

УДК 550.388.2.:551.594.21

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ШУМОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРВОГО ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

© 2011 г. М. И. Белоглазов, В. В. Пчелкин

Учреждение РАН Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты (Мурманская обл.)

e-mail: blgz@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.06.2010 г.

После доработки 05.10.2010 г.

Исследованы распределения уровня естественного шумового электромагнитного поля в окрестности первого шумановского резонанса по данным обс. “Ловозеро” (Кольский п-ов). Построены суточные кривые превышений уровня шума над заданными порогами при разной геомагнитной возмущенности. Показано, что в магнитоспокойные дни кривые морфологически подобны, но характеризуются сильной изменчивостью от суток к суткам, хотя при усреднении близки по некоторым признакам к унитарной вариации приземного квазистатического электрического поля. Для аналитического описания распределения вероятностей уровня шумов рассмотрены возможности применения известной из литературы формулы распределения вероятностей амплитуд атмосферных радиопомех ОНЧ-диапазона. Обнаружено, что геомагнитные возмущения заметно влияют на параметры распределения, резко увеличивая количество высокоамплитудных помех.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение шумового электромагнитного поля КНЧ-диапазона (3–30 Гц) в атмосфере высоких широт представляет значительный интерес по ряду причин. В частности, можно выделить две группы физических явлений, ответственных за генерацию КНЧ-излучений. С одной стороны, это – процессы грозообразования и молниевой активности в полостях Земля-ионосфера, а с другой – генерация шумового электромагнитного поля в широком диапазоне частот при воздействии извне магнитогидродинамических (МГД) волн на ионосферу Земли (см., например, [Александров и др., 1972; Блюх и др., 1977; Молчанов, 1985]). При этом существуют еще источники антропогенного и сейсмического происхождения. Отсюда следует, что и с прикладной, и с научной точек зрения, изучение статистических свойств шумового электромагнитного КНЧ-поля высоких широт в зависимости от солнечной активности, геомагнитной возмущенности, сезона, времени суток и пр. имеет достаточно большую значимость. К сожалению, в настоящее время информация подобного рода практически отсутствует, если не считать работы [Долгополов, 1987], в которой обсуждаются результаты кратковременных (13–16 апреля 1984 г.) измерений трех магнитных и вертикальной электрической компонент поля в диапазоне частот 1.5–1000 Гц на льду бухты Гертнера в окрестности г. Магадана. Кроме того, известна обстоятельная работа [Осинин, 1982], посвященная статистическим характеристикам шумового элек-

тромагнитного поля, полученным по измерениям на северо-востоке России, но на более высоких частотах (в ОНЧ-диапазоне).

Учитывая данные обстоятельства, мы попытались восполнить в некоторой степени указанный пробел. Основной целью представленной работы стало определение изменений суточных кривых превышений уровня естественного электромагнитного поля в окрестности первого шумановского резонанса над заданными порогами в зависимости от степени геомагнитной возмущенности. Кроме того, для аналитического описания распределения вероятностей уровня шумов на рассмотренном участке частотного диапазона была изучена возможность применения известной из литературы [Лихтер и Терина, 1960; Лихтер, 1961а, б; Махоткин, 1963] формулы распределения амплитуд атмосферных радиопомех ОНЧ-диапазона.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

В работе использованы данные регулярных измерений горизонтальной компоненты шумового магнитного поля в диапазоне 0.1–20 Гц, выполняющихся с помощью индукционного магнитометра, установленного в обс. ПГИ “Ловозеро” (67.97° N, 35.08° E). Краткое описание измерительной аппаратуры содержится в работе [Белоглазов и др., 2009].

