

УДК 621.396.67.550.388

ВАРИАЦИИ ШУМОВ КВ ДИАПАЗОНА КАК РЕЗУЛЬТАТ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ

В.П. Сивоконь, с.н.с. ИКИР ДВО РАН, к.т.н.

Введение. Изменение свойств ионосферы под воздействием мощной радиоволны впервые было обнаружено в 1933 г. и известно как горьковско-люксембургский эффект. В 60-е годы прошлого века в нашей стране были начаты интенсивные исследования по модификации ионосферы, которые в 90-е годы были приостановлены. Существует несколько программ, в рамках которых в настоящее время изучается модификация и совершенствуется технология воздействия на ионосферу. Наиболее известная из них — HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program). Исследования по этой программе проводятся на Аляске, неподалеку от населенного пункта Гакон с географическими координатами 62°23'36" N, 148°08'03" W. Вблизи Фэрбэнкса (Аляска) проводятся эксперименты в рамках программы HIPAS (High Power Auroral Stimulation). В европейской части, в Тромсе (Норвегия), продолжительное время проводятся исследования по программе EISCAT (European Incoherent Scatter). На Шпицбергене начаты исследования по программе SPEAR (Space Plasma Exploration by Active Radar). Основной научной направленностью экспериментов в рамках этих программ является использование ионосферы как естественной плазменной лаборатории.

Все программы в качестве инструмента воздействия на ионосферу используют нагревные стэнды, в которых в качестве волны накачки применяют мощное электромагнитное излучение декаметрового диапазона. Эффективная мощность излучения достигает десятков мегаватт, а частотный диапазон излучения, например HAARP, составляет 2,8—10 МГц. Считается, что эксперименты по модификации ионосферы не приводят к загрязнению окружающей среды, поскольку не сопоставимы по мощности с естественными процессами, протекающими в ионосфере. Однако для средств связи декаметрового диапазона, учитывая мощность и диапазон излу-

чаемой волны, вопрос электромагнитной совместимости с данными экспериментами очевиден.

Технические средства и результаты наблюдений. Институтом космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН ведутся наблюдения за вариациями поляризационных и спектральных характеристик шумов в средней части КВ диапазона. Эксперименты проводятся с помощью модифицированного аппаратного комплекса [1], структурная схема которого показана на рис. 1. Для выделения характеристических волн используются две антенны эллиптической поляризации противоположного направления вращения. Первоначально антенны располагались на одной линии, перпендикулярной направлению север—юг. Сигналы от антенн противоположной поляризации поступают на устройство коммутации, содержащее четыре разветвителя и переключатель. Разветвители обеспечивают постоянство уровня сигналов, поступающих на входы радиоприемных устройств (РПУ) Р-697 при различных сочетаниях выходов антенн.

Устройство контроля и калибровки позволяет поддерживать одинаковый уровень сигнала от радиоприемных устройств, поскольку при измерениях автоматическая регулировка усиления РПУ отключена. Уровень сигнала от РПУ установлен, исходя из динамического диапазона звуковой карты компьютера. Эти специальные меры приняты для устранения влияния устройств комплекса на степень коррелированности сигналов, поступающих от антенн.

На первом этапе исследований установлено наличие эллиптической поляризации атмосферных помех и получены оценочные величины коэффициента поляризации [2]. Выявление эллиптической поляризации атмосферных помех позволило по-новому подойти к проблеме обнаружения и различения сигналов. В диапазоне коротких волн для уверенного приема сигнал должен быть значительно больше помехи. Обнаружить и классифицировать сигнал в случае, когда он по величине сопоставим с помехой можно за счет поляризационной селекции, что было использовано при проведении наблюдений.

В ходе наблюдения за спектральными и поляризационными характеристиками шумов декаметрового диапазона обнаружены явления, обусловленные воздействием на ионосферу мощным КВ излучением. 28 июля 2006 г. при записи, осуществляемой аппаратным комплексом, наблюдался процесс, показанный на рис. 2, б, запись обычных атмосферных помех представлена на рис. 2, а. Специфический вид огибающей и наличие релаксационных процессов позволяют сделать вывод о происхождении этого эффекта в результате воздействия на ионосферу мощного КВ излучения. Период релаксации ~2 с, по данным источника [3], характерен для слоя E ионосферы.

