УДК 551.594.6

Резонансные проявления в грозовых электромагнитных сигналах

А.А. Торопов, В.А. Муллаяров

Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, г. Якутск

На основе экспериментальных данных наблюдений низкочастотных радиоизлучений, полученных в окрестностях г. Якутска и п. Батагая, рассмотрены резонансные эффекты в электромагнитных сигналах грозовых разрядов. Эффекты имеют частоты, лежащие ниже критической частоты поперечного резонанса «земля–ионосфера». Особо выделяются эффекты в виде «полос» (квазипериодических излучений), зарегистрированные, в основном, в окрестности п. Батагая. Основная резонансная частота эффектов составляла около 145 Гц, добротность колебаний – около 10 Гц. Полученное по сигналам с верхним частотным «срезом» распределение возможных критических частот показывает достаточно широкий диапазон частот с максимумом событий на 700–800 Гц. В диапазоне 350–600 Гц отмечается совпадение частот разных типов резонансных проявлений: полос, «колен» (дисперсия вверх и вниз от резонансной частоты) и сигналов с верхним частотным «срезом». В качестве возможного волновода, в котором проявляются указанные резонансные эффекты, предполагается волновод, образованный слоями ионосферы.

Ключевые слова: грозовые электромагнитные сигналы, волноводы, резонансы, распространение сигналов, ионосфера.

On the basis of experimental data of observations of low-frequency radio emissions carried out in the vicinity of Yakutsk city and Batagai settlement the resonant effects of lightning electromagnetic signals are considered. The effects have frequencies which are below the critical frequency of transverse resonance of the «earth–ionosphere» waveguide.The effects in the form of «bands» (quasi-periodic emissions) registered mostly in the vicinity of Batagai were standing out. The main resonance frequency of the effects was about 145 Hz, and Q-factor was about 10.The distribution of possible critical frequencies obtained on the basis of the signals with upper frequency «cut-off» reveals a fairly wide range of frequencies, with maximum events at 700–800 Hz. In the range of 350–600 Hz it is observed the coincidence of frequencies of different types of the resonant effects: bands, «knees» (dispersion upwards and downwards from the resonant frequency) and signals with upper frequency «cut-off». The waveguide formed by the layers of the ionosphere is proposed as a possible waveguide, in which these resonance effects are manifested.

Key words: storm electromagnetic signals, waveguides, resonances, distribution of signals, ionosphere.

Введение

Низкочастотные (f < 30 кГц) радиосигналы за счет слабого затухания при распространении в волноводе «земля–ионосфера» используются в дистанционном мониторинге процессов и структур в верхней атмосфере–ионосфере. Это, прежде всего, сигналы радиостанций СДВ диапазона, используемые для диагностики процессов в ионосфере во время солнечных вспышек, высыпания заряженных энергичных частиц из радиационных поясов и обнаружения ионосферных возмущений, обусловленных сейсмическими процессами (см., например, [4,6,9,10]). Наряду с радиосигналами привлекаются и естественные электромагнитные излучения в диапазоне очень низких частот (ОНЧ, f < 30 кГц). Широко известным таким излучением является электромагнитное излучение грозовых разрядов (атмосферики), которое, прежде всего, используется для мониторинга грозовой активности (определение местоположения грозовых разрядов). Для целей такой пассивной грозолокации применяются как однопунктовые, так и многопунктовые системы (например, мировая распределенная система WWLLN [12]). В работах [3,8] эти сигналы предложено использовать для дистанционного обнаружения сейсмических ионосферных возмущений (эффектов землетрясений и их возможных предвестников).

Поскольку грозовые сигналы распространяются в волноводе («земля–ионосфера»), то в их характеристиках, естественно, проявляются резонансные

ТОРОПОВ Анатолий Анатольевич – м.н.с., mullayarov@ikfia.ysn.ru; МУЛЛАЯРОВ Виктор Арсланович – к.ф.-м.н., с.н.с., зав. лаб., mullayarov@ikfia.ysn.ru.

