

УДК 550.385.37

ДНЕВНЫЕ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ФАЗЫ МАГНИТНОЙ БУРИ: СОБЫТИЕ 5 ЯНВАРЯ 2015 г.

© 2020 г. Ю. Маннинен^{1, **}, Н. Г. Клейменова^{2, *}, Л. И. Громова³,
Ю. В. Федоренко⁴, А. С. Никитенко⁴, О. М. Лебедь⁴

¹Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН),
г. Москва, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

⁴Полярный геофизический институт (ПГИ),
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

*e-mail: kleimen@ifz.ru

**e-mail: jyrki.manninen@sgo.fi

Поступила в редакцию 04.12.2019 г.

После доработки 09.01.2020 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Обсуждаются спектральные и временные особенности 7-ми часового всплеска дневных ОНЧ шумовых излучений в полосе частот 1–10 кГц, наблюдаемых на земной поверхности в позднюю восстановительную фазу умеренной магнитной бури (с $Kp = 5$ и $Dst \sim -80$ нТл) в условиях практически спокойной космической погоды. Эти ОНЧ-излучения были зарегистрированы одновременно на двух авроральных станциях, расположенных на геомагнитной широте $\sim 64^\circ$ MLAT, но разнесенных по долготе на ~ 400 км: финской ст. Каннуслехто (КАН) и российской обс. Ловозеро (ЛОВ). Рассматриваются особенности динамического спектра ОНЧ-волн разных временных масштабов. Показано, что в ходе развития обсуждаемого дневного ОНЧ-всплеска, шумовые излучения на частотах ниже 3.5 кГц постепенно переходят в периодические (QP) излучения с квази-повторением ~ 3 с. Сопоставление направлений прихода отдельных коротких изолированных высокочастотных (выше 5 кГц) ОНЧ-сигналов (типа “птичек”) в КАН и ЛОВ позволило сделать вывод о возможном положении и пространственной динамике области выхода этих волн из ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794020030116

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, например, обзоры [Helliwell, 1965; Вершинин и Пономарев, 1966; Rycroft, 1972; Распопов и Клейменова, 1977; Naykawa and Sazhin, 1992; Sazhin et al., 1993; LaBelle and Treumann, 2002; Manninen, 2005; Трахтенгерц и Райкрофт, 2011; и др.], что наиболее типичными ОНЧ-излучениями в авроральных и субавроральных широтах являются утренние хоры, вечерние и ночные всплески аврорального хисса (слово “хисс” часто переводится на русский язык как “шипения”), шумовые ОНЧ-бури и квази-периодические (QP) излучения. Напомним, что ОНЧ (очень низкочастотные) излучения представляют собой электромагнитные волны свистовой моды (*whistler-mode*) в частотном диапазоне между гирочастотой ионов и электронов [Helliwell, 1965]. На земной поверхности всплески хоров и аврорального хисса, как правило, наблюдаются во время разви-

тия магнитосферных суббурь, ОНЧ шумовые бури – во время магнитных бурь, а квазипериодические ОНЧ-излучения – в спокойных геомагнитных условиях.

Кроме того, в магнитоспокойных условиях был обнаружен особый вид коротких (до нескольких мин) дневных высокочастотных (выше 4–6 кГц) дискретных широкополосных ОНЧ-излучений [Manninen et al., 2016, 2018; Маннинен и др., 2017]. Эти ОНЧ-излучения были названы “bird-emissions” (“птички”), так как на слух они воспринимаются как щебет птиц. Заметим, что этот тип высокочастотных ОНЧ-излучений удалось выявить только после применения специальной цифровой фильтрации, позволяющей очистить записи ОНЧ от импульсных помех атмосфериков [Ohya et al., 2015], полностью экранирующих естественные высокочастотные ОНЧ-излучения.

Регистрация КНЧ-ОНЧ-волн на многочисленных спутниках, например, [Thorne et al., 1973, 1979; Storey et al., 1991; Cornilleau-Wehrlin et al., 1993; Santolik et al., 2001; Meredith et al., 2006; Delpoort et al., 2012; Summers et al., 2014; Tsurutani et al., 2015; и др.] показала, что внутри плазмосферы на $3 < L < 6$ наиболее типичными электромагнитными волнами свистовой моды являются шумовые КНЧ-ОНЧ-излучения – “плазмосферный хисс” по терминологии Thorne et al. [1973]. Эти излучения наблюдаются в любое местное время с наибольшей вероятностью в послеполуночном секторе [Tsurutani et al., 2015] и не только во время магнитных возмущений, но и в их отсутствие [Dunckel and Helliwell, 1969].

В субавроральных, а иногда и в средних широтах, во время магнитных бурь в дневные часы кроме ОНЧ-хоров имели место также широкополосные (от ~1 кГц до ~8–10 кГц) всплески ОНЧ шумовых излучений общей длительностью в несколько часов с резко меняющейся во времени интенсивностью [Вершинин и Пономарев, 1966; Вершинин и др., 1974; Федакина, 1976, Клейменова и др., 1968]. В работе [Вершинин и Пономарев, 1966] эти всплески были названы “ОНЧ шумовыми бурями”. Наиболее часто такие излучения на земной поверхности наблюдались в главную фазу магнитной бури [Федакина, 1976], но иногда и в начале фазы восстановления бури [Smith et al., 1974].

Подобные дневные ОНЧ шумовые бури нередко регистрировались и в авроральных широтах северной Финляндии на ст. Каннуслахто (КАН) [Manninen, 2005; Маннинен и др., 2013; Manninen et al., 2015] во время зимних кампаний 2006–2019 гг. Наблюдения в КАН показали, что дневные шумовые всплески с продолжительностью в несколько ч (т.е., ОНЧ шумовые бури) наблюдаются не только в главную фазу магнитных бурь, как, например, 8 декабря 2013 г., 21 января 2016 г., 27 марта 2017 г., 8 сентября 2017 г. и др., но и в позднюю восстановительную фазу бури после окончания геомагнитных возмущений. Одним из таких случаев был длительный (порядка 7 ч) дневной всплеск ОНЧ-излучений 5 января 2015 г.

Целью данной работы являются детальные исследования спектрально-временных особенностей и временной динамики дневного всплеска ОНЧ-излучений 5 января 2015 г., наблюдаемого одновременно на двух авроральных станциях, расположенных на близких геомагнитных широтах (~64° MLAT), но разделенных по долготе на ~400 км: финской ст. Каннуслахто (КАН) и российской обс. Ловозеро (ЛОВ).

2. ДНЕВНЫЕ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ 5 ЯНВАРЯ 2015

На рисунке 1 показана спектрограмма ОНЧ-излучений в интервале 05–15 UT (08–18 MLT), полученная в КАН 5 января 2015 г. Верхняя граничная частота спектрограммы (10 кГц) выбрана для исключения радиопомех дальних радиостанций, работающих на частотах выше 10 кГц, а низкочастотная отсечка (1 кГц) для исключения возможных промышленных помех промышленной сети. При некотором воображении ОНЧ-спектрограмма напоминает очертания лежащего на земле слона, поэтому мы назвали это ОНЧ-событие “слоном”.