При изменении масштаба времени возмущения, представленного на рис. 2, оказалось, что в записи присутствуют импульсы, форма и временные параметры которых показаны на рис. 3. В нижней части рисунка ясно видно различие уровня магнитоионных компонент и их относительное запаздывание. Спектральный анализ записи показал наличие сигнала на частоте ~76 Гц, который можно видеть на рис. 4.

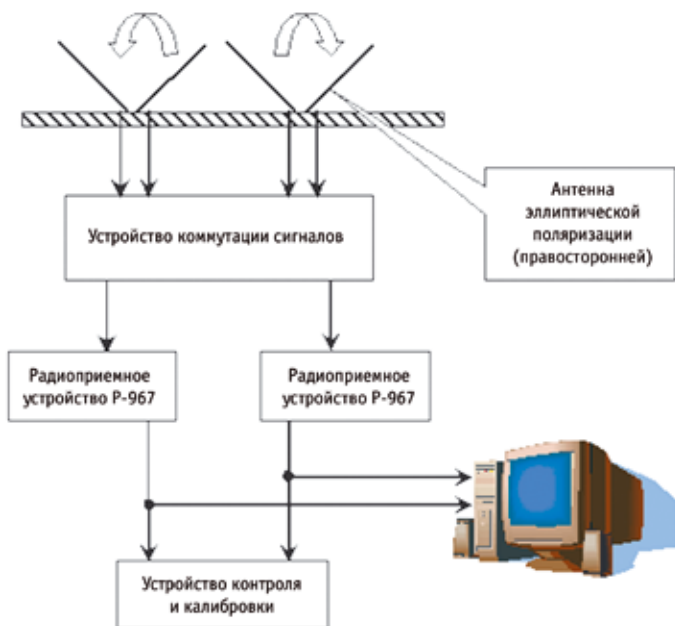


Рис. 1

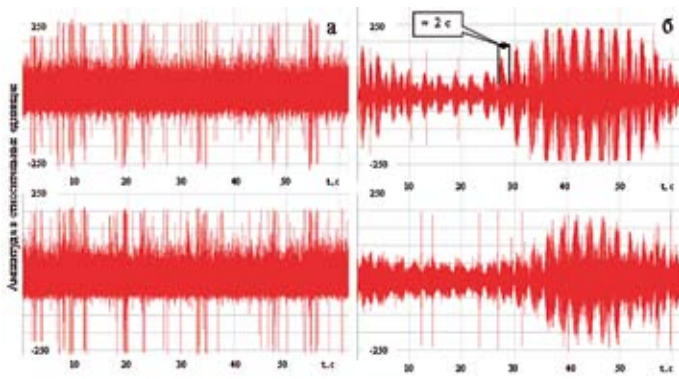


Рис. 2

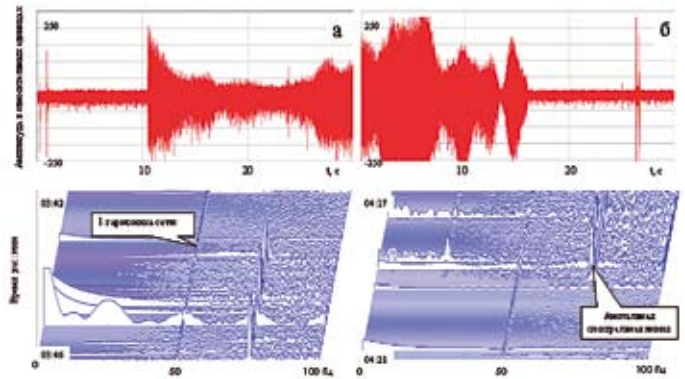


Рис. 5

записи позволило обнаружить начало и конец возмущения, зафиксировать их временные параметры и структуру. Возмущения, содержащие ранее обнаруженный сигнал на частоте ~76 Гц, наблюдались неоднократно. При этом в ряде случаев в структуре возмущения присутствовали импульсы, подобные содержащимся в записи 28 июля 2006 г. (рис. 3), а в ряде случаев их не было. Последние возмущения характеризовались внезапным увеличением шумов и появлением аномальной спектральной линии, как показано на рис. 5.

