и одномоментные данные AL -индекса. Показано, что в герцовом диапазоне преимущественно в летний сезон наблюдаются совместно два вида шумового ультранизкочастотного излучения, один из которых имеет вид диффузного пятна, другой характеризуется наличием резонансных спектральных структур, обусловленных влиянием ионосферного альвеновского резонатора. Диффузные пятна, в основном, регистрируются в вечернем секторе магнитосферы и предшествуют наблюдению резонансных спектральных структур, которые регистрируются преимущественно вблизи полночи. Сопоставление интервалов наблюдений диффузных пятен с динамикой AL -индекса показало, что в 80% случаев диффузные пятна формируются на фоне развития суббуревой активности на ночной стороне Земли. Установлено, что в доминирующем числе случаев временная задержка между началом суббуревых возмущений и началом наблюдения диффузных пятен составляет ~60 мин. Предполагается, что формирование диффузных пятен связано с особенностями динамики инжектируемых протонов из хвоста магнитосферы во время суббурь и появлением плазмосферных плюмов в вечернем секторе.

DOI: 10.1134/S0016794019030076

1. ВВЕДЕНИЕ

Ультранизкочастотные (УНЧ) излучения с резонансной структурой спектра в диапазоне частот 0–10 Гц – один из наиболее обсуждаемых в последнее время видов электромагнитных колебаний, например, [Dudkin et al., 2014; Surkov and Hayakawa, 2014; Полюшкина и др., 2015; Fedorov et al., 2016; Гульельми и Потапов, 2017]. В отечественных публикациях такие излучения называют ионосферными альвеновскими резонансами (ИАР) [Довбня и др., 2013], либо резонансными структурами спектра (РСС) [Семенова и др., 2008], в зарубежных публикациях употребляют термин SRS (spectral resonance structures) [Belyaev et al., 1999]. Мы будем употреблять аббревиатуру ИАР. Динамические спектры ИАР представляют собой веерообразные спектральные полосы, частота которых изменяется в зависимости от времени. Обычно частота дискретных спектральных полос постепенно возрастает в послеполуночное или вечернее время, достигая максимума вблизи

полуночи, и затем плавно уменьшается к послеполуночному и утренним часам.

Впервые такие эмиссии были обнаружены по данным среднеширотных наблюдений [Беляев и др., 1987]. Более поздние исследования показали, что ИАР могут наблюдаться в авроральной зоне [Belyaev et al., 1999; Семенова и др., 2008], а также в низких геомагнитных широтах [Bosinger et al., 2002; Simões et al., 2012]. Возбуждение ИАР наиболее типично для ночного сектора магнитосферы на всех геомагнитных широтах. Известно, что ИАР наблюдаются преимущественно при слабой или умеренной геомагнитной активности. Максимум частоты появления ИАР приходится на зимний сезон и годы минимума солнечной активности [Yahnin et al., 2003; Belyaev et al., 2000; Полюшкина и др., 2015]. Во многих работах показано, что характеристики ИАР существенно зависят от локального состояния ионосферы, например, [Полюшкина и др., 2015]. Кроме того, на режим появления ИАР оказывают влияние такие

факторы как, например, сейсмические сигналы [Потапов и др., 2008] и суббури [Parent et al., 2010; Семенова и Яхнин, 2014].

Примерно в этом же частотном диапазоне, что и ИАР, наблюдаются излучения, имеющие вид шумовой полосы длительностью несколько часов. В отличие от ИАР эти шумовые излучения практически не исследованы. Впервые на подобные эмиссии было обращено внимание в работе [Гохберг, 2008]. Согласно результатам этой работы такие эмиссии наблюдаются в вечернем секторе магнитосферы (15.00–18.00 MLT), преимущественно в летний сезон. Такого рода шумовые излучения были названы “термическими короткопериодными геомагнитными эмиссиями” (thermic short-period geomagnetic emission). В качестве гипотезы для объяснения их возбуждения было предложено рассматривать локальный тепловой режим атмосферы Земли [Гохберг, 2008]. Эта гипотеза базировалась на закономерности суточной и сезонной вариации данного типа эмиссии. Таким образом, в средних широтах наблюдаются, по крайней мере, два вида шумовых излучений в герцовом диапазоне, различающихся по динамическим спектрам электромагнитных волн, суточной и сезонной вариации.

В ходе анализа динамических спектров УНЧ-излучений нами было замечено, что в некоторых случаях два выше названных типа шумовых излучений наблюдаются совместно как последовательность двух явлений. По обыкновению в вечернее время возникает неструктурированная шумовая эмиссия, имеющая вид овального диффузного пятна. В дальнейшем для краткости подобные излучения мы будем называть диффузными пятнами (diffuse spot). Ближе к ночному сектору появляется излучение в виде спектральных шумовых полос с нарастающей частотой – ионосферные альвеновские резонансы (ИАР).

