

УДК 537.862

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНОМ КОНТУРЕ

© 2011 г. В. П. Сивоконь

Учреждение РАН Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Камчатский край
e-mail: vsivokon@mail.ru

Поступила в редакцию 17.02.2010 г.
После доработки 24.09.2010 г.

Предложен метод наблюдения электромагнитных колебаний в диапазоне геомагнитных пульсаций, основанный на регистрации вариаций электроджета в полосе КНЧ-ОНЧ шипений, модулированных этими электромагнитными колебаниями. Наблюдения за естественными шумами в электрических сетях Камчатки позволили обнаружить электромагнитные колебания в диапазоне частот $(35-67) \times 10^{-3}$ Гц. Показано, что эти колебания возможны в ионосферно-магнитосферном колебательном контуре, образуемом силовыми магнитными трубками (индуктивность) и участком электроджет–Земля (емкость).

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании селективного поляризационного возбуждения характеристических волн в ионосфере [Сивоконь и др., 2004; 2005] была установлена зависимость степени подавления одной из магнитных компонент от состояния магнитного поля Земли [Сивоконь и Дружин, 2006]. Изучение литературы, в которой рассматриваются вопросы вариаций магнитного поля Земли, таких авторов как Троицкая В.А. и Гульельми А.В., дало возможность понять нюансы механизма селективного поляризационного возбуждения, но и одновременно послужило поводом для размышлений. Так в первых работах [Троицкая, 1953], автор применяет словосочетание “электромагнитное поле Земли”. В более поздних публикациях появляется термин “пульсации магнитного поля Земли” [Троицкая, 1964], который, в конечном счете, переходит в “геомагнитные пульсации” [Троицкая и Гульельми, 1969].

Такая трансформация логична, поскольку фактически исследовались вариации магнитного поля Земли, но не электромагнитного поля в привычном понимании этого термина. Так в работе [Троицкая и Большакова, 1969] “рассматриваются все типы регулярных и иррегулярных колебаний электромагнитного поля Земли в цикле солнечной активности”. Но при этом “исследования проводились по записям магнитного поля и земных токов на ст. Борок...”. Изменение в терминологии объясняется достаточно просто, если учесть частоту пульсаций. В соответствии с общепринятой классификацией геомагнитных пульсаций [Троицкая, 1964] период, например, $Pc3$ составляет 10–45 секунд, частота 0.1–0.022 Гц, а длина волны $(3-13.5) \times 10^6$ км. При такой длине волны непосредственная регистрация электромагнитных колебаний представляет трудно разрешимую

задачу и, следовательно, в этих целях необходимо использование методов, учитывающих особенности генерации пульсаций.

В основу современных представлений о механизме генерации пульсаций положен принцип проточного циклотронного мазера [Трахтенгерц и др., 1986]. Известно [Семенов, 1973], что длина открытого резонатора, каковым в данном случае является магнитная силовая трубка, содержащая волокно повышенной концентрации плазмы, должна быть больше или сопоставима с длиной волны генерируемого излучения. Расчеты показали, рис. 1, что такое требование выполняется только для пульсаций $Pc1$.

Один из авторов работы [Трахтенгерц и др., 1986] позднее [Трахтенгерц и Демехов, 2002] указывает на это же обстоятельство при объяснении динамиче-

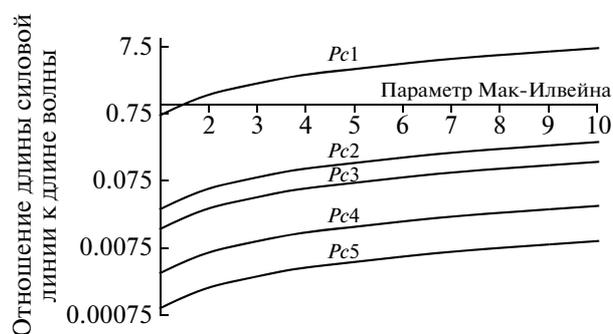


Рис. 1. Величина отношения длины силовой линии к длине волны геомагнитных пульсаций $Pc1-Pc5$ для разных значений параметра Мак-Илвейна.