ОНЧ-регистрация в КАН (географические координаты: $\phi = 67.74^\circ \text{ N}$, $\lambda = 26.27^\circ \text{ E}$, исправленная геомагнитная широта $\Phi = 64.2^\circ \text{ MLAT}$; $L \sim 5.5$) проводится с помощью двух взаимно перпендикулярных рамочных антенн. Описание приемной аппаратуры и методов первичного анализа ОНЧ-волн приведено в работе [Manninen, 2005]. Результаты первичной обработки ОНЧ-наблюдений в виде минутных, часовых и суточных цветных спектрограмм (0–16 кГц) волн находятся на сайте (http://www.sgo.fi/pub_vlf/). Отсутствие в КАН регистрации вертикальной электрической компоненты поля не позволяет определять азимут прихода ОНЧ-волн, а только направление с неоднозначностью в 180° , например, вдоль меридиана север-юг, но не ясно с севера или с юга.

Результаты ОНЧ-наблюдений в КАН были сопоставлены с подобными наблюдениями в российской обс. Ловозеро (ЛОВ, международный код – LOZ, географические координаты 67.97° N , 35.02° E), находящейся на близкой КАН геомагнитной широте (~64° MLAT) на расстоянии около 400 км к западу. Регистрация ОНЧ-излучений в ЛОВ проводится с использованием также двух взаимно перпендикулярных рамочных антенн, но в дополнение к которым, в отличие от КАН, осуществляется регистрация вертикальной электрической компоненты поля, что позволяет определить азимутальные углы прихода ОНЧ-волн, а не только направление прихода, как в КАН. Антенны приемников откалиброваны в соответствии с методикой, описанной в работах [Fedorenko et al., 2014; Пильгаев и др., 2018]. В обеих точках применяется предварительная фильтрация импульсных помех (атмосфериков).

2.1. Условия космической погоды во время всплеска ОНЧ-волн

Рассмотрим условия космической погоды, во время которых наблюдались обсуждаемые ОНЧ-излучения. На рисунке 2 показаны вариации некоторых геоэффективных параметров космической среды: вертикальной компоненты межпланетно-

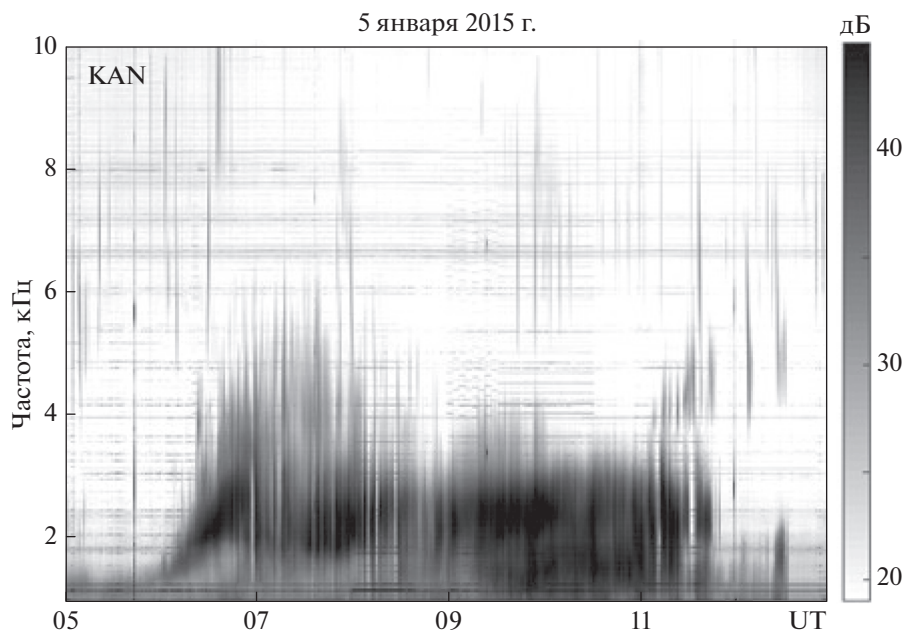


Рис. 1. Спектрограмма ОНЧ шумовой бури в КАН, несколько напоминающая лежащего слона. Интенсивность излучений приведена в относительных единицах (дБ).

го магнитного поля (B_z ММП), скорости (V) и плотности (N_p) солнечного ветра (1-мин данные OMNI, (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>)), а также индексов глобальной геомагнитной активности (K_p , $SymH$, AL) за 4 и 5 января 2015 г., т.е. до и во время обсуждаемого события. Видно, что 4 января отмечалась умеренная магнитная буря, в главной фазе которой Dst ($SymH$) было ~ -80 нТл, $K_p = 5$, а значения AL -индекса достигали -1000 нТл. С появлением в межпланетном поле устойчиво положительных значений B_z ММП (после 06 UT) и резкого уменьшения плотности солнечного ветра, суббуревая магнитная активность уменьшилась (AL -индекс стал всего около -100 нТл), и началась поздняя восстановительная фаза этой бури. Однако в это время в кольцевом токе отмечался достаточно высокий уровень захваченных электронов, на что указывает значительная величина $SymH$ индекса кольцевого тока (порядка -40 нТл), несмотря на то, что значения индекса K_p упали до 2. В этих условиях и наблюдалась обсуждаемая ОНЧ шумовая буря (затемненная область на рис. 2).

Справа на этом рисунке показано положение плазмопаузы по данным спутников RBSP-A, B (Van Allen Probs) (<http://enarc.space.swri.edu/PTP>) в начале и конце ОНЧ шумовой бури (черным кружком показана проекция положения КАН и ЛОВ). Видно, что в этот период времени станции находились далеко за плазмосферой.

Все обсуждаемые ранее [Вершинин и Пономарев, 1966; Вершинин и др., 1974; Федякина, 1976;

Клейменова и др., 1968; Распопов и Клейменова, 1977] дневные шумовые всплески длительностью в несколько часов (“ОНЧ шумовые бури”) наблюдались, как правило, в главную фазу магнитной бури. В отличие от этого, обсуждаемое событие было зарегистрировано в позднюю восстановительную фазу умеренной магнитной бури в относительно спокойных условиях космической погоды.

Это четко видно на рис. 3, где более детально приведены условия космической погоды во время обсуждаемого ОНЧ-всплеска: вариации B_z -компоненты ММП, динамического давления солнечного ветра (P_{sw}) с 1-мин разрешением, а также вариации индексов геомагнитной активности. Для оценки уровня наземных геомагнитных возмущений мы использовали 1-мин индекс глобальной магнитной активности (SML), который является обобщением известного индекса AL [Davis and Sugiura, 1966] и вычисляется по той же методике, но по данным наблюдений не на 12 авроральных станциях северного полушария, как AL -индекс, а на глобальной сети SuperMag (<http://supermag.jhuapl.edu/>), состоящей из более 300 станций, расположенных как в более низких, так и в более высоких широтах [Newell and Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012]. Локальная геомагнитная активность в Скандинавии, где расположены станции ОНЧ-наблюдений, определялась по IL -индексу (<http://space.fmi.fi/image/>), который вычисляется по той же методике, что и AL - и SML -индексы, но по данным наземных наблюдений на меридиональном профиле IMAGE [Viljanen and Häkkinen,