В качестве одной из основных характеристик распределения шумов выбрано число превышений

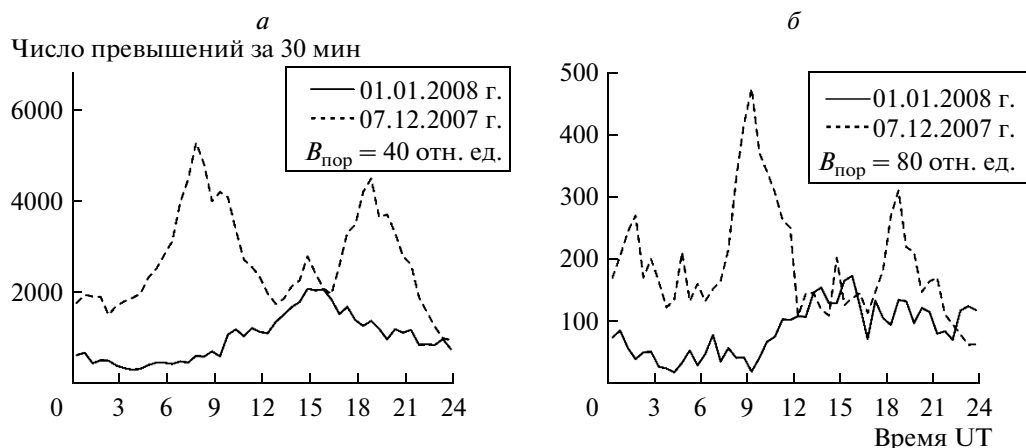


Рис. 1. Суточные зависимости  $N_L$  для разных порогов в геомагнитно-спокойные дни 07.12.2007 г. и 01.01.2008 г.

уровня регистрируемого сигнала над заданным порогом в течение 30-минутного интервала наблюдения. Далее это число превышений обозначено как  $N_L$ . Известно из работы [Александров и др., 1972]), что в качестве некоторого параметра, характеризующего случайный импульсный процесс, величина  $N_L$  обладает простым физическим смыслом, являясь, по сути, временем превышения случайной величиной заданного порога и может быть легко определена по экспериментальным данным.

В связи с минимальным количеством гроз зимой в северном полушарии, для анализа был выбран зимний период с декабря 2007 г. по февраль 2008 г. В условиях высокоширотных наблюдений отсутствие грозных источников, близко расположенных к

Кольскому п-ову, позволяет более уверенно фиксировать изменения молниевой активности в удаленных мировых центрах гроз, а также проводить их сравнение с магнитосферными источниками КНЧ-излучений. При этом можно предполагать, что разная природа этих источников КНЧ-шумов влечет за собой и разные статистические характеристики амплитуд. По этой причине отдельно были рассмотрены записи шумов в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. За указанный 3-месячный интервал времени по критерию уверенного отсутствия промышленных помех, а также по техническим причинам для анализа были отобраны 23 геомагнитно-спокойных и 15 возмущенных суток. Уровень геомагнитной возмущенности определялся в соответствии с данными, приводимыми на сайте [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\\_provisional/index.html](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_provisional/index.html).

В процессе обработки экспериментальные данные пропускались через низкочастотный фильтр, отсекающий пульсации частотой ниже примерно 4 Гц. После этого рассчитывался модуль горизонтального вектора шумового магнитного поля — фактически в диапазоне ~4–15 Гц, т.е. в окрестности 1-го шумановского резонанса. Шкала задаваемых порогов определялась всем диапазоном значений уровней шумового магнитного поля, зарегистрированных в спокойных геомагнитных условиях. При переходе к возмущенным условиям шкала порогов не менялась.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных показал, что суточные кривые превышений двух взаимно перпендикулярных составляющих горизонтальной компоненты шумового магнитного поля имеют различный вид. При

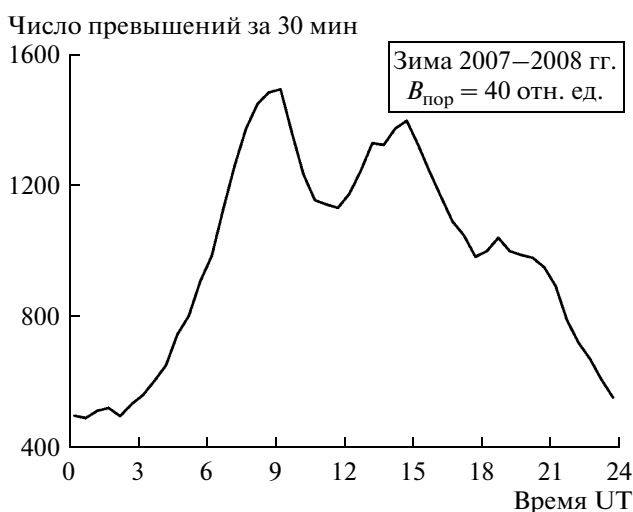


Рис. 2. Средняя суточная зависимость  $N_L$  горизонтальной компоненты магнитного поля в спокойных условиях.