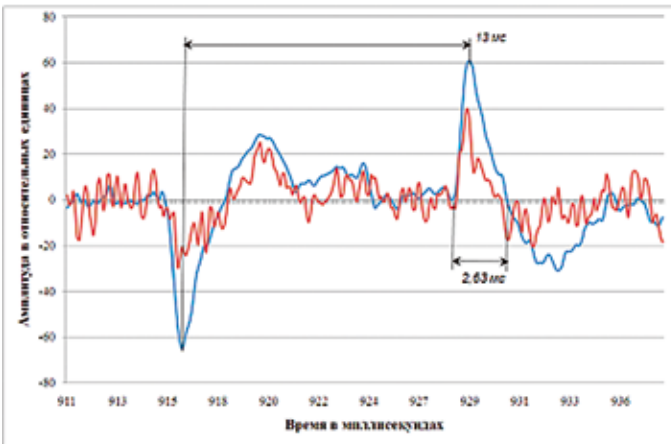
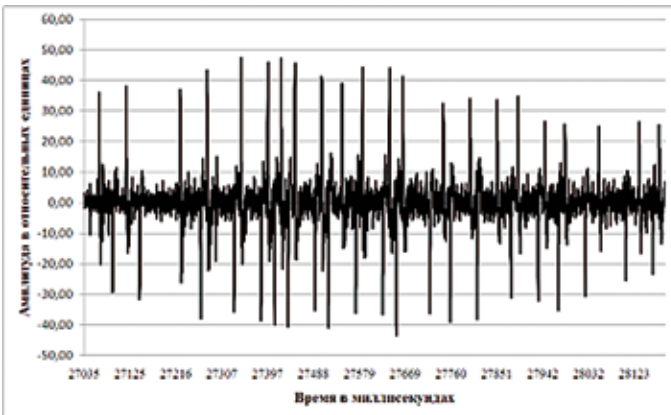


Рис. 3

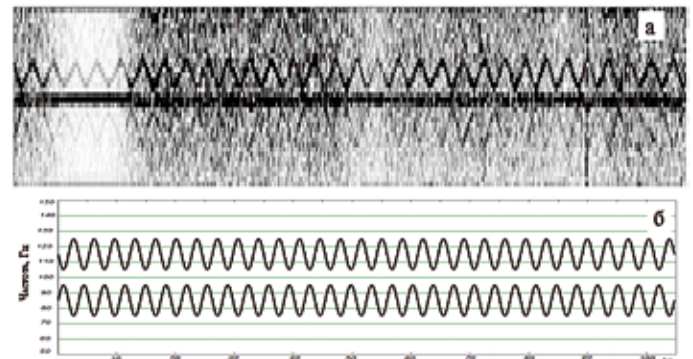


Рис. 6

Кроме вышеназванных возмущений, в ходе наблюдений были обнаружены спектральные линии необычной формы. В апреле 2007 г. наблюдалось внезапное увеличение шумов, в структуре которых присутствовала спектральная линия, внешний вид и модель которой показана на рис. 6. Из рисунка видно, что спектр возмущения состоит из двух колебаний со средними частотами ~85 и ~115 Гц, меняющихся с периодом ~4 с по частоте. В сентябре 2007 года в спектре шумов выявлены линии, у одних из которых частота менялась по синусоидальному закону с периодом ~12 мин, а у других была постоянной ~80 и ~120 Гц (рис. 7).

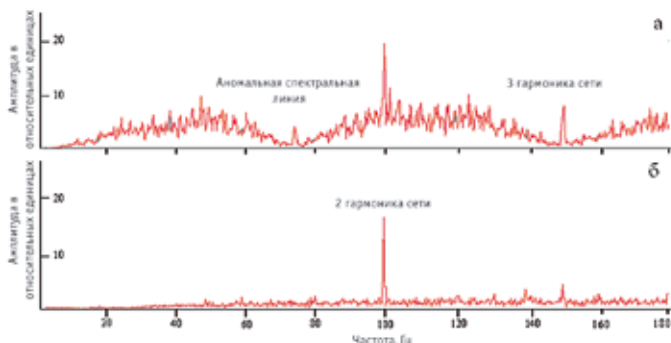


Рис. 4

С момента обнаружения аномальных возмущений встал вопрос об их источнике и генезисе частоты ~10,5 МГц, на которой они наблюдались. При отстройке одного из приемников более чем на 10 кГц спектральные линии исчезали. Не обнаруживались они и при отстройке на большую величину. Ширина полосы пропускания приемника при этом составляла 6 кГц.