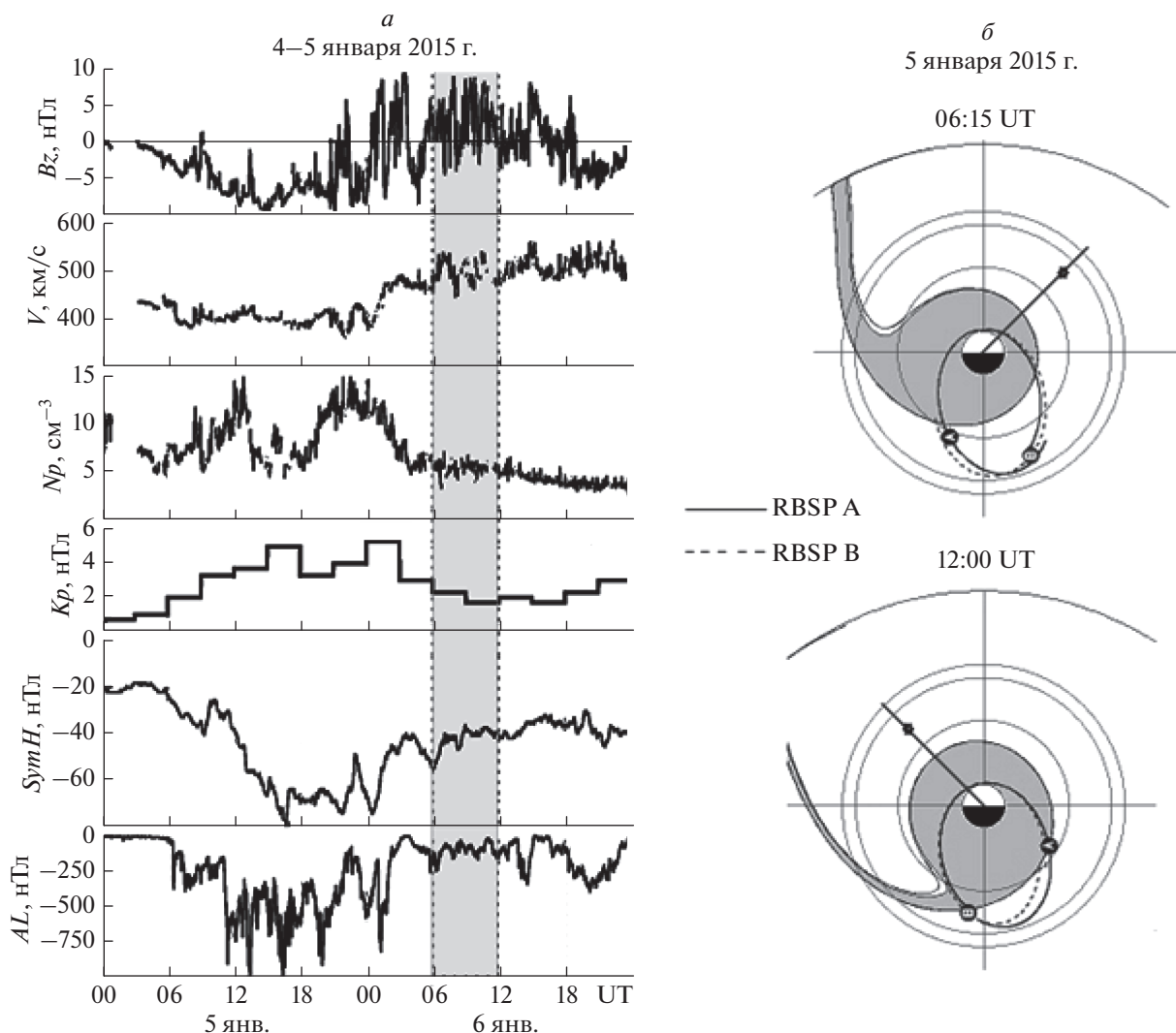


Рис. 2. Условия космической погоды (а) – 4–5 января 2015 г., т.е. до и во время обсуждаемого дневного всплеска ОНЧ-излучений (выделен серым цветом): вариации B_z ММП, скорости (V) и плотности (N_p) солнечного ветра, планетарной геомагнитной активности (K_p), интенсивности кольцевого тока ($SymH$) как индикатора магнитной бури и AL -индекса суббулевой активности; (б) – положение плазмопаузы по данным спутников RBSP в начале и середине ОНЧ шумовой бури.

1997], состоящем в настоящее время из 40 наземных станций.

Всплеск дневных ОНЧ-излучений (ОНЧ шумовая буря) начался около 06 UT после поворота B_z ММП к северу. В течение всего ОНЧ-всплеска направление ММП практически оставалось неизменно северным (положительные значения B_z ММП). Всплеск прекратился с поворотом B_z ММП к югу около 12 UT. Динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}) в течение всего ОНЧ-всплеска оставалось стабильным с незначительными флуктуациями, но относительно высоким ~ 3 нПа, что свидетельствует о значительном поджатии магнитосферы. В начале всплеска ОНЧ-излучений, в 06–07 UT, наблюдалось не-

которое возрастание геомагнитной активности (рис. 3а), что может быть результатом предшествующих отрицательных значений B_z ММП. Эти геомагнитные возмущения развивались в ночном секторе Земли, что видно на верхней карте SuperMag (рис. 3б) глобального распределения векторов возмущений магнитного поля, повернутых на 90° по часовой стрелке, чтобы показать направление ионосферных эквивалентных электрических токов. В дневном секторе (в Скандинавии) в тот интервал времени значительных магнитных возмущений не наблюдалось, что видно и по вариациям IL -индекса (рис. 3а).

Дальнейшее развитие всплеска ОНЧ-излучений (08–12 UT) проходило на магнито-спокой-