ских спектров геомагнитных пульсаций $Pc1$ на основе автоколебательного режима генерации в протонном лазере. Анализ ситуации показывает, что генезис более низкочастотных, чем $Pc1$ пульсаций, можно объяснить на основе ионосферно-магнитосферного контура, в котором роль индуктивности играют силовые трубки, а емкости, соответственно, участок электроджет — Земля. Использование индуктивности для оценки переходных процессов в эквивалентной токовой ионосферно-магнитосферной системе применялось ранее в работах [Мальцев и др., 1975; Пономарев, 1985]. В разработанном подходе автору для получения колебательного контура оставалось учесть наличие емкости электроджет-Земля.

В основу метода наблюдения за процессами в ионосферно-магнитосферном контуре были положены следующие соображения:

1. Поскольку частота колебаний в таком контуре очень мала и непосредственные их измерения вызывают технические трудности, необходимо использовать косвенные методы, такие, как регистрация модуляции этими колебаниями более высокочастотных излучений. На такую возможность в частности указывается в работе [Молчанов и др., 1979].

2. После оценки возможных носителей модуляции, предпочтение было отдано КНЧ-ОНЧ шипениям, поскольку [Молчанов, 1985] они практически постоянно наблюдаются в полярной магнитосфере. Диапазон частот шипений простирается от нескольких сотен герц до десятков килогерц. Вариации амплитуды излучения часто совпадают с изменениями потоков высыпающихся электронов. Имеющаяся связь интенсивности излучения с потоком высыпающихся электронов послужила дополнительным аргументом, поскольку предполагалось, что спусковым механизмом переходного процесса в ионосферно-магнитосферном контуре может быть высыпание энергичных частиц из радиационных поясов Земли. При выборе диапазона частот наблюдения 2–4 кГц исходили из закономерности выявленной при анализе данных приведенных в работе [Siren, 1975]: при сравнении степени коррелированности вариаций шипений и геомагнитных пульсаций оказалось, что в этой полосе частот корреляция достигает значения 0.75.

3. В качестве инструмента наблюдения было выбрано устройство, имеющее индуктивную связь с электроджетом, в котором, как предполагает автор статьи, присутствуют искомые колебания и в нем должна происходить модуляция этими колебаниями шипений.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве “приемных устройств” вариаций токовой структуры электроджета используются линии электропередач. Известно природное явление, ко-

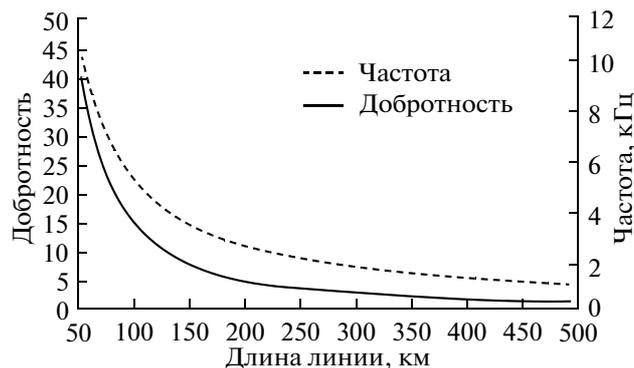


Рис. 2. Зависимости величин добротности и резонансной частоты линии электропередачи в зависимости от ее длины.

торое воздействует на линии электропередач, линии связи, газо и нефтепроводы — это геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ). Протекающий в ионосфере электроджет наводит в проводниках токи, которые при возмущении магнитного поля Земли резко увеличиваются. В электроэнергетике наиболее известен случай выхода из строя 13 марта 1998 года системы электроснабжения провинции Квебек (Канада). Геомагнитно-индуцированные токи имеют малую частоту $f < 1$ Гц, что при протекании их через обмотки трансформаторов приводит к подмагничиванию магнитопроводов, и переходу их в нелинейный режим с образованием гармоник. В свою очередь, гармоники приводят к локальному перегреву, нарушению изоляции, пробою и выходу из строя трансформаторов. В результате воздействия ГИТ система бездействовала в течение 9 часов, а последствия аварии устраняли несколько недель.

Анализ ситуации, повлекшей катастрофические последствия в Канаде, показал достаточную восприимчивость линий электропередачи к процессам, происходящим в электроджете. При моделировании событий в Квебеке [Pirjola and Viljanen, 1998; Boteler et al., 2000] показано, что при токе электроджета в миллион ампер напряженность электрического поля, создаваемого им, составляет от нескольких сотен до тысяч милливольт на километр. В обычных условиях эта величина будет намного меньше и для того, чтобы зафиксировать вариации токовой структуры электроджета, необходима определенная длина линии.