Поскольку диффузные пятна и ИАР характерны для вечерних и ночных часов, то на их возбуждение могут оказывать влияние геофизические процессы, развивающиеся в вечерне-ночном секторе магнитосферы, в частности суббуревые возмущения. Из литературных источников известно, что суббуревая активность существенно влияет на возбуждение резонансных спектральных полос. В работе [Parent et al., 2010] описан случай исчезновения резонансных спектральных полос в момент начала суббури и их появление после ее окончания. В другой работе [Семенова и Яхнин, 2014] проанализировано резкое увеличение частотного интервала в резонансной структуре спектра УНЧ-излучения во время развития изолированной суббури. Однако влияние суббуревой активности на возбуждение шумового излучения в виде диффузных пятен до сих пор не рассматривалось.

В работе проведено сопоставление одновременных наземных наблюдений шумовых УНЧ-излучений в диапазоне частот 0–7 Гц и возмущений магнитного поля в ночном секторе аврорального овала с целью исследования возможного влияния суббуревой активности на формирование диффузных пятен.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Настоящая работа основана на анализе наблюдений магнитного поля на среднеширотной Геофизической обс. Борок ИФЗ РАН (исправленные геомагнитные координаты $\Phi = 53.6^\circ$; $\Lambda = 114.4^\circ$, $L = 2.8$) за период 1985–1988 гг. (данные архива ГО Борок ИФЗ РАН). Ультранизкочастотные излучения регистрировались с помощью индукционного магнитометра, данные с которого записывались на аналоговый магнитофон. Затем аналоговые записи представлялись в цифровом виде. Далее выполнялся спектрально-временной анализ, в результате которого получали динамические спектры УНЧ-излучений. Полученные динамические спектры анализировались визуально. Анализ геофизических условий на ночной стороне магнитосферы, на фоне которых наблюдались шумовые УНЧ-излучения, проводился по одноминутным данным AL -индекса, полученным из Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике (Москва, Россия) (http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_AU_AL_AE_AO_ind.html). Дополнительно для оценки интенсивности суббурь использовались данные AE -индекса, полученные с этого же сайта.

Идентификация суббурь проводилась согласно процедуре, подробно описанной в работах [Hsu and McPherron, 2004, 2007]. Отрицательные бухты в динамике AL -индекса продолжительностью более 20 минут и минимальной величиной AL -индекса ниже – 100 нТл соответствовали развитию магнитосферных суббурь [Hsu and McPherron, 2004, 2007].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. За анализируемый период по данным УНЧ-излучений обс. Борок было отобрано 334 случая совместного наблюдения диффузных пятен и ИАР. На рисунке 1 приведен типичный пример наблюдения диффузного пятна в диапазоне частот 0–7 Гц и развивающегося после него излучения ИАР в обс. Борок 17.06.1986 г. Как видно из динамического спектра УНЧ-излучения, в интервале времени (10.00–19.00) UT шумовая эмиссия неструктурирована. После 19.00 UT появляются типичные структуры ионосферных альвеновских резонансов, которые продолжают до 24.00 UT. Подобное поведение шумовых эмиссий характерно для всех анализируемых случаев. Диффуз-

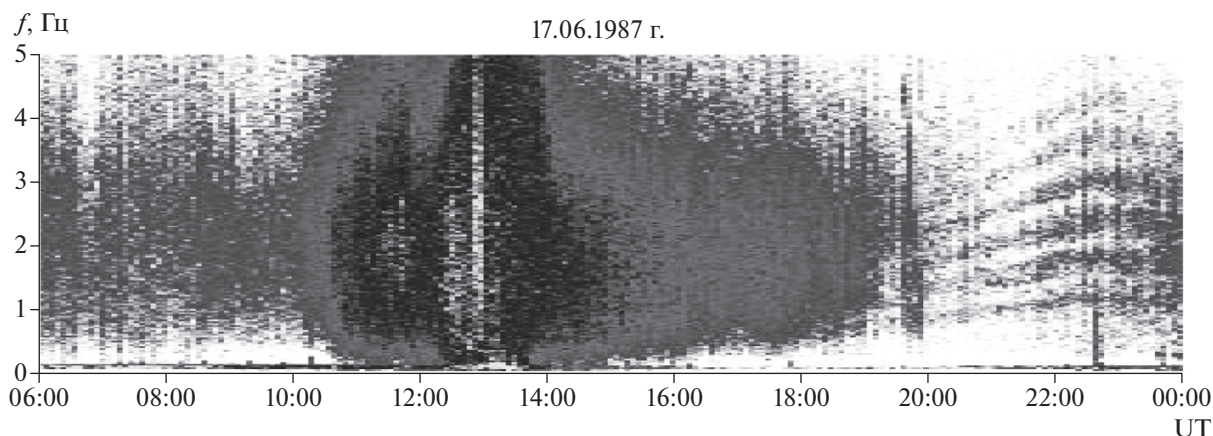


Рис. 1. Типичный пример совместного наблюдения диффузного пятна и излучения ИАР в обс. Борок 17.06.1987 г.