свойства данного волновода – наличие критической частоты около 1,7 кГц (определяется высотой верхней стенки волновода – высотой нижней ионосферы). В окрестности этой резонансной частоты происходит сильное затухание сигналов и могут наблюдаться специфические (сильно диспергированные) сигналы – так называемые «твики» [1, 2]. Данные особенности сигналов изучены достаточно хорошо. В то же время обнаружены и другие типы резонансных проявлений в электромагнитных сигналах, связанных с грозовыми процессами [7], которые пока не обсуждаются (слабо обсуждаются). В данной работе рассматриваются особенности таких резонансных проявлений в характеристиках грозовых электромагнитных излучений.

Аппаратура и методика измерений

Основные записи сигналов осуществляются с помощью многокомпонентного приемно-измерительного комплекса вблизи г. Якутска, в котором используется антенная система, состоящая из двух ортогональных рамок для приема магнитной составляющей сигналов и вертикального штыря для приема электрической составляющей.

Сигналы, снимаемые с антенн, усиливаются в предварительном усилителе и через линии связи поступают на оконечные усилители, находящиеся в помещении. После дополнительного усиления сигналы оцифровываются с помощью 14-разрядных аналого-цифровых преобразователей типа E-440 и вводятся в персональный компьютер.

Обычно реализации сигналов записываются в синоптическом режиме (периодически) с временным разрешением 10 мкс или, соответственно, с частотой 100 кГц/канал. Следовательно, цифровой спектральный анализ может быть проведен в частотной полосе до 50 кГц, хотя приемные тракты имеют частотную характеристику с ослаблением сигнала на частотах выше 10 кГц.

Также используется мобильный приемный комплекс, регистрирующий, как правило, одну (электрическую) компоненту электромагнитного поля. С помощью такого комплекса были произведены записи сигналов с ранее неизвестными резонансными проявлениями в окрестности п. Батагай.

Для получения статистических характеристик резонансных проявлений в грозовых сигналах проведен спектральный анализ и анализ волновых форм сигналов, зарегистрированных в 2014 г. Спектральный анализ осуществлялся с использованием программного продукта Sonic Visualiser или Sound Forge. По полученным спектрограммам выделялись резонансные проявления в сигналах с определением возможных критических частот.

Результаты

Наиболее известным и наиболее изученным типом ОНЧ сигнала, в котором проявляются резонансные свойства волновода «земля–ионосфера», является атмосферик с низкочастотным «хвостом» («твиком»). Пример записи волновой формы данного сигнала, зарегистрированного в г. Якутске на полигоне ИКФИА, представлен на рис. 1, а. Твик, начавшийся на 7887 мс от начала записи, на рисунке выражен в виде квазипериодических затухающих колебаний длительностью около 50 мс. На 17 мс от начала твика наложился второй, существенно более слабый твик.

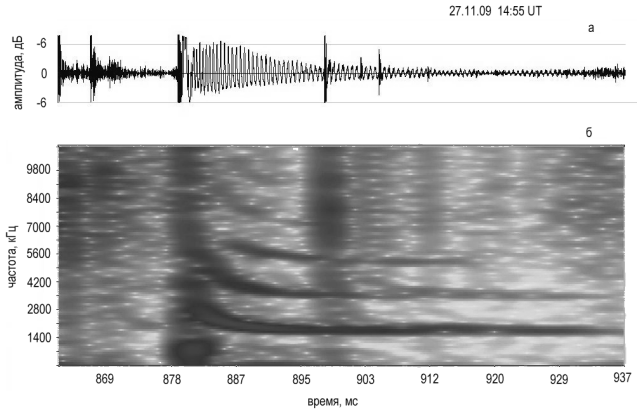

Рис.1. Пример записи волновой формы (а) и спектра (б) твика, записанного 27.11.09

Атмосферики, вызвавшие твики, представлены в виде вертикальных линий из-за недостаточной временной развертки. Спектрограмма данного твика представлена на рис. 1, б. Твик содержит 5 гармоник основной частоты 1,7 кГц (критической частоты поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера»). Спектр атмосферика на частотах ниже критической частоты имеет затухание. На спектрограмме также виден более слабый атмосферик, твик которого наложился на первый твик.

В ходе анализа спектрограмм выявлены различные резонансные проявления в сигналах на частотах ниже поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера», такие как: «колена» с дисперсией, «полосы» излучения и сигналы с верхней частотной отсечкой (рис. 2, а).