Линии электропередач имеют емкость, индуктивность и сопротивление, т.е. они обладают резонансными свойствами. Логично использовать это свойство для повышения восприимчивости вариаций электроджета. Результаты расчета этих свойств — добротности $Q = \sqrt{L}/R\sqrt{C}$ и резонансной частоты показаны на рис. 2.

Из рисунка видно, что при увеличении длины линии электропередачи ее добротность падает. Сле-

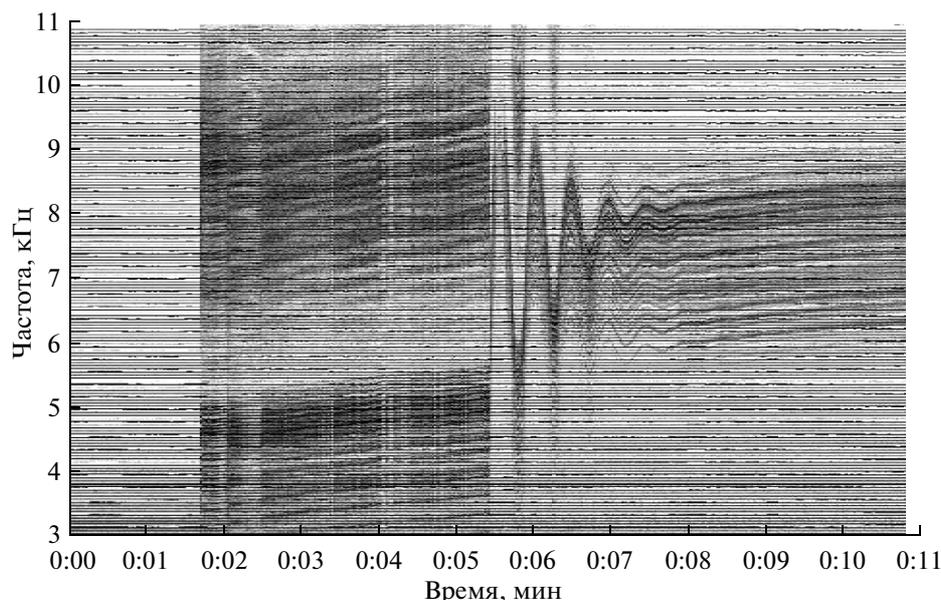


Рис. 3. Спектрограмма возмущения. Уменьшение спектральной плотности возмущения в полосе 5–6 кГц обусловлено резонансными свойствами регистрирующей системы.

довательно, увеличение длины линии, как средства повышения их чувствительности на воздействие электроджета, непродуктивно. Но и уменьшение длины тоже ограничено, поскольку при этом резонансная частота линии становится больше определенного нами диапазона частот шипений. Таким образом, компромиссной является длина линии в районе 100 километров. При этом резонансная частота равна ≈ 3 килогерц, а добротность составляет ≈ 20 .

Исходя из конфигурации и протяженности линий электропередач Камчатки, в ней имеются линии, подходящие под вышеприведенные параметры. К ним относится линия электропередачи на Мутновскую ГеоТЭЦ протяженностью около 100 километров, которая проходит в непосредственной близости от места организации наблюдений. Она и используется в качестве «приемного устройства».

Для записи и анализа шумов используется компьютер, в котором одновременно работают две программы. Одна программа с частотой дискретизации 12 кГц делает контрольную запись большой протяженности, до суток. Вторая записывает с частотой дискретизации 44 кГц, пакетами по 20 минут. При обнаружении аномальных явлений в первой записи, с ограниченной полосой, анализ проводится по второй записи с полосой до 22 кГц.

В ходе наблюдений были обнаружены возмущения, характеризующиеся внезапным повышением уровня шума в полосе от 2 кГц до 19 кГц. Возмущения в разные дни наблюдений существенно отличаются по уровню и для анализа использованы те записи, в которых спектральная структура непрерывна и ее параметры можно с достаточной точностью

идентифицировать. В качестве примера на рис. 3 приводится запись 1 ноября 2008 года 21.00 UT в полосе частот 3–11 кГц.