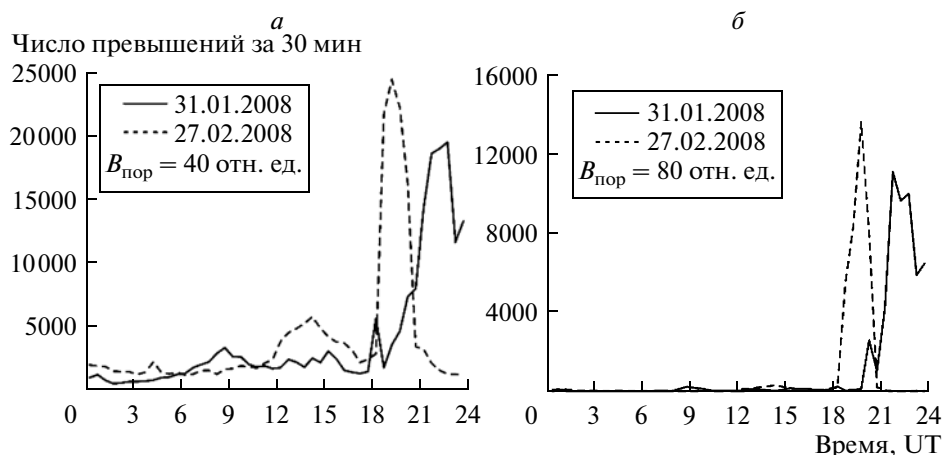


Рис. 3. Суточные зависимости  $N_L$  для разных порогов в геомагнитно-возмущенные дни 31.01.2008 г. и 27.02.2008 г.

этом суточные зависимости параметра  $N_L$  в магнитоспокойные дни при различных заданных порогах морфологически подобны. При этом, хотя они и характеризуются сильной изменчивостью от суток к суткам, но тем не менее удовлетворительно отражают общую картину известных закономерностей пространственно-временных вариаций глобальной молниевой активности. В частности, уверенно фиксируется наличие максимума грозовой активности около 16–18 LT в мировых центрах гроз.

В качестве примера на рис. 1 представлены суточные зависимости  $N_L$  при разных порогах во время двух геомагнитно-спокойных дней (07.12.2007 г. уровень  $AE$ -индекса не превышал 70–80 нТл; 01.01.2008 г. на протяжении всей длительности суток  $AE$ -индекс также был менее 70–80 нТл, и лишь в период с 11 до 12 UT наблюдалось его краткое увеличение до 300 нТл). Из сравнения рисунков *a* и *b* видно, что, как и следует ожидать, увеличение порога приводит к уменьшению  $N_L$  и к большей изрезанности графиков — как одному из следствий уменьшения количества превышений. И тем не менее при разных порогах подобие суточных зависимостей сохраняется. Кроме того, на графиках для 07.12.2007 г. ясно видны три максимума, которые приходятся примерно на 07 UT (Юго-Восточный Азиатский грозовой центр), 15 UT (Южно-Африканский) и 19 UT (Американский центр). При этом интенсивность Африканского центра 07.12.2007 г. была гораздо ниже по сравнению с Азиатским и Американским центрами. Однако 01.01.2008 г. наблюдалась обратная картина, когда доминирующим оказался Африканский центр.

На рисунке 2 представлена суточная зависимость  $N_L$ , усредненная по всем 23-м геомагнитно-спокойным датам. Если ее сравнить с кривой Карнеги (см., например, [Чалмерс, 1974]), то сходство