На рис. 2, б представлены «недоразвитые твики» – по сути это часть «твика» вследствие того, что «твик» испытал сильное затухание в процессе распространения в волноводе. На рис. 2, а атмосферики вызвали полные твики. Эти же атмосферики имеют другой тип резонансных проявлений в виде «колен», сформированных дисперсией сигналов в области частот 805 Гц и 405 Гц. Так же присуствует резонансное проявление в виде «полосы» на частоте 570 Гц,

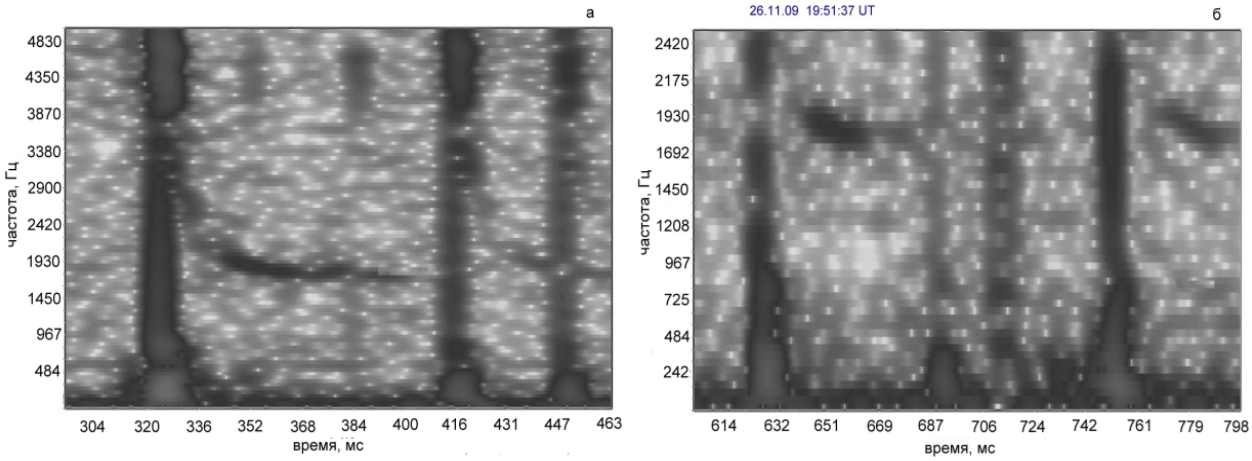

Рис.2. Различные виды резонансных проявлений в грозовых сигналах на частотах ниже поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера».

которая также выражена на рис. 2, б. Частота полосы соответствует частоте «среза» и центральной частоте «колена».

Такие резонансные проявления указывают, что кроме известных на данный момент резонансных характеристик волновода «земля–ионосфера» имеются и другие резонансные структуры, проявляющиеся в ОНЧ сигналах.

Кроме рассмотренных резонансных проявлений в КНЧ сигналах (f < 3 кГц) в виде «твиков», «колен», «полос» были также выявлены квазипериодические резонансные сигналы. Эти сигналы обнаружены в записях КНЧ–ОНЧ сигналов, сделанных в августе 2008 г. Эпизодические записи электромагнитных сигналов грозовых разрядов осуществлялись в период 21–23.08.08 в Верхоянье, недалеко от п. Батагай в основном в часы максимальной грозовой активности. Запись производилась с электрической антенны высотой 10 м через усилитель на компьютер с частотой оцифровки 62,5 кГц. Условия записи были благоприятны с точки зрения отсутствия каких-либо сетевых и промышленных помех. Наблюдения проводились на высотах ~ 450 м над уровнем моря.

На записи, сделанной 23.08.08 в 10:22 UT (рис. 3, а), мы видим примеры квазипериодических КНЧ излучений на 200 мс, на 700 мс и в интервале 1200–1600 мс от начала записи. Более детально последний случай приведен на рис. 3, б. По спектрограмме записи видно, что квазипериодические КНЧ излучения в виде «полос» содержат гармоники (до 5-й гармоники). По спектру на рис. 5 видно, что основная гармоника приходится на частоту 145 Гц, что в волновой форме соответствует периоду 7 мс. Из одного из определений добротности, основанном на отношении центральной частоты (резонансная частота) к полосе излучения, она составила около 10 мс.