Разбиение диапазона 2–19 кГц на полосы обусловлено неравномерностью уровня возмущения. По интенсивности выделяются две полосы частот $\approx 2\div 6$ кГц и $\approx 7\div 11$ кГц. Внутри этих полос имеется дискретный ряд возмущений, которые изменяются по частоте, в разных наблюдениях со скоростью от 1.5 до 4.7 Гц/с. Плавное изменение параметров возмущения на определенном этапе скачком переходит в колебательную стадию. Этап, предваряющий колебательный процесс, составляет несколько минут, и в разных наблюдениях колеблется от 1 до 3 минут. Колебательный процесс характеризуется периодом, который изменяется в пределах от 15 до 29 секунд, что соответствует частоте $(35\div 67) \times 10^{-3}$ Гц. В результате обработки наблюдений получено среднее значение периода и частоты, соответственно 26 секунд и 38×10^{-3} Гц. Декремент затухания колебательного процесса составляет несколько минут. При этом само возмущение по времени длится от десятка минут до получаса. Его длительность определяется развитостью колебательного процесса. Чем больше длительность колебательного процесса, тем меньше время наблюдения возмущения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С момента обнаружения аномальных возмущений рассматривалась возможность их генезиса, как результата внутренних процессов, происходящих в системе электроснабжения. С этой целью, в мае–

июне 2008 года, производилась сверка времени наблюдения возмущений с оперативными переключениями и авариями в электросетях. Никакой взаимосвязи при этом обнаружено не было. Поскольку в электросетях Камчатки используется несколько генераторов, проверялась версия появления наблюдаемых возмущений, как результата синхронизации источников электрической энергии. Но и в этом случае был получен отрицательный результат.

При представлении спектрограммы в другом виде, рис. 4, видно, что уровень гармоник сети не меняется.

Меняется уровень шума, а возмущение носит волнообразный характер, перемещающийся по частоте. Наблюдения за авариями в сети показали кратковременное изменение частоты сети и ее гармоник в момент аварии или оперативного переключения, что, наряду со сверками, описанными выше, делает маловероятным происхождение возмущения внутри сети. С другой стороны, в возмущении есть этап с выраженным колебательным процессом, и частота такого колебания в большинстве случаев равна 38 мГц. Если это колебательный процесс внутри электросети, то ее распределенные параметры, емкость и индуктивность, должны соответствовать этой частоте. Расчеты, проведенные на основе погонных параметров линии ($L = 4.12 \times 10^{-3}$ Гн/км, $C = 7.75 \times 10^{-9}$ Ф/км, $R = 0.39$ Ом/км), показали невозможность развития колебаний этой частоты в контуре, образуемой линией.

С конца октября 2008 года, когда была обоснована непричастность внутренних процессов в электрических сетях, начались непрерывные наблюдения за возмущениями. Результаты этих наблюдений в 2008 году приведены на рис. 5.

Из рисунка видно, что время наблюдения носит сезонный характер и проявляется в основном (время мировое) утром в весенне-летний период и вечером в осенне-зимний период. Если рассмотреть существующие модели электроджета, то станет ясно, что такая сезонность присуща именно ему. При этом временной ход максимальной интенсивности электроструи [Клименко и др., 2008], который хорошо коррелирует с проявлениями наблюдаемых нами возмущений свойственен восточному электроджету.

При моделировании электроджета его рассматривают как токовую структуру, существующую в ионосфере и имеющую индуктивную связь с токами в Земле [Мальцев и др., 1975; Пономарёв, 1985; Boteler et al., 2000]. При этом не учитывается то обстоятельство, что две проводящие поверхности (электроджет–Земля) образуют емкость. С учетом этого обстоятельства можно рассматривать систему магнитосфера–ионосфера как колебательный контур, в котором силовые трубки образуют индуктивность, а электроджет–Земля – емкость. Какими параметрами обладает этот контур и возможны ли в нем колебания с частотой выявленных нами возмущений?