Для определения местонахождения источника возмущения на первом этапе наблюдений использовалось различие в положении магнитоионных компонент. В качестве эталона применялся сигнал передатчика ионосферно-волновой службы, расположенный во Владивостоке. Сравнение взаимного положения магнитоионных компонент позволило сде-

При проведении наблюдений в период с июля 2006 г. по февраль 2007 г. запись осуществлялась кратковременно, в течение нескольких минут. В дальнейшем увеличение времени

лать вывод о том, что интересующее нас возмущение пришло с противоположного от источника эталонного сигнала направления, т. е. с северо-востока. Расчетным путем, исходя из разности времени запаздывания магнитоионных компонент определено примерное удаление источника возмущения. Он находится на расстоянии ~3000 км от места наблюдения.

Для более точного определения направления прихода возмущения изменяли размещение антенных устройств комплекса: от первоначального линейного перешли к взаимортогональному (рис. 8). В этом случае корреляционные свойства поляризационных характеристик магнитоионных компонент позволяют определить направление прихода волны. На рис. 8 A1 и A2 — соответственно первая и вторая взаимортогонально расположенные антенны эллиптической поляризации. Коэффициенты корреляции магнитоионных компонент противоположного направления вращения антенн 1 и 2 обозначены соответственно $R1$ и $R2$. Из рисунка видно, что в зависимости от направления прихода волны меняется корреляция между компонентами поля с различными поляризационными характеристиками. В таблице, приведенной на рис. 8, показано: сочетание приемников и антенн для разного положения переключателя устройства коммутации; тип поляризации антенн для определенного направления; сочетание поляризаций компонент поля, по которым проводится оценка степени коррелированности.

Способ апробирован на направлении Советская Гавань — Петропавловск-Камчатский (использовался передатчик ионосферно-волновой службы) и на вещательных станциях различного местоположения и показал отклонение от истинного направления в пределах нескольких градусов. Точность определения направления на передатчик зависит от отношения сигнал/шум.

В июле 2007 г. удалось осуществить запись в режиме, позволяющем использовать данный способ. Вначале трижды произвели запись компонент поля при наличии возмущения, а по окончании воздействия, также трижды, запись собственно атмосферных помех. Такой подход обусловлен тем, что при записи сигнала эталонного передатчика сигнал превышал шум в 5—20 раз. При записи возмущения уровень шумов повышался в 2 раза в начале и, соответственно, уменьшался по окончании возмущения, т. е. сигнал ~76 Гц — часть интегрального шума. Определение направления прихода атмосферных помех позволяет уточнить направление на источник возмущения. С учетом этого обстоятельства было получено среднее значение азимута на источник возмущения — 49° , что достаточно точно совпадает с расчетным азимут на место проведения экспериментов по программе HAARP, Гаконой — 50° .

При определении генезиса частоты наблюдаемого возмущения первоначально исходили из предположения, что поскольку воздействие на ионосферу — процесс нелинейный, в результате должны генерироваться гармоники, в том числе и нагревной волны. Мы предположили, что наблюдаем третью гармонику волны накачки. В этом случае расчетные значения частот гармоник нагревной волны имеют величины, показанные тремя столбцами на рис. 9. Но наблюдения, в которых частота одного из приемников настраивалась на предполагаемую вторую гармонику, дали отрицательный результат.

В ряде случаев в экспериментах по модификации ионосферы используют частоту волны накачки, равную гиромангнитной или ее гармонике. В [4] показано, что гиромангнитная частота является функцией двух аргументов: высоты и геомагнитной широты