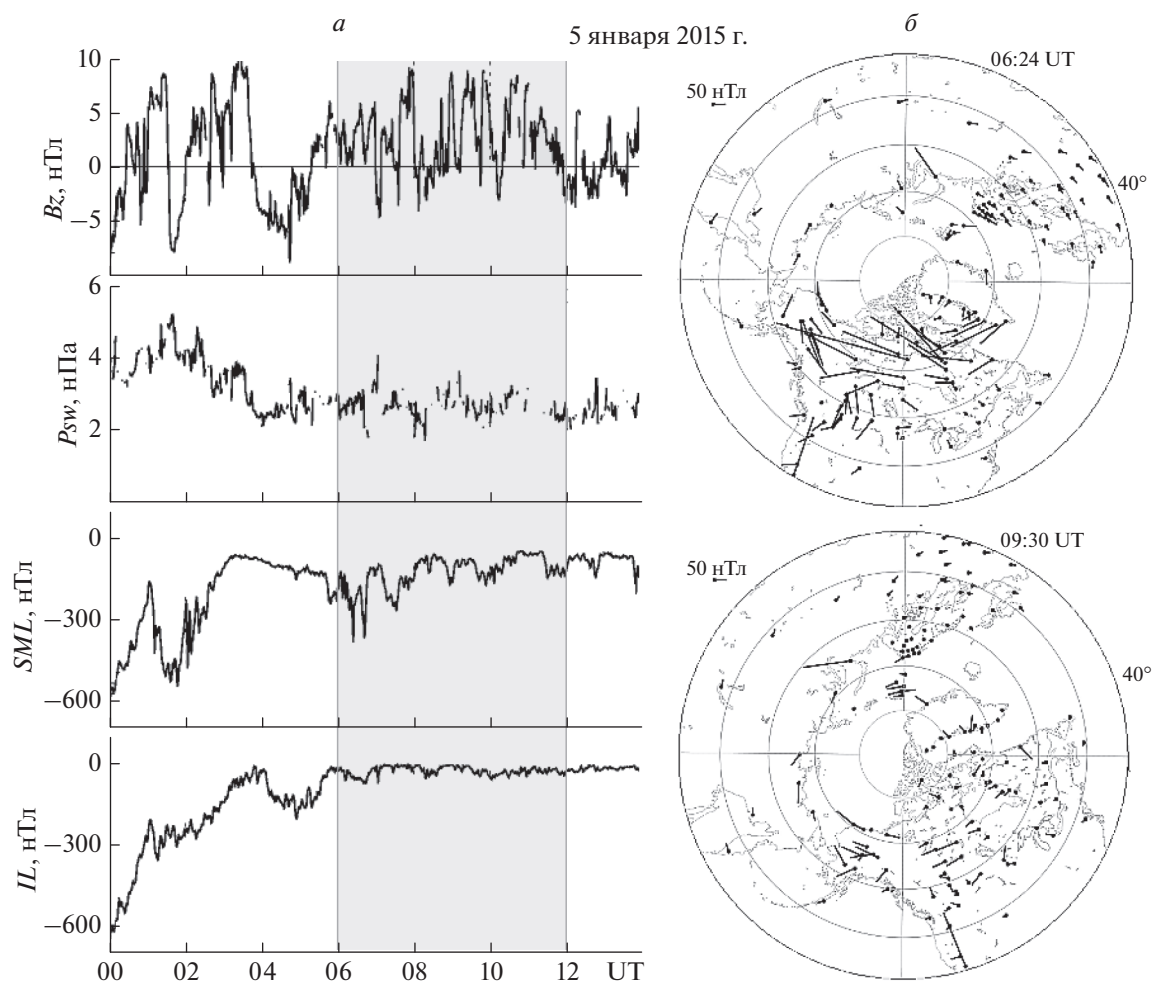


Рис. 3. Геофизическая обстановка во время обсуждаемого дневного всплеска ОНЧ-излучений (выделен серым цветом): (а) – вариации B_z ММП и динамического давления солнечного ветра (P_{sw}), а также глобальный (SML) и локальный (IL) индексы геомагнитной активности; (б) – карты распределения глобальной геомагнитной активности по данным наблюдений SuperMag (подробности в тексте).

ном фоне. В ночном секторе суббуравая геомагнитная активность была низкой, и значения как AL -, так и SML -индексов не превышали -100 нТл (рис. 2, 3). В дневном секторе, т.е., на меридиане IMAGE, геомагнитных возмущений также не отмечалось, значения IL -индекса варьировались около -20 нТл. Это видно и на карте SuperMag глобального распределения магнитной активности (рис. 3б, нижний график), построенной для 09:30 UT.

2.2. Особенности динамического спектра обсуждаемых ОНЧ-излучений

Динамический спектр обсуждаемого ОНЧ-события приведен на рис. 1 по данным наблюдений в КАН. Спектрограмма дневных ОНЧ-излучений в обс. ЛОВ (здесь не приводится) в общих чертах подобна ОНЧ-спектрограмме в КАН. Подобие динамического спектра излучений в двух точках,

разнесенных по долготе на ~ 400 км, может быть результатом относительно большой долготной области выхода ОНЧ-волн из ионосферы. В обеих точках ОНЧ шумовые излучения в полосе частот ниже 4 кГц были право-поляризованы, что свидетельствует о том, что область выхода ОНЧ-волн из нижней ионосферы располагалась недалеко от нахождения приемников ОНЧ-волн [Yearby and Smith, 1994].

Видно, что ОНЧ-излучения начались с постепенного, почти 40-мин возрастания верхней граничной частоты волн с ~ 2.0 кГц до ~ 3.5 кГц, и нижней граничной частоты с ~ 1.2 кГц до ~ 2.0 кГц. Наблюдения показали, что в обеих точках эти ОНЧ-излучения приходили преимущественно с юга. В интервале 05–07 UT кроме этих низкочастотных шумовых ОНЧ наблюдалось возбуждение серии коротких высокочастотных (больше 5 кГц) сигналов (“птички” по терминологии

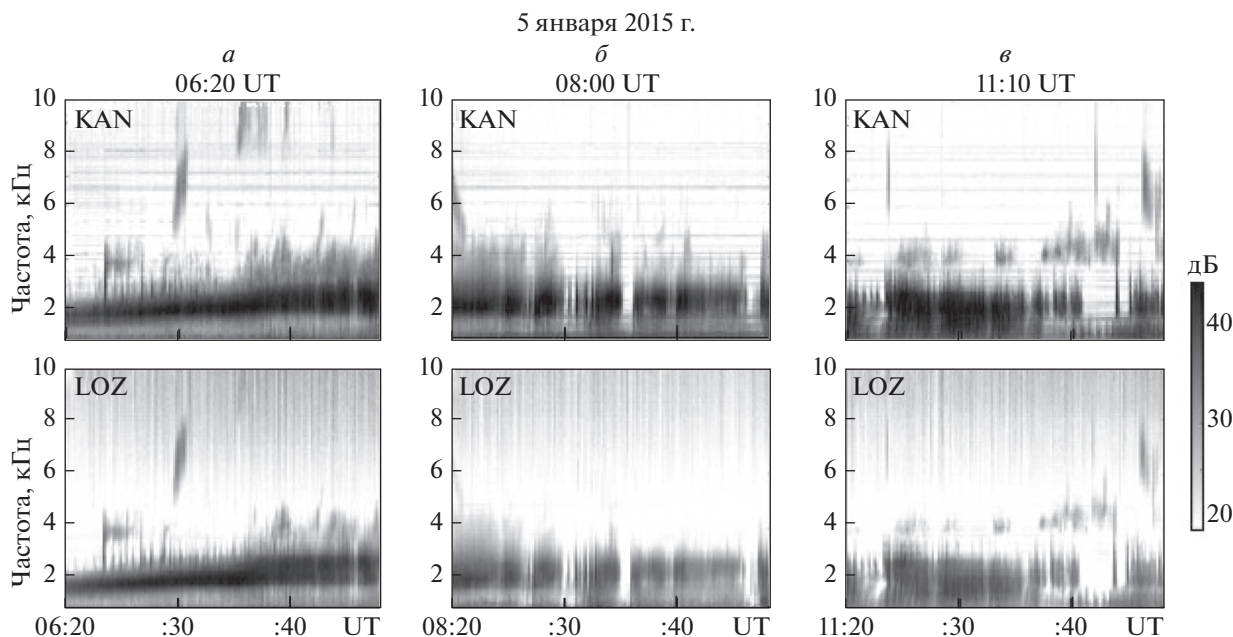


Рис. 4. Спектрограммы ОНЧ-излучений (30 мин) в КАН и ЛОВ в начале (а), середине (б) и конце (в) обсуждаемой ОНЧ шумовой бури. В исходных данных все спектрограммы приведены в цвете, что значительно нагляднее.