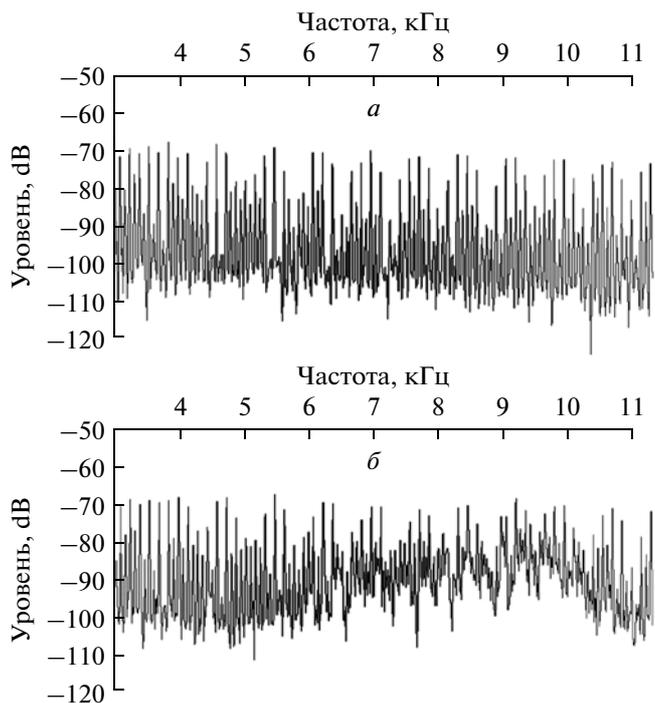


Рис. 4. Спектрограммы записей до возмущения (а) и в момент возмущения (б).

На спектрограмме рис. 3. видно, что колебательный процесс затухающий и, следовательно, по нему можно определить декремент затухания 152 сек, а затем рассчитать добротность контура, в котором развиваются эти колебания:

$$Q = \omega\tau/2 \approx 18.4,$$

где $\omega = 2\pi f$, $f = 38 \times 10^{-3}$ Гц.

Исходя из приведенных в работе [Boteler et al., 2000] оценочных величин активного сопротивления электроджета примем $R \approx 0.75$ Ом. Тогда для индуктивности

$$L = QR/\omega \approx 57 \text{ Гн}$$

и соответственно для емкости

$$C = 1/\omega^2 L \approx 0.3 \text{ Ф.}$$

Для оценки индуктивности силовых трубок используем выражение, полученное в работе [Ландау и Лифшиц, 1982] для индуктивности тонкого кольца из провода

$$L = 4\pi b \left(\ln \frac{8b}{a} - \frac{7}{4} \right),$$

где b – радиус кольца и a – радиус провода. В качестве радиуса силовой трубки a , как эквивалентного провода примем ларморовский радиус, который по данным [Хесс, 1972] составляет $5 \times 10^2 - 7 \times 10^3$ см. Расчеты с использованием приведенного выражения показаны на рис. 6.