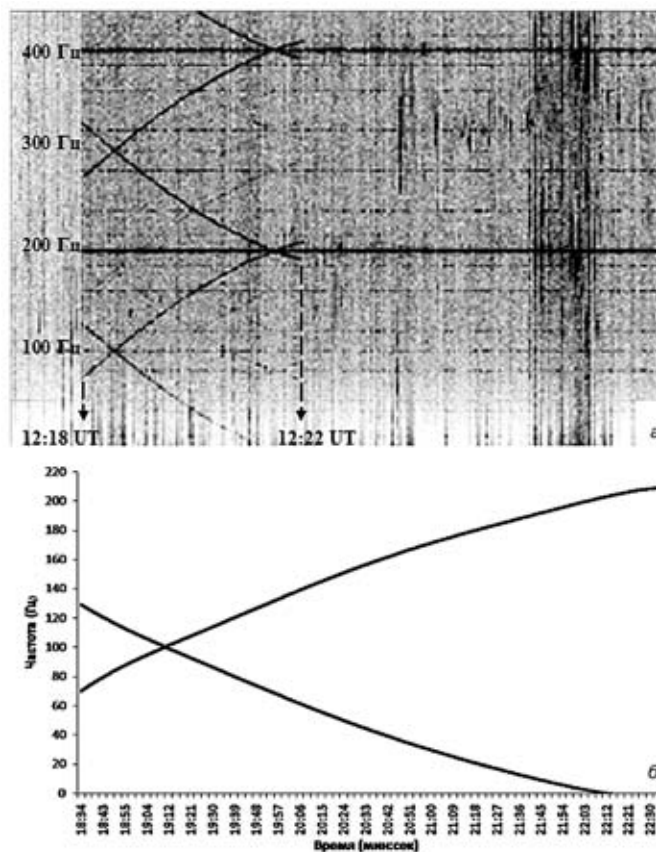
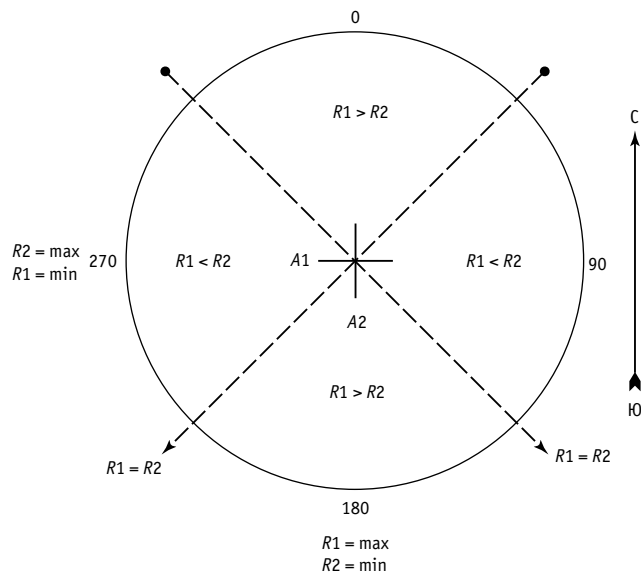


Рис. 7



Положение переключателя	Номер приемника	Направление и поляризация	Номер приемника	Направление и поляризация	Оцениваемая корреляция сочетаний компонент поля
П1	1	восток-правая	2	север-правая	правая-правая
П2	1	восток-правая	2	север-левая	правая-левая
П3	1	восток-левая	2	север-правая	левая-правая
П4	1	восток-левая	2	север-левая	левая-левая

Рис. 8

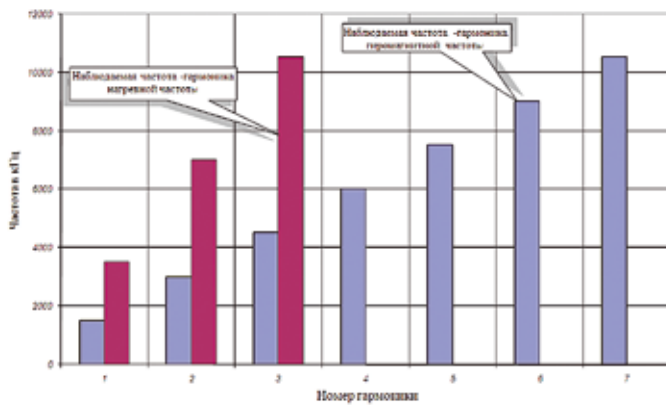


Рис. 9

$$\omega_H = 2\pi f_1 \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \sqrt{1 + 3\sin^2 \varphi},$$

где $f_1 \approx 0,8$ МГц; r_0 — радиус Земли; r — расстояние от центра Земли до рассматриваемой точки; φ — геомагнитная широта этой точки.