обеих зависимостей обнаруживается по двум признакам, а именно: во-первых, минимум приходится на ночные часы UT; во-вторых, достаточно ясно выражены все три глобальных центра грозовой активности. Однако при этом средняя суточная зависимость  $N_L$  имеет максимум, приходящийся на Азиатский центр, а унитарная вариация — на Американский. Причины такого различия могут иметь разную природу. Во-первых, условия формирования квазистатического электрического поля могут, вероятно, отличаться от условий формирования высокоширотного переменного электромагнитного поля КНЧ-шумов. Во-вторых, нельзя упускать из вида того, что при переходе от года к году средняя суточная зависимость  $N_L$  может существенно измениться. В-третьих, в литературе под грозовой (молниевой) активностью обычно понимают количество гроз (молний), зарегистрированных в единицу времени на единице площади или на географически определенном пространстве. В этом смысле параметр  $N_L$  как индикатор грозовой активности оказывается более сложной ее характеристикой, так как зависит не только от плотности, но и от мощности молний. Не исключена вероятность того, что в Азиатском центре грозовой активности при меньшей плотности молний, мощность каждой из них, в среднем, оказывается большей по сравнению с Африканским и Американским центрами. Тем не менее все перечисленное — это лишь гипотезы, требующие специального исследования, которое выходит за рамки данной статьи.

Переход от геомагнитно-спокойных условий к возмущенным приводит к существенным изменениям суточного хода  $N_L$ . Рассмотрим, в качестве примера, представленные на рис. 3 суточные зависимости  $N_L$  при разных порогах во время двух геомагнитно-возмущенных дней.

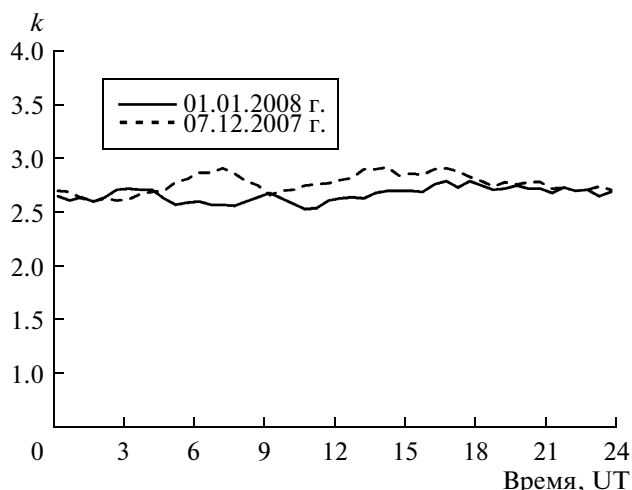


Рис. 4. Суточные зависимости параметра  $k$  из формулы (1) для спокойных геомагнитных условий.

Здесь на протяжении большей части суток 31.01.2008 г. — до 18 UT — значения  $AE$ -индекса не превышали 100–200 нТл. В этот период на графике  $N_L$  ясно видны Азиатский и Африканский центры гроз (примерно одинаковой интенсивности). Относительно Американского центра ничего определенного сказать нельзя, так как с 18 до 19 UT произошло первое увеличение  $AE$ -индекса до 700 нТл, которое проявилось и в суточной зависимости  $N_L$  пикообразным скачком. Затем — с 21:30 UT и до конца суток — наступило длительное повышение  $AE$ -индекса до 400–600 нТл, которое привело к резкому увеличению  $N_L$  в несколько раз по сравнению со спокойными условиями.

Аналогичная ситуация наблюдалась и 27.02.2008 г., когда также ~ до 18 UT значения  $AE$ -индекса не превосходили 300 нТл. В это время активность Азиатского грозового центра оказалась слабо выраженной. Напротив, Африканский центр гроз был доминирующим. Относительно Американского центра, как и в предыдущем случае, ничего определенного сказать нельзя, так как с 18:30 до 21 UT произошло увеличение  $AE$ -индекса до 1300 нТл, которое также проявилось и в суточном ходе  $N_L$  горизонтальной компоненты магнитного поля в виде увеличения  $N_L$  в несколько раз по сравнению со спокойными условиями.