[Маннинен и др., 2017]). Подобные ОНЧ-сигналы наблюдались и в конце обсуждаемого ОНЧ-всплеска в интервале 10–14 UT.

Для определения характеристик поляризации магнитных компонент квазишумовых сигналов “птичек” мы применили метод обработки, описанный в работе [Рытов, 1966]. Этот метод позволяет оценить мощность шумовой составляющей, в которой компоненты поля ОНЧ-сигнала случайны во времени и не связаны между собой, и регулярной составляющей, в которой компоненты сигнала так же, как и в шумовой, случайны во времени, но обладают определенной поляризацией. Для характеристики последней применяются индексы линейной и круговой поляризации. Наиболее информативным параметром является индекс круговой поляризации, поскольку в силу специфики распространения сигналов магнитосферного происхождения по волноводу Земля-ионосфера этот индекс положителен под областью выхода из ионосферы и на расстоянии до 100–150 км от ее границ, и становится отрицательным на больших расстояниях. Другими словами, вблизи и на небольшом удалении от области выхода в северном полушарии сигнал правополяризован, а вдали от нее левополяризован. Этот факт может быть использован для оценки расстояния от регистратора до области выхода.

Результаты эксперимента показали, что в начале всплеска, в 05–07 UT, “птички” были левополяризованы, а в конце всплеска в 11–13 UT – правополяризованы. Можно предположить, что

сначала ионосферная область выхода высокочастотных ОНЧ-волн (“птичек”) располагалась значительно дальше от наземных ОНЧ-приемников, чем в конце обсуждаемого ОНЧ-всплеска.

В течение всего всплеска, по крайней мере, с 07 до 11 UT, верхняя граничная частота низкочастотных ОНЧ-волн оставалась примерно одинаковой (~3.0–3.5 кГц). Это было типичным и для всех наблюдаемых ранее таких длительных дневных ОНЧ-возмущений (“ОНЧ шумовых бурь”). Следовательно, можно предположить, что наименьшая (т.е. ближайшая в Земле) *L*-оболочка области генерации этих волн в магнитосфере является относительно постоянной.

Для того, чтобы проследить временную динамику данного ОНЧ-всплеска, рассмотрим более подробно три 30-мин интервала в начале, середине и конце всплеска (рис. 4а–4в, соответственно), на верхних графиках приведены спектрограммы КАН, на нижних ЛОВ, (на рисунках указаны международные коды: Каннуслахто – КАН и Ловозеро – ЛОВ). Четко видно, что динамические спектры ОНЧ-излучений в КАН и ЛОВ в 30-мин временном интервале подобны.

В начале всплеска в обеих точках видны короткие интенсивные ОНЧ-всплески на частотах выше 5 кГц, т.е. “птички” (рис. 4а). Наиболее интенсивные “птички” наблюдались на фоне возрастания частотной полосы хисса в 06–07 UT. Для примера рассмотрим две 3-мин спектрограммы таких сигналов с началом в 06:10 UT и 06:30 UT (рис. 5а и 5б соответственно). Видно, что спек-

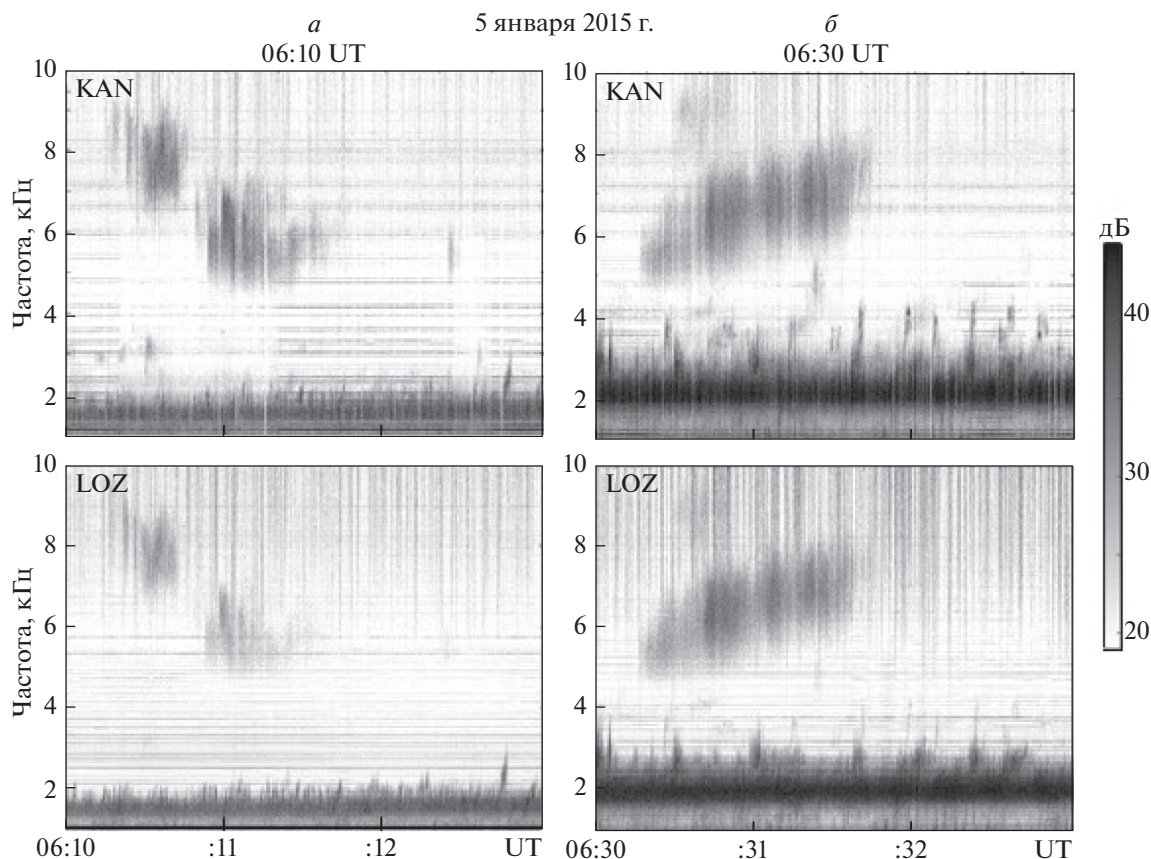


Рис. 5. Примеры 3-х мин спектрограмм “птичек” в КАН и ЛОВ в начале ОНЧ шумовой бури: (а) в 06:10 UT, (б) в 06:30 UT.

трограммы в обоих событиях в КАН и ЛОВ были подобными. По методике [Никитенко и др., 2018], основанной на оценках распределения потока энергии по азимутальным углам, было определено направление прихода волн, которое оказалось разным в КАН и ЛОВ.