В приведенном примере возбуждение квазипериодических резонансных излучений происходило двумя способами: в виде ударного возбуждения (первые два события: 200 мс, 700 мс) и в виде длительных колебаний (третье событие). При этом и гашение длительных колебаний произошло в момент КНЧ импульсов. Таким образом, возбуждение некого резонанса могло вызываться КНЧ атмосфериком и заканчиваться (гаситься) таким же сигналом.

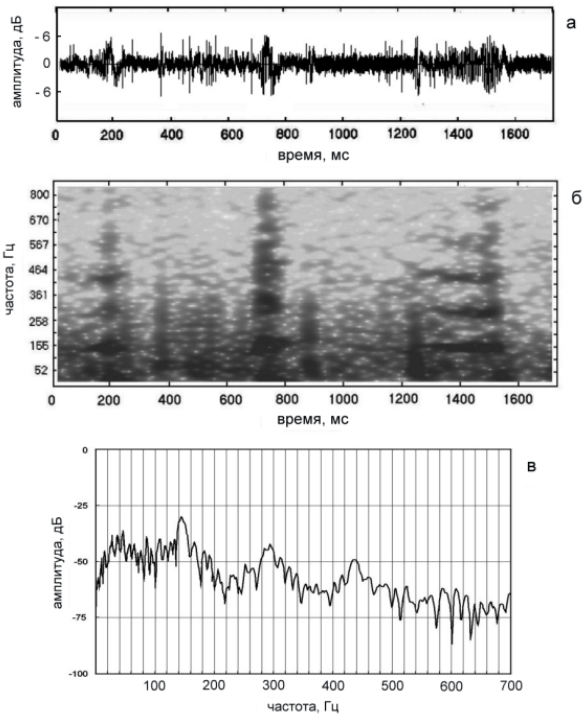

Рис. 3. Примеры квазипериодических КНЧ излучений, зарегистрированных 23.08.08 в 10:22 UT: на 200 мс, на 700 мс и в интервале 1200–1600 мс от начала записи (а). На спектрах (б, в) – основная резонансная частота около 145 Гц.

Пример резонансных проявлений, приведенный на рис. 4 для события 22.08.08 в 23:27 UT, примечателен тем, что квазипериодические излучения, начинающиеся с КНЧ атмосферика (все гармоники), в явном виде тесно связаны с другим типом резонансного проявления типа «колена» – с сигналами с дисперсией. Так же видны импульсные сигналы с верхним частотным срезом, соответствующим основной гармонике.

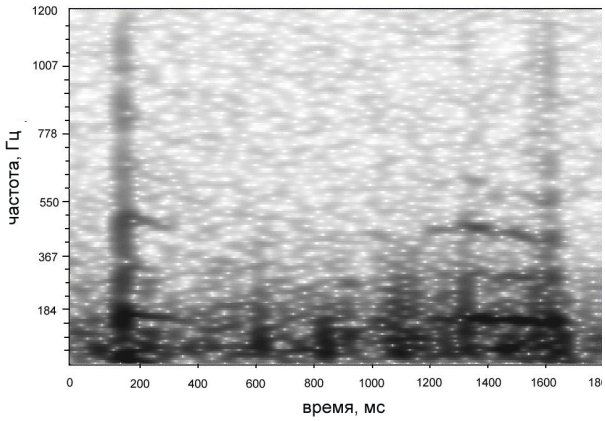

Рис.4. Пример излучений с соответствием частот у различных типов резонансных проявлений

Для получения статистических характеристик резонансных проявлений в виде излучений с «верхним частотным срезом» были выборочно проанализированы записи сигналов в течение 22 дней за лето 2014 г. с повышенной грозовой активностью в интервале с 11:00 до 21:00 UT, что соответствует интервалу от 20:00 до 06:00 ч по местному времени (ночное время).

Использованы спектрограммы, пример которых приведен на рис. 5, а (запись сигнала длительностью 10 с произведена 10 июня 2014 г. в 15:00 UT). Кружком отмечен сигнал с верхним частотным срезом. Статистический анализ таких резонансных проявлений показал, что вероятность их наблюдения составляет менее 1% от числа атмосфериков.