Расчеты с использованием приведенного выражения показали возможную принадлежность наблюдаемой частоты к одной из гармоник гиромагнитной частоты. Но поскольку в формуле содержится приблизительное значение одного из аргументов f_1 , необходимо было уточнить эту величину для конкретного пункта наблюдения. Источником такого уточнения послужила работа, выполненная в рамках программы HAARP [5], в которой исследовалось применение частот второй и третьей гармоник гиромагнитной частоты в качестве волны накачки в экспериментах по оптической эмиссии из области F. В работе приводятся значения частот для определенных высот и конкретного места — Такона, Аляска. С использованием этих сведений были проведены вычисления, показавшие, что наша частота находится в окрестности седьмой гармоники гиромагнитной частоты на уровне слоя E (рис. 9). При этом сочетание высота — гиромагнитная частота — геомагнитная широта определяет геомагнитную параллель, вдоль которой возможно подобное воздействие. В нашем случае это сочетание характерно для Аляски.

С установлением источника возмущения возникла необходимость определить вероятную полосу частот, в которой это возмущение может проявиться. В связи с этим кратко проанализируем, для чего производится модификация ионосферы и какие технологии при этом применяются. Из рис. 3 видно, что временной интервал между импульсами меняется. Причем минимальный интервал равен 13 мс, а другие кратны ему. Чередование интервалов с большой вероятностью свидетельствует об информационной, а не исследовательской нагрузке эксперимента.

Учитывая частоту аномальной спектральной линии ~ 76 Гц, можно предположить, что мы имеем дело с экспериментами по созданию канала связи экстремально низких частот (ELF- Extremely Low Frequency). Практическая реализация подобных каналов связи с помощью наземных передатчиков описана в [6]. Для организации аналогичного канала на основе модификации ионосферы используется эффект Гетманцева, который заключается в генерации низкочастотных волн при воздействии мощным модулированным КВ излучением на слой E, где протекают сильные ионосферные токи — электроджет [7]. Главным на данный момент вопросом при реализации этого способа является эффективность преобра-

вания энергии волны накачки в энергию низкочастотного сигнала.

Основными способами повышения эффективности воздействия на ионосферу и направлениями исследований являются:

1. Увеличение мощности облучения и размеров модифицируемой области [8]. В частности, используя различие во времени нагрева и остывания плазмы, можно увеличить масштаб зоны воздействия.

2. Выбор поляризации излучаемой волны. Как правило, используется поляризация, совпадающая с поляризацией обыкновенной волны [9]. Обыкновенная волна накачки намного эффективнее необыкновенной, возбуждает искусственные периодические неоднородности.

3. Выбор схемы модуляции. Исследовалось влияние формы импульса на эффективность вторичного излучения [10], в частности: прямоугольной, синусоидальной и модифицированной синусоиды (half-wave rectified wave). Наиболее эффективной оказалась последняя форма импульса.

4. Длительность и частота следования импульсов [11]. Показана зависимость величины вариаций магнитного поля Земли от параметров низкочастотной модулирующей компоненты. При этом величина вариаций как следствие воздействия составляет несколько рТ.

5. Направление излучения волны [12]. Показано, что эффект воздействия максимален при излучении волны в магнитный зенит, т. е. вдоль силовых линий магнитного поля Земли, а не вертикально.

6. Частота волны накачки [13–15]. Выбор частоты обуславливает высоту воздействия и определяется конкретной задачей исследования.

При фиксированной мощности облучения наиболее важным, с точки зрения уровня шумов, является выбор частоты волны накачки. Известно искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) [16], которое является продуктом взаимодействия мощной электромагнитной волны и плазмы ионосферы. Как правило, ИРИ группируется вокруг частоты накачки в полосе ± 100 кГц. В [17] показано, что при выборе частоты волны накачки $f_{\text{вн}}$, близкой к гиромагнитной $f_{\text{ге}}$ или ее гармонике $f_{\text{вн}} \approx n f_{\text{ге}}$, структура ИРИ меняется кардинальным образом. Связано это с гиромагнитным резонансом (историю этого вопроса и обзор современных направлений исследований можно найти в [18]). Исходя из данных, приведенных в [17], и собственных наблюдений, можно утверждать, что воздействие на ионосферу на гармониках гиромагнитной частоты генерирует искусственное радиоизлучение ионосферы в широкой полосе частот. При этом его интенсивность зависит от номера гармоники, и максимальный уровень проявляется при использовании 4-й и 5-й гармоник гиромагнитной частоты. В этой же работе имеется информация об обнаружении генерации искусственного радиоизлучения ионосферы в дециметровом диапазоне.