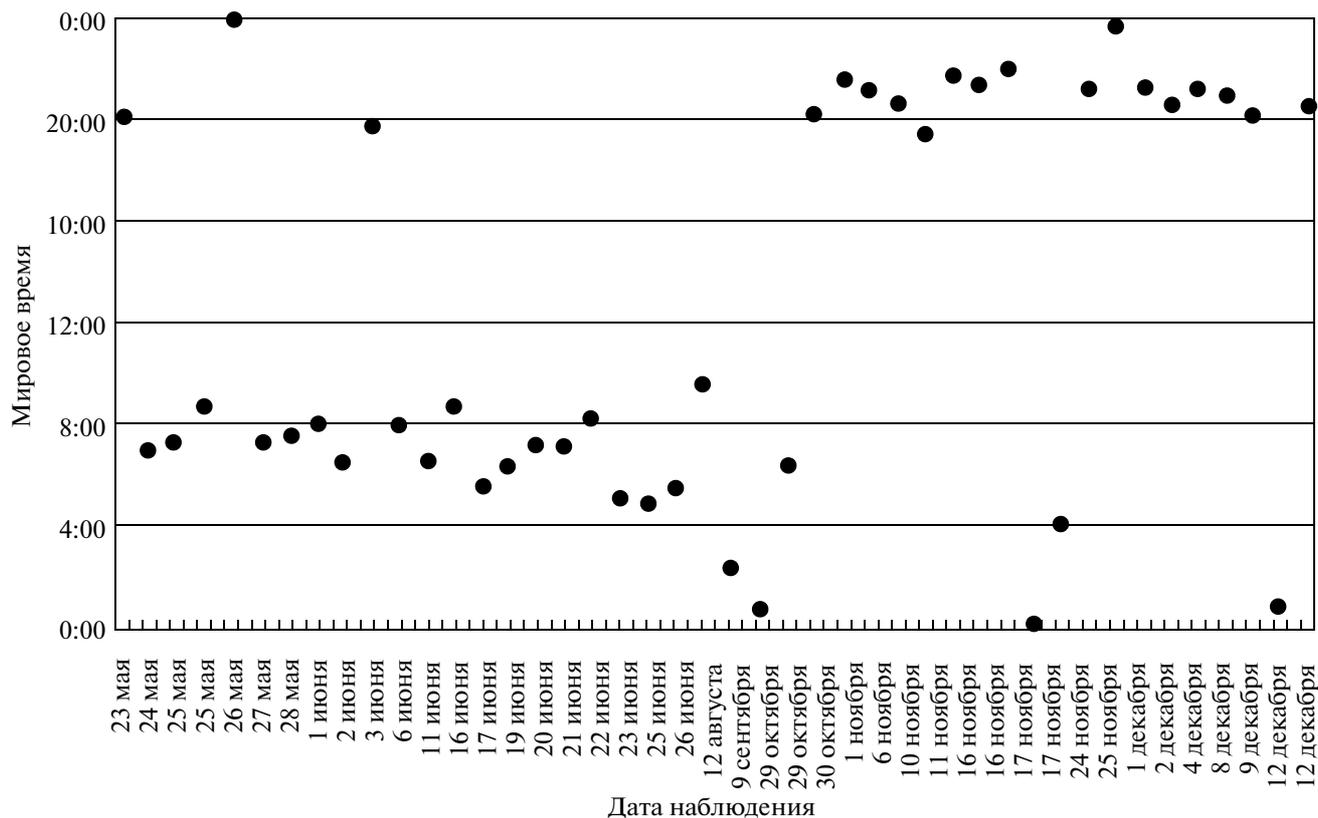


Рис. 5. Дата и время наблюдения возмущений в 2008 году.

По горизонтальной оси откладывается параметр магнитной оболочки, введенный Мак-Илвейном и равный отношению радиуса силовой линии на экваторе к радиусу Земли. Из рисунка видно, что величина индуктивности, полученной, исходя из параметров колебательного процесса, может быть реализована в силовых трубках внешнего радиационного пояса.

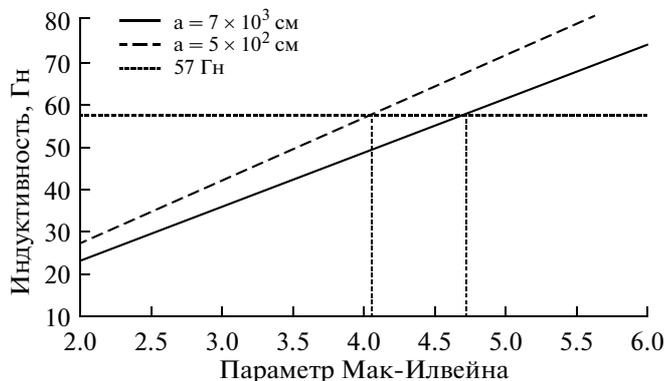


Рис. 6. Определение возможного интервала параметра Мак-Илвейна путем сопоставления величины индуктивности 57 Гн, полученной исходя из параметров возмущения и расчетной индуктивности силовых трубок для двух значений лармеровского радиуса.

С учетом вышеизложенного, эквивалентная схема взаимодействия магнитосферно-ионосферного контура и линии электропередачи представлена на рис. 7.

Из рисунка видно, что между контуром I электроджет–Земля, состоящим из элементов $C_{эл-3}$, $L_{эл}$, $R_{эл}$ и контуром II линия–земля $C_{л-3}$, $L_{л}$, $R_{л}$ существует индуктивная и емкостная связи ($C_{эл-л}$).

Из анализа спектрограммы, приведенной на рис. 3. следует, что на этапе предшествующему колебательному процессу в контуре II, происходит сужение полосы возмущения, что означает увеличение добротности в контуре II и связанном с ним контуре I. Колебательный процесс возможен при определенном соотношении активной и реактивной составляющей энергии в контуре I и очевидно, что он начинается тогда, когда добротность достаточно велика. Проанализируем условия, при которых возможно подобное развитие процесса.