ные пятна по времени предшествует появлению ИАР. Динамические спектры этих шумовых излучений принципиально отличаются по внешнему облику. Шумовые излучения в виде диффузных пятен имеют овальную форму и в них отсутствуют какие-либо структуры. В излучении ИАР четко видны веерообразные спектральные полосы нарастающей, либо убывающей со временем частоты. Продолжительность двух видов шумовых излучений примерно одинаковая, диффузные пятна и ИАР могут непрерывно наблюдаться от 1 до 13 ч при средней длительности 6 ч. В доминирующем числе случаев продолжительность, как диффузных пятен, так и ИАР составляет ~ 5 –6 ч.

В связи с тем, что диффузные пятна и ИАР наблюдались непрерывно в течение длительных промежутков времени, для построения суточных вариаций этих излучений время их наблюдения мы разбивали на часовые интервалы. Всего было проанализировано 2028 ч и 1857 ч наблюдений диффузных пятен и ИАР, соответственно. На рис. 2а, 2б представлены распределения числа часовых интервалов наблюдений диффузных пятен (а) и ИАР (б) в зависимости от MLT. Видно принципиальное различие суточных вариаций двух видов шумовых излучений. Так, максимум частоты наблюдения диффузных пятен приходится на (16.00–17.00) MLT, т.е. вечернее местное время. ИАР преимущественно наблюдаются вблизи полуночи (22.00–23.00) MLT. Таким образом, максимумы суточных распределений диффузных пятен и ИАР сдвинуты примерно на 6 часов, что подтверждает факт опережения времени наблюдения диффузных пятен по сравнению с ИАР.

На рисунке 3а представлена сезонная вариация совместного наблюдения числа случаев диффузных пятен и ИАР. Максимум частоты появления таких случаев наблюдается летом и постепенно уменьшается к сезону весеннего и осеннего равноденствий. Совместно диффузные пятна и

ИАР практически не наблюдаются в зимний сезон. На этом же рисунке приведена зависимость продолжительности (t) диффузных пятен и ИАР от сезона (рис. 3б). Видно, что сезонные кривые продолжительности двух видов шумовых излучений значительно различаются. Наиболее продолжительные излучения в виде диффузных пятен наблюдаются летом. Для сезонной вариации продолжительности излучения ИАР характерны два максимума в весеннее и осеннее равноденствие. Рисунок 3б наглядно показывает противофазное поведение продолжительности двух видов шумовых излучений.

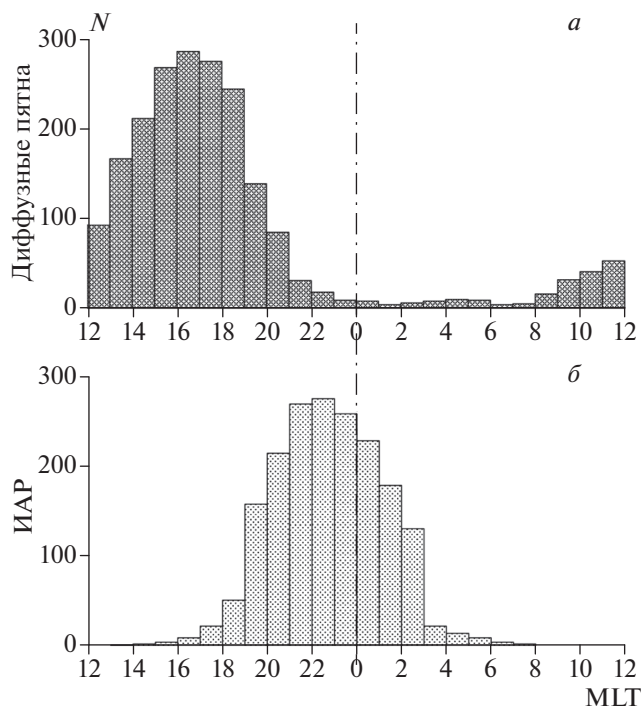


Рис. 2. Суточная вариация числа часов наблюдений N диффузных пятен (а) и ИАР (б).