Анализ всего ансамбля данных позволяет утверждать, что в зимнем сезоне 2007–2008 гг. своего рода граничным значением  $AE$ -индекса являлся уровень 300–400 нТл. Ниже этого уровня динамика  $N_L$  горизонтальной компоненты магнитного КНЧ-поля в окрестности 1-го Шумановского резонанса определялась грозовой активностью в полости Землионосфера. Увеличение  $AE$ -индекса до 400–500 нТл

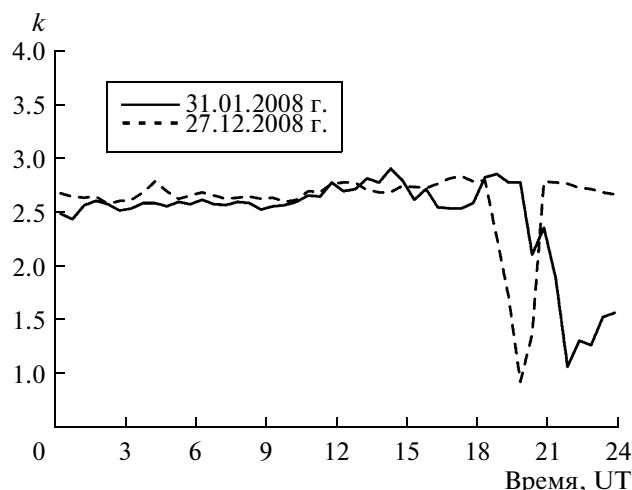


Рис. 5. Суточные зависимости параметра  $k$  из формулы (1) в условиях геомагнитной возмущенности.

и более приводило к тому, что главным фактором вариаций  $N_L$  в высоких широтах становились КНЧ-источники магнитосферного происхождения.

Представляет интерес рассмотреть аналитическую форму вероятностного распределения уровней горизонтальной компоненты магнитного КНЧ-поля и изменчивости ее параметров в течение суток, а также в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности.

Отметим, что для описания закона распределения амплитуд огибающей атмосферных радиопомех в килогерцовом диапазоне применяется формула вида [Лихтер и Терина, 1960; Лихтер, 1961а, б; Махоткин, 1963]

$$P(X) = [1 + (X/X_{50})^k]^{-1}, \quad (1)$$

которая выведена из следующих предположений (здесь  $X_{50}$  — медиана распределения или половина среднего значения): — распределение ударов молнии по поверхности Земли равномерно; — амплитуда атмосферика убывает при удалении на расстояние  $R$  от его источника по закону

$$A = A_{\text{ист}}(R_0/R)^m.$$

Закон распределения амплитуд атмосфериков  $A_{\text{ист}}$  на небольшом расстоянии  $R_0$  от их источника одинаков для любого грозового очага.

Полагая эти положения справедливыми и для шумов КНЧ-диапазона, мы применили выражение (1) для описания вероятностного распределения уровней горизонтальной компоненты магнитного КНЧ-поля. При этом для каждого из отобранных для анализа 38-ми суток выполнялись операции по подгонке параметров формулы (1), наилучшим образом описывающей экспериментальное распреде-

ление вероятностей амплитуд. В качестве оптимизационного критерия использовался принцип Лежандра о минимуме суммы квадратов невязок:

$$\sum_{i=1}^n (X_{i \text{ эксп}} - X_{i \text{ теор}})^2 \rightarrow \min,$$

а результаты подгонки параметров характеризовались величиной так называемой остаточной ошибки, рассчитываемой по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i \text{ эксп}} - X_{i \text{ теор}})^2}{\sum_{i=1}^n X_{i \text{ эксп}}^2}.$$

Оказалось, что в спокойных геомагнитных условиях параметр  $k$  из формулы (1) мало меняется как на протяжении одних суток, так и от суток к суткам. При этом диапазон значений  $k$  лежит в пределах 2.3–3.0. На рисунке 4, в качестве примера представлены суточные зависимости параметра  $k$  для геомагнитно-спокойных суток 07.12.2007 г. и 01.01.2008 г. (см. рис. 1). Видно, что хотя суточные зависимости  $N_L$  в эти дни сильно различаются между собой (см. рис. 1), тем не менее суточные кривые параметра  $k$  близки.