Для определения резонансных (критических) частот возможных волноводов, определяемых по сигналам с частотным срезом, построено их частотное распределение, представленное на рис. 5, б. В диапазоне до критической частоты волновода «земля–ионосфера» максимальная вероятность наблюдения данных сигналов приходится на сигналы с верхней частотой около 700 Гц. По-видимому, в распределении можно выделить еще и низкочастотный максимум (550–600 Гц). Погрешность, которая составляет ~50 Гц, не столь значительно влияет на распределение при таком диапазоне предполагаемых резонансных частот. Отсутствие выраженного

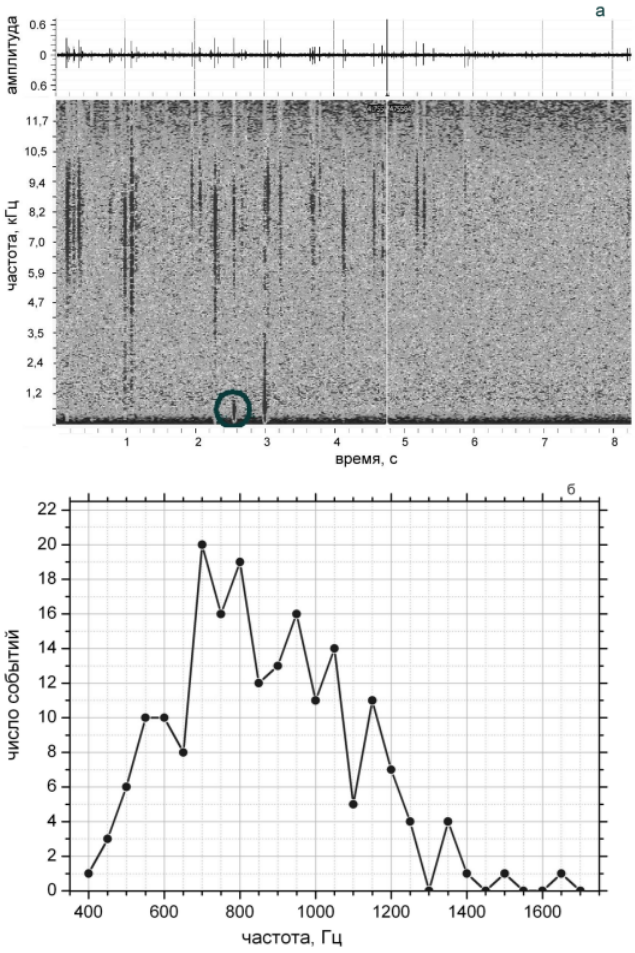

Рис. 5. Пример излучений с «верхним частотным срезом» (а) и распределение вероятности их наблюдения в зависимости от частоты (б)

(узкого) диапазона резонансных частот говорит о том, что если это единственный волновод, то стенки этого волновода подвижны от случая к случаю.

Обсуждение

Как отмечено на рис. 2–4, сигналы с верхней частотной отсечкой имеют ту же верхнюю частоту, что и «колена», и «полосы». Данный факт представляется важным с точки зрения природы этой отсечки. Известно, что при распространении сигналов в волноводе «земля–ионосфера» в их спектре на больших расстояниях от источника формируется глубокий провал в окрестности критической частоты 1,7 кГц. Верхняя граница низкочастотного края этого провала на спектре выглядит именно как у сигналов с верхней частотной отсечкой. Однако совпадение частот верхней отсечки с частотами колена, причем «одномоментно», а также отсутствие (или почти полное отсутствие) верхней, высокочастотной, части у многих сигналов указывают, что сигналы с верхней частотной отсечкой имеют, по-

видимому, еще и другие причины формирования этой отсечки – резонансы, отличные от поперечного резонанса волновода «земля–ионосфера». Это позволяет рассматривать по крайней мере часть таких сигналов как одно из резонансных проявлений наравне с «коленами» и «полосами».