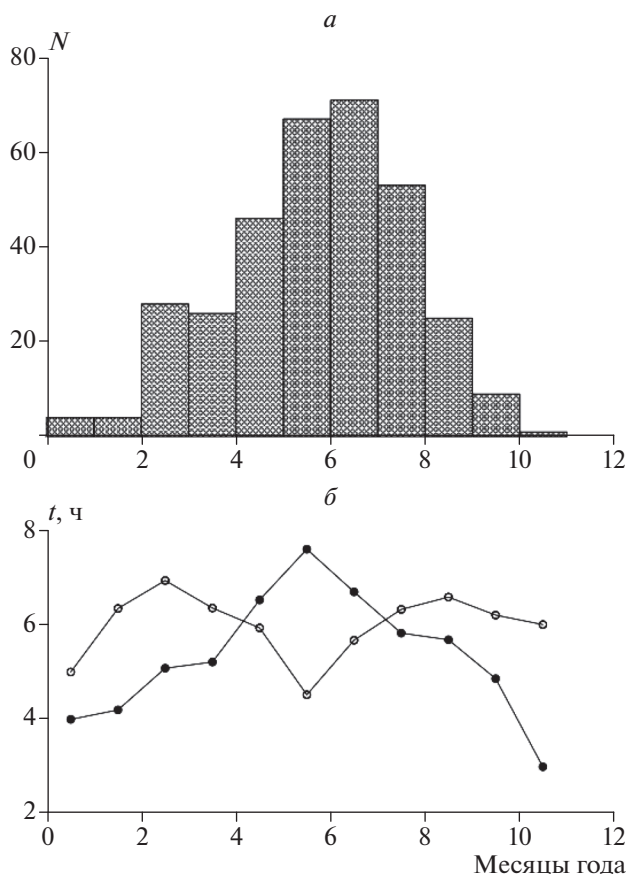


Рис. 3. Сезонная вариация числа случаев совместного наблюдения N диффузных пятен и ИАР (а) и зависимость продолжительности t диффузных пятен (темные кружки) и ИАР (светлые кружки) от сезона (б).

2. Далее перейдем к анализу геофизических условий в вечернем секторе магнитосферы, на фоне которых наблюдались диффузные пятна. Для этого проводилось одновременное сопоставление полученных динамических спектров УНЧ-излучений с динамикой AL -индекса, характеризующего интенсивность западного электродржета. В динамике AL -индекса мы анализировали интервал времени, предшествующий началу наблюдения диффузного пятна длительностью ~ 5 ч и затем промежуток времени, в течение которого наблюдалось это шумовое излучение. Анализ показал, что в 80% случаев диффузные пятна наблюдались на фоне развития суббулевой активности в авроральной зоне. Надо отметить, что диффузные пятна могли наблюдаться на фоне развития изолированной суббури, а также на фоне серий суббулевых активизаций в вечерне-ночном секторе аврорального овала. Когда диффузные пятна наблюдались на фоне последовательности из 2–3 суббурь, их продолжительность была существенно больше, чем в случае наблюдения на фоне изолированной суббури.

На рисунке 4 приведен пример одновременных наблюдений шумовых УНЧ-излучений в обс. Борок и вариаций AL -индекса 27.07.1986 г. В динамике AL -индекса видна отрицательная бухта, которая свидетельствует о развитии суббури в авроральной зоне. Видно, что примерно через 1 ч после начала суббулевого возмущения наблюдается диффузное пятно, продолжительность которого составляет 8 ч. Затем развиваются резонансные структуры спектра, частота которых постепенно нарастает до местной полуночи и далее плавно уменьшается. В данном случае диффузное пятно наблюдается на фоне сильной изолированной суббури, интенсивность которой превышает 1000 нТл.

В некоторых случаях последовательности диффузных пятен и ИАР регистрировались несколько дней подряд. Например, на рис. 5 показаны динамические спектры УНЧ-излучений, которые наблюдались в обс. Борок с 24 по 28 июля 1987 г. и динамика AL -индекса. Четко видно чередование диффузных пятен и ИАР на фоне суббулевых активизаций (рис. 5), причем диффузные пятна, в основном, наблюдались после развития суббурь.

Анализ AE -индекса, характеризующего интенсивность магнитных возмущений в зоне полярных сияний, показал, что диффузные пятна преимущественно наблюдаются при величине AE -индекса > 200 нТл, что свидетельствует о суббулевых активизациях. На рисунке 6 показана зависимость числа случаев наблюдений диффузных пятен от величины AE -индекса. Для построения этого распределения брались максимальные значения AE -индекса, соответствующие взрывной фазе суббури, после которой наблюдалось диффузное пятно. Как видно из рис. 6, величина AE -индекса изменялась в широких пределах от 100 нТл до 1800 нТл во время наблюдения диффузных пятен при среднем значении 458 нТл. Следовательно, в основном, диффузные пятна наблюдаются на фоне развития суббурь большой интенсивности.

Статистический анализ одновременных наблюдений шумовых излучений и вариаций AL -индекса показал, что формирование диффузных пятен происходит после развития суббулевых возмущений в вечернем секторе аврорального овала. В связи с этим мы сопоставили время начала наблюдения диффузных пятен с моментами суббулевых возмущений. На рисунке 7 дана зависимость числа случаев наблюдения диффузных пятен от времени сдвига (Δt) между моментом регистрации диффузных пятен ($t_{\text{dif. spot}}$) и началом суббулевых возмущений (t_{substorm}), где $\Delta t = t_{\text{dif. spot}} - t_{\text{substorm}}$. Как правило, начало диффузного пятна отставало от начала суббулевых возмущений, тогда Δt было положительным. Кроме того, отмечено несколько