Усиление геомагнитной активности кардинально меняет картину во всех рассмотренных случаях, приводя к резкому понижению значений  $k$  вплоть до 0.9–1.0. В качестве примера на рис. 5 представлены суточные зависимости параметра  $k$  для геомагнитно-возмущенных суток 31.01.2008 г. и 27.02.2008 г. (рис. 3). Видно, что до 18 UT в обоих случаях значения  $k$  изменялись от 2.4 до 2.9, характерных для спокойных условий. Увеличение же  $AE$ -индекса после 18 UT приводит к резкому падению  $k$ , что, в частности, свидетельствует о резко увеличившемся разбросе амплитуд горизонтальной компоненты магнитного поля.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ распределений уровня естественных КНЧ-шумов в окрестности первого шумановского резонанса, проведенный по результатам наблюдений на Кольском п-ове в зимний период 2007–2008 гг., позволяет сделать следующие выводы:

1) суточные зависимости превышений в условиях магнитоспокойных дней при различных порогах морфологически подобны, хотя характеризуются сильной изменчивостью от суток к суткам;

2) при сравнении усредненной суточной зависимости  $N_L$  в спокойных условиях с кривой Карнеги их сходство обнаруживается, во-первых, в том, что в обеих зависимостях минимум приходится на ночные часы UT, а во-вторых, оказываются достаточно ясно выражены все три глобальных центра грозовой активности; однако при этом средний суточный ход  $N_L$  имеет максимум, приходящийся на Азиатский центр, а унитарная вариация – на Американский;

3) вероятностное распределение уровней горизонтальной компоненты магнитного КНЧ-поля может быть аппроксимировано формулой вида

$$P(X) = [1 + (X/X_{50})^k]^{-1},$$

известной из литературы для радишумов килогерцового диапазона частот; параметр  $k$  этой зависимости в спокойной геомагнитной обстановке оказывается достаточно устойчивым как в течение суток, так и от дня ко дню; в рассмотренных нами случаях его значения лежали в пределах 2.3–3.0;

4) магнитосферные возмущения существенно изменяют распределения уровней естественного электромагнитного шума рассматриваемого диапазона частот, резко увеличивая число высокоамплитудных помех и приводя к уменьшению параметра  $k$  до величин 0.9–1.0;

5) в зимнем сезоне 2007–2008 гг. своего рода граничным значением  $AE$ -индекса являлся уровень примерно 300–400 нТл; ниже этого уровня динамика  $N_L$  определялась грозовой активностью в полости Земля-ионосфера; увеличение  $AE$ -индекса до 400–500 нТл и более приводило к тому, что главным фактором вариаций  $N_L$  в высоких широтах становились КНЧ-источники магнитосферного происхождения.

Авторы признательны А.Н. Васильеву, С.П. Носкову и А.И. Воронину за полезные консультации и подготовку аппаратуры, а также персоналу обс. “Ловозеро” за проведение измерений.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН № 4.11 “Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов” (проект № 4.5 “Атмосферное электричество в нижней атмосфере полярных широт”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потапов А.В., Ремизов Л.Т. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ // М.: Наука. 195 с. 1972.
- Белоглазов М.И., Ахметов О.И., Васильев А.Н., Косолапенко В.И. Вариации глобальной грозовой активности по наблюдениям интенсивности 1-го

- Шумановского резонанса в Арктике // Метеорология и гидрология. Т. 60. № 12. С. 18–24. 2009.
- Блиох П.В., Николаенко А.С., Филиппов Ю.В.* Глобальные электромагнитные резонансы в полости земля-ионосфера. Киев: Наук. думка. 200 с. 1977.
- Долгополов С.Г.* О соответствии суточных вариаций уровней крайне низкочастотного поля Земли ходу мировой грозовой активности // Сб. научн. тр. “Радиофизические исследования геофизических явлений на Востоке СССР”. ред. В.Ф. Осинин. Магадан: СВКНИИ АН СССР. С. 10–20. 1987.
- Лихтер Я.И.* Исследования атмосфериков в СССР в 1957–1959 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 1. № 2. С. 228–231. 1961а.
- Лихтер Я.И.* Об аппроксимационной формуле закона распределения амплитуды огибающей атмосферных радиопомех // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 1. № 2. С. 281–287. 1961б.
- Лихтер Я.И., Терина Г.И.* Некоторые результаты исследования интенсивности атмосферных помех в Москве // Сб. “Исследования ионосферы”. М.: АН СССР. № 3. С. 90–94. 1960.
- Махоткин Л.Г.* Статистика атмосферных радиопомех // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 3. № 2. С. 284–292. 1963.
- Молчанов О.А.* Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука. 223 с. 1985.
- Осинин В.Ф.* Радишумы естественных источников на востоке СССР. М.: Наука. 161 с. 1982.
- Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат. 420 с. 1974.