Первое событие (06:10–06:12 UT) состояло из последовательности двух коротких (20 и 30 с) шумовых всплесков с падающей частотой [Маннинен и др., 2017], сначала излучения отмечались в полосе частот ~ 6.5 – 9.0 кГц, а затем – в полосе ~ 5.0 – 7.0 кГц (рис. 5а). По данным измерений в ЛОВ оба всплеска пришли в ЛОВ с юго-запада. В то же время в КАН волны приходили вдоль меридиана, но не известно, расположена область выхода волн к северу или к югу от КАН, поскольку определение азимута прихода волн в КАН возможно лишь с неоднозначностью в 180° . Исходя из подобия спектрограмм в КАН и ЛОВ, можно предположить, что излучения, зарегистрированные в этих точках, имели общий источник, расположенный согласно данным ЛОВ к юго-западу от ЛОВ. В таком случае можно заключить, что волны в КАН приходили с юга, а не с севера.

Второе событие (06:30–06:32 UT) наблюдалось в виде шумового всплеска в полосе частот

~ 5.0 – 8.0 кГц длительностью ~ 80 с (рис. 5б). По измерениям в ЛОВ во время этого всплеска ОНЧ-волны приходили в ЛОВ с юга. Наблюдения в КАН показали, что волны приходили с северо-запада или с юго-востока. Аналогично предыдущим рассуждениям, сопоставляя с данными ЛОВ, мы можем, предположить, что волны в КАН приходили с юго-востока, а область выхода волн из ионосферы, как и в первом случае, имела небольшие пространственные размеры, поскольку направление прихода ОНЧ-волн в КАН и ЛОВ было различным.

Похожая ситуация наблюдалась нами и ранее, например, 27 декабря 2014 г. в 08:30 UT, также в восстановительную фазу небольшой магнитной бури.

Эти результаты наблюдений мы интерпретируем как различное долготное расположение области выхода из ионосферы обсуждаемых коротких ОНЧ-всплесков (отдельных “птичек”). Можно предположить, что во время первого события область выхода ОНЧ-волн находилась вблизи меридиана КАН, но значительно южнее КАН, поэтому волны в ЛОВ приходили с юго-запада. Во время второго события область выхода ОНЧ-волн находилась вблизи меридиана ЛОВ,

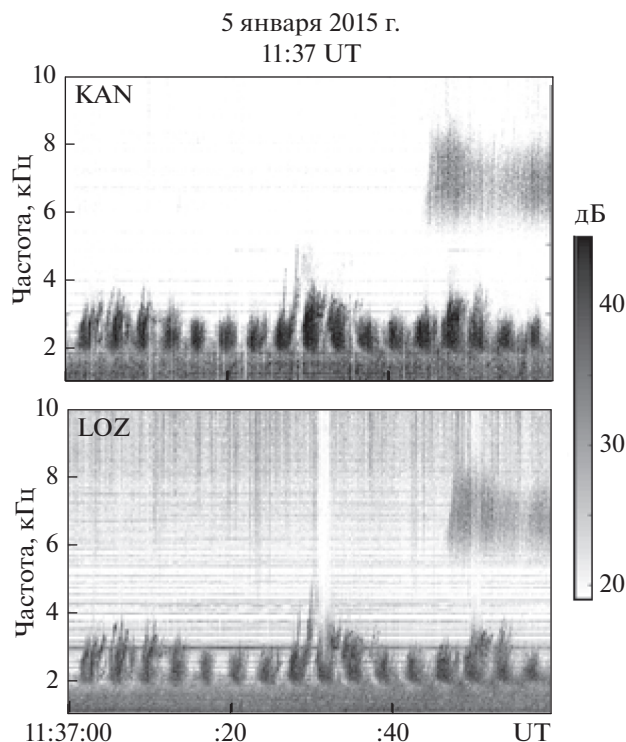


Рис. 6. Пример 1-мин спектрограммы короткопериодных *QP* излучений, наблюдаемых в КАН и ЛОВ в конце ОНЧ шумовой бури.

но южнее ЛОВ, поэтому ОНЧ-волны приходили в КАН с юго-востока. Анализ этих двух событий позволяет сделать вывод о том, что область выхода из ионосферы высокочастотных “птичек” достаточно локальна по долготе.

В середине основного ОНЧ-всплеска (ОНЧ шумовой бури), в 08–09 UT, полоса относительно стабильного однородного хисса (1.8–3.2 кГц) распалась на отдельные короткие группы ОНЧ-излучений длительностью порядка 3 мин (рис. 4б). Эти группы ОНЧ-сигналов представляли сложное наложение дискретных, квазипериодических и шумовых динамических спектров волн, свидетельствующих об их одновременном возбуждении в близкой полосе частот. В это время на скандинавском меридиане IMAGE регистрировались небольшие (~20–30 нТл) геомагнитные флуктуации с подобной квазипериодичностью, но четкой корреляции пик-в-пик с ОНЧ-вариациями не отмечалось.

В конце основного ОНЧ-всплеска (рис. 4в) полоса хисса полностью сменилась квазипериодическими (*QP*) излучениями. На рис. 6 приведены 1-мин спектрограммы этих излучений в КАН и ЛОВ. Видно, что очень короткие дискретные сигналы в полосе частот ~2–3 кГц характеризуются периодом повторения ~3 с. Такие *QP* излучения неоднократно регистрировались как на

земной поверхности [Engebretson et al., 2004; Manninen, 2005; Manninen et al., 2014], так и в магнитосфере [Bespalov et al., 2010].

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы предполагаем, что наблюдаемые на земной поверхности дневные всплески ОНЧ-излучений (ОНЧ шумовые бури) являются результатом канализации к ионосфере и последующему выходу к земле так называемого [Thorne et al., 1973] “плазмосферного хисса”, широко обсуждаемого в литературе, например, [Thorne et al., 1979; Storey et al., 1991; Haykawa and Sazhin, 1992; Cornilleau-Wehrin et al., 1993; Santolik et al., 2001; Meredith et al., 2006; Bortnik et al., 2009; Santolik and Chum, 2009; Summers et al., 2014; Tsurutani et al., 2015].

В ряде работ, например, [Golden et al., 2012; Kim et al., 2015] показано, что амплитуда плазмосферного хисса контролируется уровнем предшествующей (за 3–6 ч) геомагнитной активности, величиной скорости солнечного и величиной отрицательной *Bz*-компоненты ММП. Следовательно, закономерно, что обсуждаемый дневной ОНЧ-всплеск появился в позднюю восстановительную фазу магнитной бури, т.е. после окончания предшествующих геомагнитных возмущений (рис. 2).

Не вызывает сомнения, что генерация “ОНЧ шумовых бурь” происходит в магнитосфере за счет циклотронной неустойчивости электронов радиационных поясов Земли, механизм которой применительно к ОНЧ-излучениям рассмотрен во многих работах, например, [Rycroft, 1972; Bespalov and Трахтенгерц, 1976; Bespalov and Trakhtengerts, 1986; Trakhtengerts et al., 1996; Трахтенгерц и Райкрофт, 2011]. Следовательно, возрастание верхней и нижней граничной частоты ОНЧ-хисса в начале всплеска можно проинтерпретировать как приближение области генерации волн к Земле. Циклотронная неустойчивость наиболее эффективна внутри плазмосферы. Мы предполагаем, что генерация ОНЧ-хисса на частотах ниже 4 кГц, составляющего основное “тело” обсуждаемого дневного ОНЧ-всплеска, происходила внутри плазмосферы, внешняя граница которой (плазмопауза) находилась на *L*-оболочке значительно меньшей, чем положение КАН и ЛОВ, как это видно на рис. 2б.