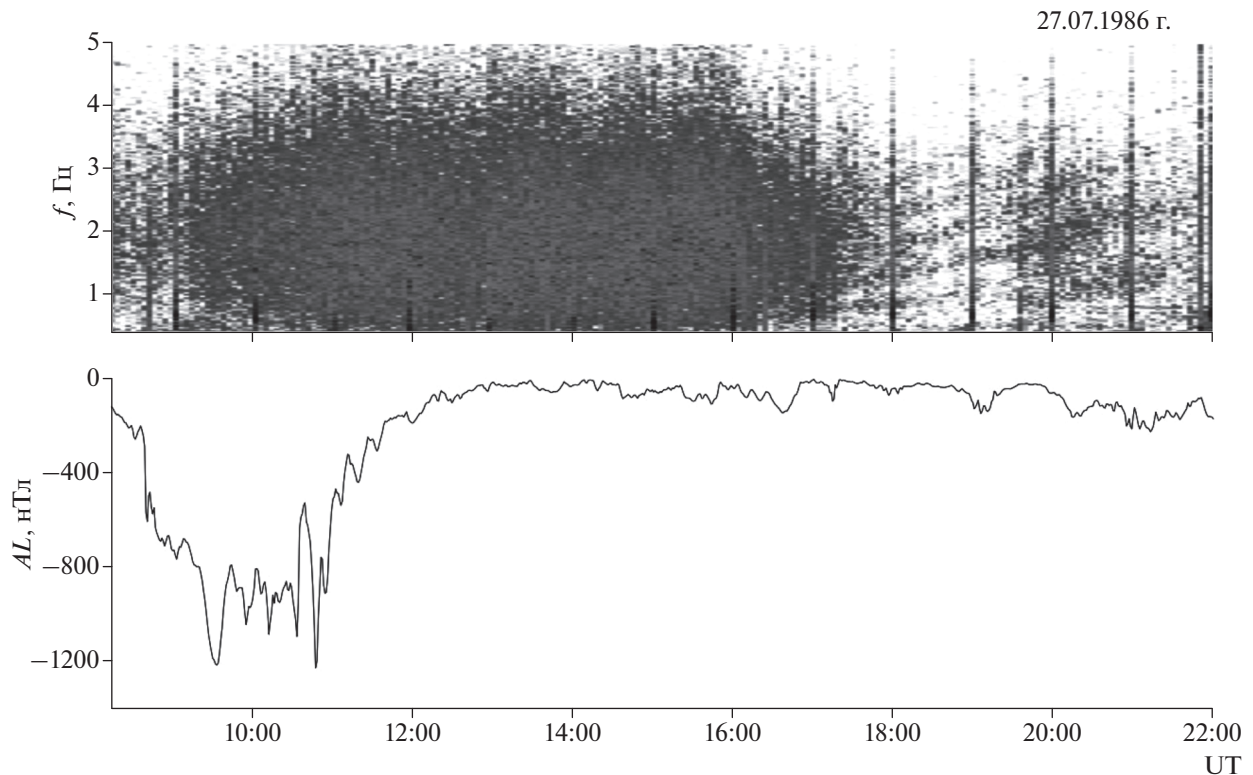


Рис. 4. Пример совместного наблюдения диффузного пятна и ИАР в обс. Борок 17–18.06.1987 г. на фоне развития изолированной суббури в вечернем секторе аврорального овала и динамика AL -индекса.

ко случаев наблюдения диффузных пятен, которые опережали суббуревые активизации. В этом случае Δt считалось отрицательным. Из рисунка 7 видно, что временная задержка между началом наблюдения диффузных пятен и началом суббуревых возмущений варьирует от 0 до 360 мин. Однако в доминирующем числе случаев величина Δt составляет ~ 60 мин. Этот экспериментальный факт явно указывает на тесную связь возбуждения шумового излучения и процессов развития суббури. Таким образом, наблюдение диффузных пятен на фоне развития интенсивной суббуревой активизации и их соответствие времени начала позволяет предположить взаимосвязь данных явлений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты данного исследования показали, что в частотном диапазоне 0–7 Гц последовательно друг за другом наблюдаются два вида шумовых УНЧ-излучений, различающихся по виду динамических спектров и имеющих, по-видимому, разные физические механизмы генерации. Хорошо известно, что резонансные спектральные структуры являются проявлением ионосферного альвеновского резонатора. В литературе обсуждается несколько различных механизмов генерации

ИАР, которые, подробно рассмотрены, например, в работе [Surkov and Hayakawa, 2014]. Здесь мы не будем останавливаться на механизмах их возбуждения, поскольку в контексте данной работы нас более интересуют причины, приводящие к возбуждению диффузных пятен. Решение вопроса о том, что более способствует возбуждению шумового излучения в виде диффузных пятен, представляет интерес для понимания механизма генерации этого вида УНЧ-излучений.