Проявление некоторых резонансов можно было бы объяснить резонансом в волноводе, сформированным горными системами в Якутии (Верхоянский хребет и хребет Черского, рис. 6, а). Возможность такого резонанса рассмотрена в работе [11]. Однако предполагаемые критические частоты этой системы лежат в пределах 280–320 Гц (расстояния между горными системами, соответствующие половине длины волны, равны 470–530 км), что ниже частот полученного распределения (> 400 Гц) и, наоборот, выше

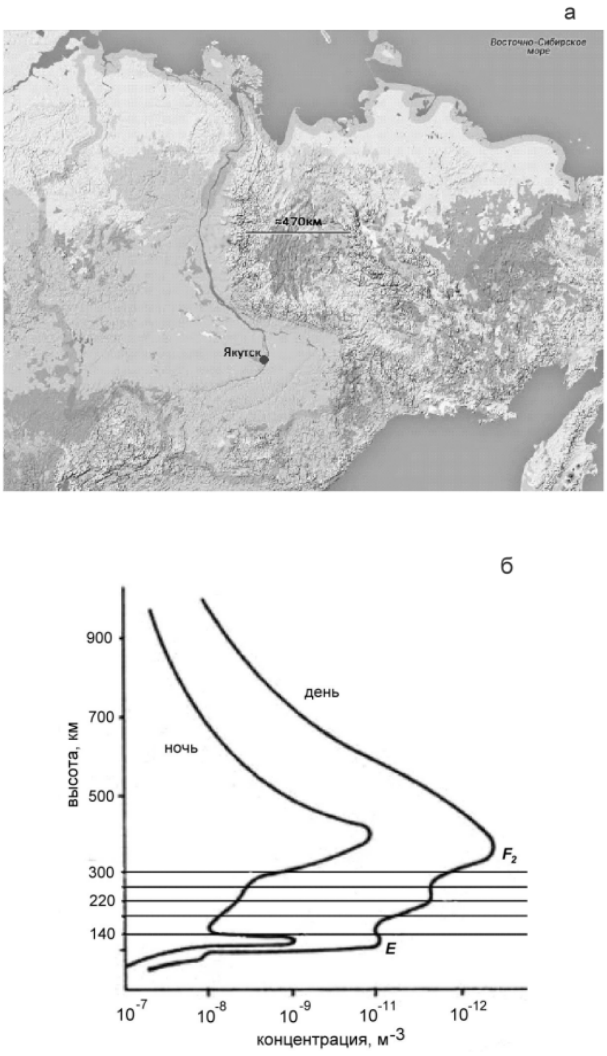

Рис. 6. Возможные размеры волновода, сформированного горными системами в Якутии (а), и возможного волновода, образованного слоями ионосферы (б)

резонансной частоты колебаний, зарегистрированных в августе 2008 г. в окрестности п. Батагай. При этом стенки такого волновода неподвижны и во всех случаях резонансные эффекты должны были бы наблюдаться на одних и тех же частотах. Следовательно, можно полагать, что наблюдаемые резонансные проявления в сигналах являются следствием переменных структур. К числу таких структур можно отнести, например, слои в ионосфере, между которыми возможно образование волноводов.

Предполагается, что волны проникают в ионосферу и могут захватываться возможными волноводами, образованными слоями ионосферы. Принимая во внимание, что коэффициент преломления в ионосфере (ночью) для сигналов КНЧ диапазона порядка 10 [5], длина волны в возможном волноводе во столько же раз меньше. Тогда высота волновода для критической частоты 700 Гц должна быть порядка 21,4 км, а для частоты 145 Гц – 103,4 км.

Для профиля электронной концентрации в ионосфере, приведенного для примера на рис. 6, б, видно, что в ночное время (левый профиль) существование волновода возможно на высотах 140–300 км (повышенная концентрация на границах указанного диапазона высот, которая служит стенками возможного волновода). Верхняя стенка волновода изменяется с высотой по сравнению с нижней стенкой (на 140 км), что может быть одной из причин, объясняющей широкий диапазон возможных критических частот. Следует так же учесть, что с изменением электронной концентрации в течение ночи меняется и резонансная частота. Оценочные размеры волновода в интервале 20 км и 105 км вполне соответствуют интервалу возможных размеров (от 140 км до 300 км).

Выводы

На основе экспериментальных данных наблюдений низкочастотных радиоизлучений, полученных в окрестностях г. Якутска и п. Батагая, рассмотрены резонансные эффекты в сигналах: «колена» с дисперсией, «полосы», сигналы с верхней частотной отсечкой. Эффекты имеют частоты, лежащие ниже критической частоты поперечного резонанса «земля–ионосфера» (1,7 кГц).