Заметим, что обсуждаемая дневная ОНЧ шумовая буря наблюдалась после окончания предшествующих геомагнитных возмущений при положительных значениях *Bz* ММП, т.е. в восстановительную фазу магнитной бури и в отсутствие поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Генерация циклотронных ОНЧ-волн в это время указывает на наличие в радиационном поясе Земли определенного уровня

запасенных ранее захваченных электронов, обеспечивающего развитие циклотронной неустойчивости. Следовательно, появление на земной поверхности дневных всплесков ОНЧ-излучений является индикатором того, что, несмотря на отсутствие эффектов в геомагнитных вариациях, в магнитосфере имеется некий “остаточный” уровень радиации. Генерация дневных ОНЧ-шумов способствует распаду кольцевого тока и релаксации магнитосферы.

Наблюдаемые в начале и конце ОНЧ шумовой бури короткие всплески излучений на частотах выше 5 кГц (“птички”), по-видимому, также возбуждаются за счет циклотронного механизма внутри плазмосферы, как рассмотрено, например, в работе [Titova et al., 2015] и распространяются в магнитосфере неканализованным способом, как и QR излучения [Němes et al., 2012].

Наиболее вероятным механизмом генерации QR излучений, наблюдаемых в конце всплеска в полосе частот ~2–3 кГц, может быть, согласно работе [Bespalov et al., 2010], квазилинейная релаксация энергичных электронов радиационного пояса Земли. Механизм развития автоколебательных процессов в плазменном магнитосферном мазере был предложен и разработан в работах [Беспалов и Трахтенгерц, 1976; Беспалов, 1981; Беспалов и Коваль, 1982]. При этом, согласно работе [Беспалов и Коваль, 1982], в ходе развития релаксации магнитосферной плазмы, возможно разбиение предшествующего шумового излучения на отдельные квазипериодические всплески, что и наблюдалось в середине рассматриваемой ОНЧ шумовой бури (рис. 4б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ динамических спектров и углов прихода ОНЧ-излучений в диапазоне частот 1–10 кГц во время дневной ОНЧ шумовой бури 5 января 2015 г., зарегистрированной в авроральных широтах в двух точках – Каннуслехто (КАН), Финляндия и Ловозеро (ЛОВ), Россия, расположенных на геомагнитной широте ~64° MLAT и разнесенных по долготе на ~400 км.

Показано, что в течение обсуждаемого 7-ми часового дневного всплеска ОНЧ, спектрограммы волн на частотах ниже 4 кГц в КАН и ЛОВ в общих чертах были подобны, что может быть результатом относительно большой долготной области выхода этих ОНЧ-волн из ионосферы.

Высказано предположение, что генерация наблюдаемых всплесков ОНЧ-излучений происходит в плазмосфере за счет развития циклотронной неустойчивости, и частота волн определяется L -оболочкой нахождения источника волн. Квазипериодические (QR) излучения с периодом повторения ~3 с, по-видимому, обусловлены разви-

тием собственных колебаний в магнитосферном мазере [Bespalov et al., 2010] в позднюю восстановительную фазу магнитной бури.

Обнаружено, что даже в относительно небольшом временном интервале (меньше получаса) направление прихода отдельных коротких высокочастотных ОНЧ-всплесков на частотах выше 5 кГц (так называемых “птичек”) может значительно изменяться и быть различным в КАН и ЛОВ. Это позволяет сделать вывод о том, что, по-видимому, область выхода из ионосферы высокочастотных “птичек” достаточно локальна и не постоянна по долготе.

Таким образом, временные вариации характеристик ОНЧ-излучений на земной поверхности являются тонким индикатором динамики плазменных процессов в магнитосфере, развивающихся даже в отсутствие геомагнитных возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. О нелинейных колебательных процессах в магнитосфере Земли // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 19. № 5–6. С. 801–811. 1976.
- Беспалов П.А. Само модуляция излучения плазменного циклотронного мазера // Письма в ЖЭТФ. Т. 33. № 4. С. 192–195. 1981.
- Беспалов П.А., Коваль Л.Н. Установление периодических режимов циклотронной неустойчивости в плазменных пробкотронах // Физика плазмы. Т. 8. № 6. С. 1136–1144. 1982.
- Вершинин Е.Ф., Пономарев Е.А. О классификации непрерывного ультранизкочастотного радиоизлучения верхней атмосферы // Земной магнетизм, полярные сияния и ультранизкочастотное излучение. Вып. 1. С. 35–44. 1966.
- Вершинин Е.Ф., Горшков Ю.Н., Пономарев Е.А. Характеристики и условия появления всплесков ОНЧ излучения класса шумовых бурь // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 30. С. 3–9. 1974.
- Клейменова Н.Г., Троицкая В.А., Виньерон Ж. Связь среднеширотных ОНЧ с магнитной активностью // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 8. № 1. С. 529–533. 1968.
- Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Дневные ОНЧ-излучения в обл. Соданкюля ($L \sim 5.3$) на переднем фронте высокоскоростных потоков солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 53. № 3. С. 315–323. 2013.
- Маннинен Ю., Турунен Т., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Козловский А.Е., Новый вид дневных высокочастотных ОНЧ-излучений в авроральных широтах (“птички”) // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 57. № 1. С. 36–44. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017010096>
- Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. Первые результаты локализации области выхода естественных СНЧ/ОНЧ излучений в высоких широтах по данным наземных наблюдений // Тр. 41-го Семинара “Физика авроральных явлений”, Апатиты, 12–16 мар-