Ранее в работе [Гохберг, 2008] предполагалось, что УНЧ шумовые излучения, не имеющие какой-либо спектральной структуры, обусловлены локальным тепловым режимом атмосферы Земли. Проведенные нами исследования свидетельствуют об иных причинах возбуждения диффузных пятен. Нами обнаружен ряд экспериментальных фактов, который позволяет предположить, что возбуждение диффузных пятен являются результатом проявления суббуревой активности в вечернем секторе аврорального овала, а именно:

1) диффузные пятна в 80% случаев наблюдаются на фоне развития суббуревых активизаций в вечернем секторе авроральной зоны;

2) существует тесная временная связь начал наблюдений диффузных пятен и развития суббурь, в доминирующем числе случаев диффузные

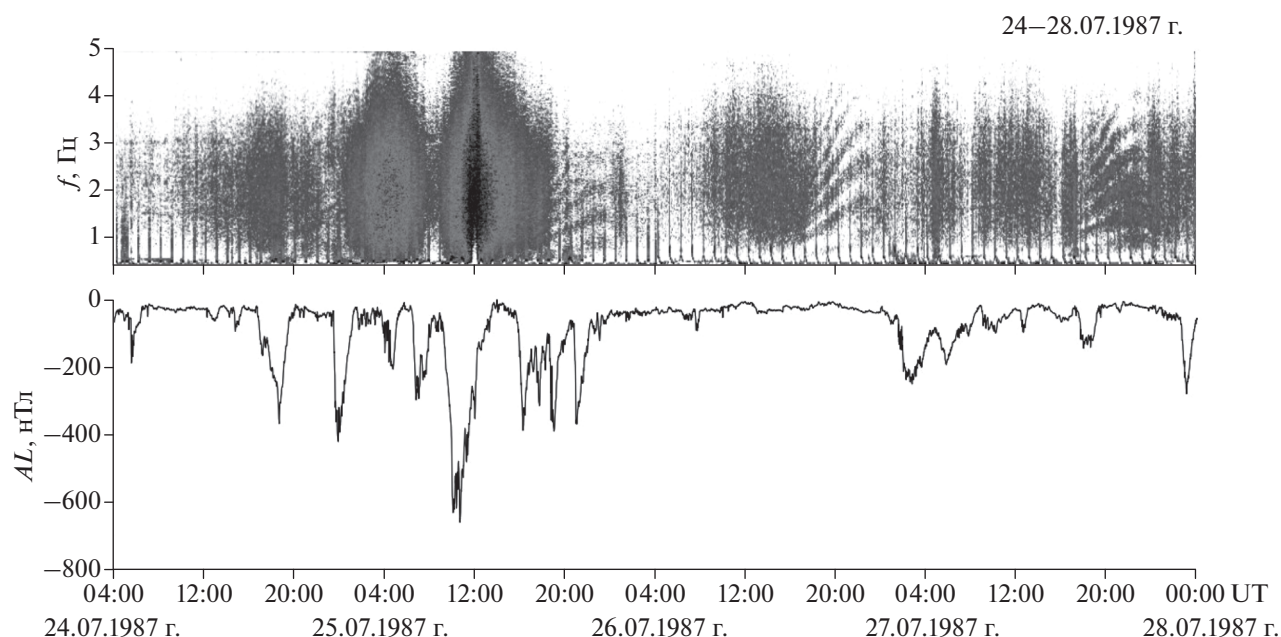


Рис. 5. Пример совместного наблюдения диффузных пятен и ИАП в obs. Борок 24–28.07.1987 г. на фоне развития последовательности суббуревых активизаций и динамика AL -индекса.

пятна развиваются через ~ 60 мин после развития суббурь (рис. 7);

3) вероятность наблюдения диффузных пятен зависит от величины AE -индекса, характеризующего интенсивность суббуревых возмущений (рис. 6);

4) сезонная вариация продолжительности диффузных пятен совпадает с сезонной вариацией продолжительности суббурь, максимум дли-

тельности которых приходится на летний сезон [Tanskanen, 2009] (рис. 3).

По-нашему мнению, одной из причин возбуждения диффузных пятен во время развития суббурь может быть инжекция плазмы из хвоста магнитосферы. Характеристики инжектируемых частиц и поведение плазмопаузы во время суббурь исследованы многими авторами. В частности по спутниковым данным обнаружены так называемые

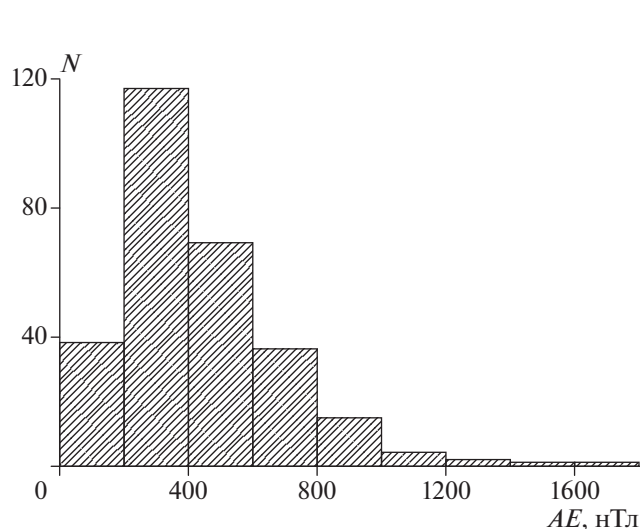


Рис. 6. Зависимость частоты наблюдения диффузных пятен N от максимальной интенсивности суббурь, характеризующейся значением AE -индекса.