Добротность контура и его резонансную частоту можно определить, исходя из известных выражений:

$$Q = \sqrt{L}/R\sqrt{C} \text{ и } f = 1/2\pi\sqrt{LC}.$$

Из этих соотношений следует, что одновременный рост частоты и добротности в контуре II возможен только в том случае, когда уменьшается емкость

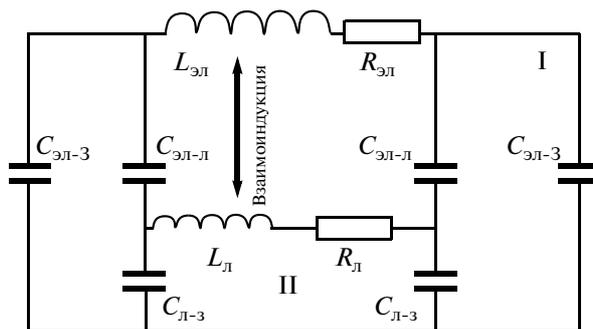


Рис. 7. Эквивалентная схема электрических цепей электроджета и линии электропередачи, где $C_{эл-3}$ — емкость электроджет-Земля; $C_{эл-л}$ — емкость электроджет—линия электропередачи; $C_{л-3}$ — емкость линия—Земля; $L_{эл}$ — индуктивность силовой трубки и электроджета; $L_{л}$ — индуктивность линии электропередачи, $R_{эл}$, $R_{л}$ — активное сопротивление электроджета и линии электропередачи.

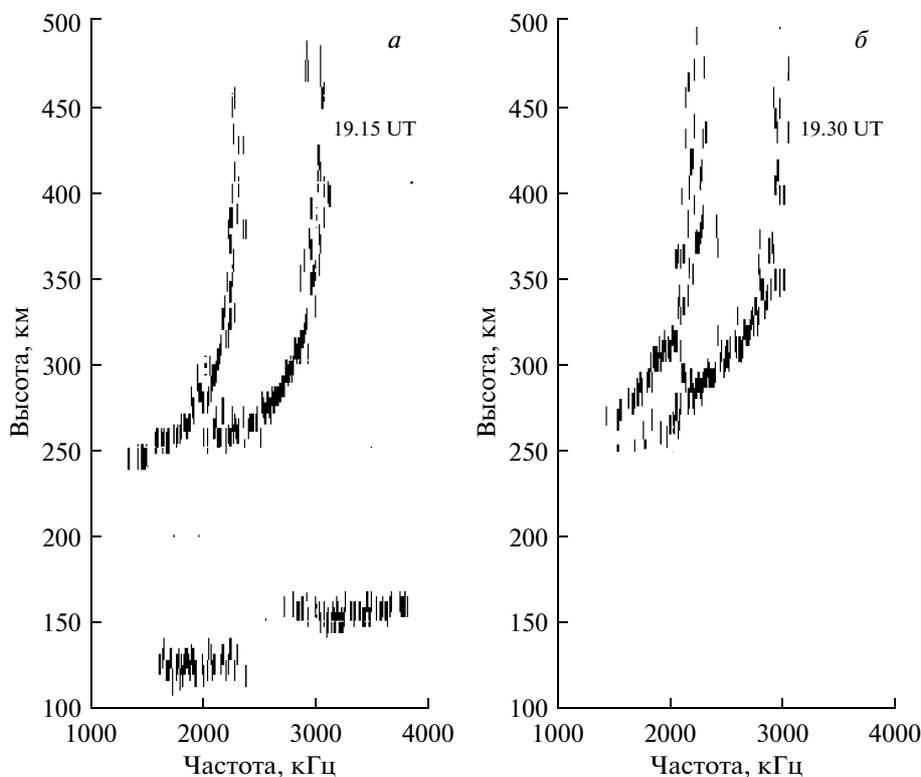


Рис. 8. Ионограммы станции Паратунка до возмущения (а) и после возмущения (б) 10 ноября 2008 года 19.21 UT.

контура. Если учесть, что $C_{эл-3} \gg C_{эл-л}$, в первом приближении можно считать, что $C_{эл-л}$ подключена параллельно $C_{л-3}$. Изменением $C_{эл-л}$ возможно объясняется одновременный рост частоты и добротности во втором контуре. При этом в контуре I наблюдается переходный токовый процесс в начале, которого в силу незначительности добротности он носит аperiодический характер. По мере роста добротности процесс переходит в периодический, с последую-

щей потерей энергии, уменьшением добротности и вырождением в аperiодический и исчезновением возмущения. Изменение добротности в первом контуре, скорее всего, связано с изменением проводимости электроджета.