- та 2018. С. 61–65. 2018.
<https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.61-65>
- *Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М.* Генератор сигналов специальной формы для калибровки регистраторов электромагнитного поля // Приборы и техника эксперимента. № 6. С. 49–55. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0032816218060125>
- *Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 3. ОНЧ излучения. Л.: ЛГУ, 144 с. 1977.
- *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука. 494 с. 1966.
- *Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж.* Свистовые и альвеновские мазеры в космосе // М.: ФИЗМАТЛИТ. 344 с. 2011.
- *Федякина Н.И.* Шумовые бури в ОНЧ-излучении и *Dst* вариация // Якутск: Якутский филиал СО АН СССР. Низкочастотные сигналы во внешней ионосфере. С. 59–64. 1976.
- *Bespalov P.A., Trakhtengerts V.Y.* The cyclotron instability in the Earth radiation belts // *Rev. plasma physics*. V. 10. Ed. *M.A. Leontovich*. N.Y.: Plenum. P. 155–192. 1986.
- *Bespalov P.A., Parrot M., Manninen J.* Short-period VLF emissions as solitary envelope waves in a magnetospheric plasma maser // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 72. P. 1275–1281. 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.001>
- *Bortnik J., Thorne R.M., Meredith N.P.* Plasmaspheric hiss overview and relation to chorus // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 71. P. 1636–1646. 2009. <https://doi.org/2009JASTP..71.1636B>
- *Cornilleau-Wehrlin N., Solomon J., Korth A., Kremser G.* Generation mechanism of plasmaspheric ELF/VLF hiss: A statistical study from GEOS 1 data // *J. Geophys. Res.* 98. P. 21.471–21.480. 1993.
<https://doi.org/10.1029/93JA01919>
- Davis T.N., Sugiura M.* Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 785–801. 1966.
<https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Delpont B., Collier A.B., Lichtenberger J., Rodger C.J., Parrot M., Clilverd M.A., Friedel R.H.W.* Simultaneous observation of chorus and hiss near the plasmopause // *J. Geophys. Res.* 117. A12218. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017609>
- Dunckel N., Helliwell R.A.* Whistler mode emissions on the OGO 1 satellite // *J. Geophys. Res.* 74. P. 6371–6385. 1969.
<https://doi.org/10.1029/JA074i026p06371>
- *Engebretson M.J., Posch J.L., Halford A.J., Shelburne G.A., Smith A.J., Spasojevic M., Inan U.S., Arnoldy R.L.* Latitudinal and seasonal variations of quasi-periodic and periodic VLF emissions in the outer magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 109. A05216. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010335>
- *Fedorenko Y., Tereshchenko E., Pilgaev S., Grigoryev V., Blagoveshchenskaya N.* Polarization of ELF waves generated during “beating-wave” heating experiment near cutoff frequency of the Earth-ionosphere waveguide // *Radio Sci.* V. 49. P. 1254–1264. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013RS005336>
- *Gjerloev J.W.* The SuperMAG data processing technique // *J. Geophys. Res.* V. 117. A09213. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- *Golden D.I., Spasojevic M., Li W., Nishimura Y.* Statistical modeling of plasmaspheric hiss amplitude using solar wind measurements and geomagnetic indices // *Geophys. Res. Lett.* 39. L06103. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051185>
- *Haykawa M., Sazhin S.S.* Mid-latitude and plasmasheric hiss: a review // *Planet. Space Sci.* V. 40. № 10. P. 1325–1338. 1992.
- *Helliwell R.A.* Whistler and related ionospheric phenomena // Stanford. Stanford Univ. Press. 349 p. 1965.
- *Kim K.-C., Lee D.-Y., Shprits Y.* Dependence of plasmaspheric hiss on solar wind parameters and geomagnetic activity and modeling of its global distribution // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 120. P. 1153–1167. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020687>
- *LaBelle J., Treumann R.* Auroral Radio Emissions. 1. Hisses, Roars, and Bursts // *Space Sci. Rev.* V. 101(3). P. 295–440. 2002.
- *Manninen J.* Some aspects of ELF-VLF emissions in geophysical research // Sodankylä. Geophysical Observatory Publication. 98. Oulu University Press. Sodankylä, Finland. 177 p. 2005. [available at <http://www.sgo.fi/Publications/SGO/thesis/ManninenJyrki.pdf>]
- *Manninen J., Demekhov A.G., Titova E.E., Kozlovsky A.E., Pasmanik D.L.* Quasi-periodic VLF emissions with short-period modulation and their relationship to whistlers: a case study // *J. Geophys. Res.* V. 119. Is. 5. P. 3544–3557. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019743>
- *Manninen J., Kleimenova N.G., Kozlovsky A., Kornilov I.A., Gromova L.I., Fedorenko Yu.V., Turunen T.* Strange VLF bursts in northern Scandinavia: case study of the afternoon “mushroom-like” hiss on 8 December 2013 // *Ann. Geophysicae*. V. 33. P. 991–995. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-991-2015>
- *Manninen J., Turunen T., Kleimenova N., Rycroft M., Gromova L., Sirviö I.* Unusually high frequency natural VLF radio emissions observed during daytime in Northern Finland // *Environ. Res. Lett.* V. 11. P. 124006. 2016.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124006>
- *Meredith N.P., Horne R.B., Clilverd M.A., Horsfall D., Thorne R.M., Anderson R.R.* Origins of plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* 111. A09217. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011707>
- *Němec F., Santoli’k O., Parrot M., Pickett J.S., Hayosh M., Cornilleau-Wehrlin N.* Conjugate observations of quasi-periodic emissions by Cluster and DEMETER spacecraft // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 118. P. 198–208. 2013.
<https://doi.org/10.1029/2012JA018380>
- *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* V. 116. A12211.
<https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
- *Ohya H., Shiokawa K., Miyoshi Y.* Daytime tweek atmospheric // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 120. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020375>
- *Rycroft M.J.* VLF emissions in the magnetosphere // *Radio Sci.* V. 7. P. 811–830. 1972.
<https://doi.org/10.1029/RS007i008p00811>

- Santolik O., Parrot M., Storey L.R.O., Pickett J.S., Gurnett D.A. Propagation analysis of plasmaspheric hiss using Polar PWI measurements. // *Geophys. Res. Lett.* 28. P. 1127–1130. 2001.
<https://doi.org/10.1029/2000GL012239>
- Santolik O., Chum J. The origin of plasmaspheric hiss // *Science*. V. 324(5928). P. 729–730. 2009.
<https://doi.org/10.1126/science.1172878>
- Smith E.J., Frandsen A.M.A., Tsurutani B.T., Thorne R.M., Chan K.W. Plasmaspheric hiss intensity variations during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 79. № 16. P. 2507–2510. 1974.
<https://doi.org/10.1029/JA079i016p02507>
- Storey L.R.O., Lefeuvre F., Parrot M., Cairo L., Anderson R.R. Initial survey of the wave distribution functions for plasmaspheric hiss observed by ISEE 1 // *J. Geophys. Res.* 96 (A11). P. 19.469–19.489. 1991.
<https://doi.org/10.1029/91JA01828>
- Summers D., Omura Y., Nakamura S., Kletzing C.A. Fine structure of plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 119. P. 9134–9149. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020437>
- Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined. // *J. Geophys. Res.* 114. A05204. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013682>
- Thorne R.M., Smith E.J., Burton R.K., Holzer R.E. Plasmaspheric hiss // *J. Geophys. Res.* V. 78. P. 1581–1596. 1973.
<https://doi.org/10.1029/JA078i010p01581>
- Thorne R.M., Church S.R., Gorney D.J. On the origin of the plasmaspheric hiss: the importance of wave propagation and the plasmopause // *J. Geophys. Res.* V. 84. P. 5241–5247. 1979.
<https://doi.org/10.1029/JA084iA09p05241>
- Titova E.E., Kozelov B.V., Demekhov A.G., Manninen J., Santolik O., Kletzing C.A., Reeves G. Identification of the source of quasiperiodic VLF emissions using ground-based and Van Allen Probes satellite observations // *Geophys. Res. Lett.* V. 42. P. 6137–6145. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015GL064911>
- Tsurutani B.T., Falkowski B.J., Pickett J.S., Santolik O., Lakhina G.S. Plasmaspheric hiss properties: Observations from Polar // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 120. P. 414–431. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020518>
- Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J., Demekhov A.G. Interrelation of noise-like and discrete ELF/VLF emissions generated by cyclotron interactions // *J. Geophys. Res.* V. 101(A6). P. 13.293–13.303. 1996.
<https://doi.org/10.1029/95JA03515>
- Yearby K.H., Smith A.J. The polarization of whistlers received on the ground near $L = 4$ // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 56. P. 1499–1512. 1994.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)90117-1)