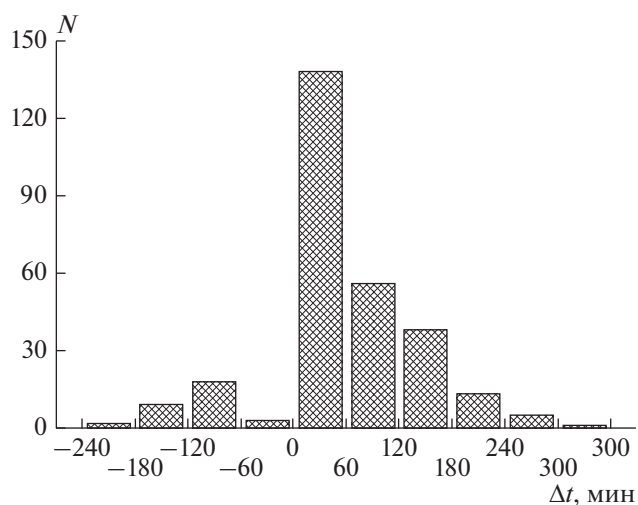


Рис. 7. Зависимость числа наблюдений диффузных пятен N от временного интервала Δt между началом суббуревых возмущений и началом регистрации диффузных пятен.

мые “носовые структуры” (“nose events”) [McIlwain, 1972; Ejiri et al., 1980; Spasojević et al., 2003], представляющие собой области инъекции протонов, локализованные преимущественно в вечернем секторе. Согласно [Ejiri et al., 1980] носовые структуры преимущественно наблюдаются при величине AE -индекса > 200 нТл. В возмущенных условиях инжектируемые протоны проникают на более низкие L – оболочки ($L \sim 3-4$). При этом существенно изменяется размер и форма плазмосферы, образуется “плазмосферный плюм” по терминологии работы [Spasojević et al., 2003]. Иными словами, во время развития суббурь появляется область вторжения протонов, вытянутая с ночной стороны Земли в вечерний сектор на широте плазмопаузы. Геомагнитная широта обс. Борок соответствует типичному положению плазмопаузы в возмущенных условиях, где в вечернем секторе преимущественно и регистрируются диффузные пятна. Пространственное и временное совпадение наблюдаемых диффузных пятен и носовых структур свидетельствует о том, что инъекция плазмы из хвоста магнитосферы во время суббурь, по-видимому, играет существенную роль в возбуждении диффузных пятен. Таким образом, по нашему мнению, формирование диффузных пятен связано, скорее, с особенностями динамики инжектируемых протонов из хвоста магнитосферы во время суббурь и появлением плазмосферных плюмов в вечернем секторе, чем с тепловым режимом атмосферы Земли.

Следует отметить, что в своем суточном вращении обс. Борок, видимо, попадает под области инъекции вторгающихся частиц различных энергий. В вечернем секторе инъекции протонов в виде носовых структур, способствуют возбуждению неструктурированных электромагнитных излучений. После ослабления суббуревых возмущений развиваются резонансные структуры спектра. Таким образом, процессы перестройки магнитосферы во время суббурь приводят к смене режима УНЧ-эмиссий. Это наглядно видно из динамического спектра УНЧ-излучений (рис. 5), на котором прослеживается чередование структурированных и неструктурированных шумовых излучений.

Исходя из имеющихся данных, трудно однозначно сказать, связаны ли генетически эти два вида шумовых излучений. С одной стороны, диффузные пятна и ИАР приурочены к различным областям локализации в магнитосфере, что указывает на независимость этих двух колебательных процессов. Об этом же свидетельствуют некоторые примеры наблюдения диффузных пятен, после которых ИАР не наблюдаются. Также имеют место случаи наблюдения ИАР, которым не предшествуют диффузные пятна. С другой стороны, в большинстве случаев диффузные пятна и ИАР наблюдаются последовательно друг за другом. Вполне вероятно, что эти два вида излучений

имеют общий механизм генерации, но под действием магнитосферно-ионосферных взаимодействий наблюдаемая структура волнового поля излучений становится различной.

В заключение хотелось бы обратить внимание на тот факт, что в ночном секторе магнитосферы во время суббурь особенности дрейфа субавроральных ионов приводят к возникновению целого комплекса различных явлений, таких как поляризационный джет, электромагнитные ионно-циклотронные волны (EMIC waves) и других [Yuan et al., 2016]. В силу отмеченных выше морфологических особенностей излучений ИАР, можно предположить, что их резонансная структура спектра обусловлена процессами, возникающими в результате инъекции протонов на ночной стороне во время суббурь.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным УНЧ-излучений среднеширотной обсерватории Борок обнаружено, что в герцовом диапазоне преимущественно в летний сезон наблюдаются совместно два вида шумового УНЧ-излучения, один из которых имеет вид диффузного пятна, другой характеризуется наличием резонансных спектральных структур. Диффузные пятна, в основном, регистрируются в вечернем секторе магнитосферы и предшествуют наблюдению ИАР, которые регистрируются преимущественно вблизи полночи. Одновременное сопоставление интервалов наблюдений диффузных пятен с динамикой AL -индекса показало, что в 80% случаев диффузные пятна формируются на фоне развития суббуревой активности на ночной стороне Земли. Показано, что в доминирующем числе случаев временная задержка между началом суббуревых возмущений и началом наблюдения диффузных пятен составляет ~ 60 мин. Предполагается, что формирование диффузных пятен связано с особенностями динамики инжектируемых протонов из хвоста магнитосферы во время суббурь и появлением плазмосферных плюмов в вечернем секторе.