Особо выделяются «полосы» (в виде длительных квазипериодических излучений), зарегистрированные, в основном, в окрестности п. Батагая, основная резонансная частота которых составляет около 145 Гц, добротность колебаний – около 10 Гц.

Распределение возможных критических частот по сигналам с верхним частотным «срезом» пока-

зывает, что диапазон частот широк и максимум событий приходится на интервал 700–800 Гц.

По результатам работы сделан вывод о существовании пока не рассматриваемых волноводов, при распространении в которых проявляются указанные резонансные эффекты в сигналах. В качестве возможного волновода предлагается волновод, образованный между слоями ионосферы в ночное время суток.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-45-05005-р_восток_а.

Литература

1. *Александров М.С.* Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ и НЧ-диапазонов и их источников // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №10. – С. 3–25.

2. *Едемский Д.Е., Рябов Б.С., Тараненко С.С. и др.* Особенности распространения и структура поля твиков // Препринт № 46 (800). – М., 1988.

3. *Муллаяров В.А., Абзалетдинова Л.М., Аргунов В.В., Корсаков А.А.* Вариации параметров грозовых электромагнитных сигналов на трассах, проходящих над областями землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 6. – С. 841–851.

4. *Clilverd M.A., Nunn D., Lev-Tov S.J. et al.* Determining the size of lightning-induced electron precipitation patches // J. Geophys. Res. – 2002. – V. 107, No. A8. – P. SIA 10-1–SIA 10-11.

5. *Cummer S.A. and Inan U.S.* Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations // Radio Sci. – 2000. – V. 35, №2. – P. 385–394.

6. *McRae W.M., Thomson N.R.* Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations // J.Atmos. and Solar-Terr. Phys. – 2004. – V. 66. – P. 77–87.

7. *Mullayarov V.A., Kozlov V.I., Toropov A.A., Karimov R.R.* Some Results of Observations of Positive Lightning Discharges and Relative Phenomena in the East of Siberia // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2010. – V. 72. – Issue 5–6. – P. 409–418.

8. *Mullayarov V.A., Argunov V.V., Abzaletdinova L.M. and Kozlov V.I.* Ionospheric effects of earthquakes in Japan in March 2011 obtained from observations of lightning electromagnetic radio signals // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12, 3181–3190, 2012, doi:10.5194/nhess-12-3181-2012.

9. *Shvets A.V., Hayakawa M., Molchanov O.A.* Subionospheric VLF monitoring for earthquake-related ionospheric perturbations // J. Atmos. Electr. – 2002. – V. 22. – P. 87–99.

10. *Soloviev O.V., Hayakawa M., Ivanov V.I., Molchanov O.A.* Seismo-electromagnetic phenomenon in the atmosphere in terms of 3D subionospheric radio wave propagation problem // Phys. Chem. Earth. – 2004. – V. 29. – P. 639–647.

11. *Wait J.R.* On VLF radio wave reflection from distant mountain ranges – theory // J. Atmos. and Terr. Phys. – 1992. – V. 54, №2. – P. 193–196.

12. www.wwlln.net.

Поступила в редакцию 30.07.2015

УДК 550.34

Новая карта сейсмотектоники Восточной Сибири: принципы и методы построения

В.С. Имаев[*], Л.П. Имаева[*], Н.Н. Гриб[**], И.И. Колодезников[***]

[*]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск
[**]Технический институт (ф) Северо-Восточного федерального университета, г. Нерюнгри
[***]Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

Карта сейсмотектоники Восточной Сибири представляет собой первую попытку объединения разнообразных геолого-геофизических данных, которые характеризуют связь проявлений сейсмичности и тектоники изучаемого регионов Алтая, Тувы, Бурятии и Республики Саха(Якутия). Основными научными достижениями составленной карты являются: структурно-кинематическая идентифи-

[*]ИМАЕВ Валерий Сулейманович – д.г.-м.н., проф., акад. АН РС(Я), г.н.с., imaev@crust.irk.ru; [*]ИМАЕВА Людмила Петровна – к.г.-м.н., с.н.с., imaeva@crust.irk.ru; [**]ГРИБ Николай Николаевич – д.т.н., проф., акад. АН РС(Я), зам. директора по научной работе, nfygu@mail.ru; [***]КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н, проф., акад. АН РС (Я), президент, anrsya@mail.ru.