Анализ ионосферных данных в ряде случаев показал интересное явление, подтверждающее эту версию, рис. 8 (начало возмущения в 19.21 UT, записи ионограмм станции ИКИР ДВО РАН “Паратунка”

произведены соответственно в 19.15 и 19.30 UT 10 ноября 2008 года).

В тех случаях, когда на ионограмме в начале возмущения присутствует отражение на уровне электроджета, после завершения возмущения наблюдается его исчезновение. Это свидетельствует о динамических процессах в плазме а, следовательно, и ее проводимости на высотах, где локализуется электроджет.

4. ВЫВОДЫ

Наблюдения за естественными шумами в электрической сети Камчатки позволили обнаружить аномальные возмущения в диапазоне частот 2–19 кГц. В структуре возмущений присутствует колебательный процесс с частотой $\approx 38 \times 10^{-3}$ Гц, обусловленный, вероятнее всего, вариациями токовой структуры электроджета. Сезонная зависимость времени регистрации возмущений служит дополнительным подтверждением этого предположения. Колебательные процессы вероятнее всего происходят в ионосферно-магнитосферном контуре, образованном индуктивностью силовых трубок магнитного поля Земли и емкостью электроджет–Земля.

Автор выражает признательность директору Пулковской обсерватории доктору физико-математических наук А.В. Степанову за предоставление материала способствовавшему появлению этой публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли. Динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 4. С. 485–494. 2006.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
- Мальцев Ю.П., Леонтьев С.В., Ляцкий В.Б. Индукционные электрические поля во время суббури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 15. № 3. С. 519–523. 1975.
- Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука, 1985.
- Молчанов О.А., Лизунов В.В., Щекотов А.Ю. Резонансное возбуждение колебаний ионосферных токов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 19. № 6. С. 1026–1032. 1979.
- Пономарёв Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. М.: Наука, 1985.
- Семенов Н.А. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1973.
- Сивоконь В.П., Дружин Г.И., Поддельский И.Н., Поддельский А.И., Аллакулиев Ю.Б., Тарасенко Д.В., Цуканов А.В., Шумилов Ю.С. Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // Электросвязь. № 8. С. 9–11. 2004.
- Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Геомагнитный фактор Dst-вариаций в селективном возбуждении ионосферных характеристических волн // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 46. № 4. С. 492–495. 2006.
- Сивоконь В.П., Дружин Г.И. Оценка замираний при излучении волн вращающейся поляризации в КВ диапазоне. // Электросвязь. № 10. С. 8–12. 2005.
- Трахтенгерц В.Ю., Демехов А.Г. Космические циклотронные мазеры // Радиофизика. Т. 44. № 1. С. 111–126. 2001.
- Трахтенгерц В.Ю., Тагиров В.Р., Черноус С.А. Проточный циклотронный мазер импульсные ОНЧ-излучения // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 26. № 1. С. 99–106. 1986.
- Троицкая В.А. Два колебательных режима электромагнитного поля Земли и их суточный ход по мировому времени / Докл. АН СССР. Нов. серия. Т. 93 (6). С. 261–264. 1953.
- Троицкая В.А. Классификация быстрых вариаций магнитного поля и земных токов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 4. № 3. С. 615–616. 1964.
- Троицкая В.А., Большакова О.В., Матвеева Э.Т., Щепетнов Р.В. Особенности возбуждения микропульсаций в цикле солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 9. С. 129–134. 1969.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физ. наук. Т. 97. С. 453–495. 1969.
- Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. М.: Атомиздат, 1972.
- Boteler D.H., Pirjola R., Trichtchenko L. On calculating the electric and magnetic fields produced in technological systems at the Earth's surface by a "wide" electrojet. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 62 (2000) 1311–1315.
- Pirjola R., Viljanen A. Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length // Ann. Geophysicae V. 16. P. 1434–1444. 1998.
- Siren J. Fast Hisslers in Substorms // J. Geophys. Res. V. 80. №. 1. P. 93–97. 1975.