Работа выполнена по теме “Влияние космических факторов на развитие экстремальных процессов в магнитосфере Земли” Госзадание № 0144-2014-00116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Докл. АН СССР. Т. 297. С. 840–843. 1987.
- Гохберг М.Б. Новый тип электромагнитной эмиссии в диапазоне короткопериодных геомагнитных колебаний // Докл. АН СССР. Т. 359. № 4. С. 543–544. 1998.

- Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ-колебания ионосферного резонатора // Космич. исслед. Т. 55. № 4. С. 263–267. 2017.
- Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Рахматулин Р.А. Дополнительный резонатор для ультранизкочастотных волн // Геофизич. исслед. Т. 14. № 2. С. 49–58. 2013.
- Полюшкина Т.Н., Довбня Б.В., Потапов А.С., Цэгмэд Б., Рахматулин Р.А. Частотная структура спектральных полос ионосферного альвеновского резонатора и параметры ионосферы // Геофизич. исслед. Т. 16. № 2. С. 39–57. 2015.
- Потапов А.С., Довбня Б.В., Цэгмэд Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена // Физика Земли. № 4. С. 93–96. 2008.
- Семенова Н.В., Яхнин А.Г., Васильев А.Н., Амм О. Особенности резонансных структур в спектрах УНЧ электромагнитного шума в высоких широтах (обс. Баренцбург) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 1. С. 40–48. 2008.
- Семенова Н.В., Яхнин А.Г. Резкое изменение резонансной структуры в спектре электромагнитного шума в герцовом диапазоне во время суббури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 3. С. 341–347. 2014.
- Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 104. № 2. A3. P. 4305–4317. 1999.
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Ermakova E.N., Isaev S.V. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985–1995 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. P. 239–248. 2000.
- Bosinger T., Haldoupis C., Belyaev P.P., Yakunin M.N., Semenova N.V., Demekhov A.G., Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station ($L = 1.3$) // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 107. № A10. P. SIA 4-1–SIA 4-9. 2002.
- Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., Klimov S., Holzworth R. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 117. P. 81–87. 2014.
- Ejiri M., Hoffman R.A., Smith P.H. Energetic particle penetrations into the inner magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 85. № A2. P. 653–663. 1980.
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Engebretson M. Interaction of magnetospheric Alfvén waves with the ionosphere in the Pc1 frequency band // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 121. P. 321–337. 2016. doi 10.1002/2015JA021020
- Hsu T.-S., McPherron R.L. Average characteristics of triggered and nontriggered substorms // J. Geophys. Res. V. 109. A07208. 2004. doi 10.1029/2003JA009933
- Hsu T.-S., McPherron R.L. A statistical study of the relation of Pi2 and plasma flows in the tail // J. Geophys. Res. V. 112. A05209. 2007. doi 10.1029/2006JA011782
- McIlwain C.E. Plasma convection in the vicinity of the geosynchronous orbit / Earth's Magnetospheric Processes. Edited by McCormac B. M. Hingham, Mass: D. Reidel. Pub. Comp. P. 268–279. 1972.
- Parent A., Mann I.R., Rae J. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. V. 115. № A02312. 2010. doi 10.1029/2009JA014673
- Simões F., Klenzing J., Ivanov S. et al. Detection of ionospheric Alfvén resonator signatures in the equatorial ionosphere // J. Geophys. Res. V. 117. A11305. 2012. doi 10.1029/2012JA017709
- Spasojević M., Goldstein J., Carpenter D.L., Inan U.S., Sandel B.R., Moldwin M.B., Reinisch B.W. Global response of the plasmasphere to a geomagnetic disturbance // J. Geophys. Res. V. 108(A9). 1340. 2003. doi 10.1029/2003JA009987
- Surkov V., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén Resonator (IAR). In: Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. Springer Geophysics. Springer, Tokyo. P. 145–207. 2014. doi.org/10.1007/978-4-431-54367-1_5
- Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: years 1993–2003 examined // J. Geophys. Res. V. 114. A05204. 2009. doi 10.1029/2008JA013682
- Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at $L = 5.2$ // Ann. Geophys. V. 21. P. 779–786. 2003.
- Yuan Z., Xiong Y., Qiao Z., Li H., Huang S., Wang D., Deng X., Raita T., Wang J. A subauroral polarization stream driven by field-aligned currents associated with precipitating energetic ions caused by EMIC waves: A case study // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 121. P. 1696–1705. 2016. doi 10.1002/2015JA021804