Заключение. Установлено изменение в спектральных характеристиках шумов в дециметровом диапазоне, которое может быть следствием экспериментов по модификации ионосферы мощным коротковолновым излучением на частотах, значительно отличающихся от частоты волны накачки. При этом происходит увеличение помех относительно естественного атмосферного шумового фона 2–10 раз. Выявленные возмущения способны уменьшить пропускную способность и увеличить вероятность ошибки в существующих, не адаптированных к подобным возмущениям, коротковолновых системах связи.

Основными источниками нестандартных возмущений в КВ диапазоне для европейской части России могут быть эксперименты в рамках программ EISCAT (Норвегия), SPEAR (Шпицберген) и для востока страны — HAARP, HIPAS (Аляска).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивоконь В.П. и др. Аппаратурный комплекс для исследования волн вращающейся поляризации в КВ-диапазоне // *Электросвязь*. — 2004. — №8.
2. Сивоконь В.П. Поляризация коротких волн в ионосферном канале связи // *Электросвязь*. — 2007. — №7.
3. Беликович В.В. и др. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999 — 156 с.
4. Гершман Б.Н. и др. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. — М.: Наука, 1984. — 391 с.
5. Kosch M.J. and other Artificial optical emissions at HAARP for pump frequencies near the third and second electron gyro-harmonic // *Annales Geophysicae*, 23, 1585–1592, 2005. <http://www.ann-geophys.net/23/1585/2005/>.
6. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. — М.: Радио и связь, 1985. — 376 с.
7. Riddolls R.J. Structure of the Polar Electrojet Antenna. Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 2003. <http://dspace.mit.edu/bitstream/1721.1/16945/1/53248041.pdf>.
8. Barr R. and other ELF wave generation in the ionosphere using pulse modulated HF heating: initial tests of a technique for increasing ELF wave generation efficiency // *Annales Geophysicae* 17, 759–769 (1999). <http://www.anngeophys.net/17/759/1999/angeo-17-759-1999.html>.
9. Lehtinen N.G. Theoretical study of ionospheric modification and ELF/VLF wave generation by HAARP. — STARLab, 350 Serra Mall, Stanford University, Stanford, CA 94305, U.S.A. <http://nlpc.stanford.edu/nleht/Science/publications.html>.
10. Kuo S. P. Methods for Improving the Generation Efficiency of ELF Radiation. Department of Electrical & Computer Engineering Polytechnic University Six MetroTech Center, Brooklyn, NY 11201. <http://home.physics.ucla.edu/calendar/conferences/PARS/abstracts/Kuo.htm>.
11. Papadopoulos K. and other Efficiency Scaling for Ionospheric ELF/VLF Generation. Advanced Power Technologies Inc, University of Maryland Physics Department College Park, MD 20742. <http://www.ursi.org/Proceeding/ProcGA02/papers/p0936.pdf>.
12. Isham B. and other An interferometer experiment to explore the aspect angle dependence of stimulated electromagnetic emission spectra. *Annales Geophysicae* (2005) 23: 55–74. <http://www.ann-geophys.net/23/55/2005/>.
13. Moore R.C. and other Observations of amplitude saturation in ELF/VLF wave generation by modulated HF heating of the auroral electrojet. *Geophysical research letters*, Vol. 33, L12106, doi: 10.1029/2006GL025934, 2006. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL025934.shtml>.
14. Moore R.C. ELF/VLF wave generation by modulation HF heating of the auroral electrojet. A dissertation submitted to the department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford University in partial of the requirements for the degree of doctor of philosophy, March 2007. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL025934.shtml>.
15. Moore R.C., Inan U.S. ELF/VLF Amplitude saturation as a function of HF frequency. University of Florida, Stanford University, 2008.
16. Беликович В.В. и др. Тез. докл. XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. Ч.1. — Горький, июнь 1981. — М.: Наука, 1981.
17. Фролов В.Л. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // *Успехи физических наук*. — 2007. — Т. 177. — № 3.
18. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // *Успехи физических наук*. — 2007. — Т. 177. — № 11.

Получено 28.04.04

ИНФОРМАЦИЯ

В МИНКОМСВЯЗИ РОССИИ

20 января 2009 г. в Министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации состоялось первое заседание Государственной комиссии по радиочастотам в ее новом составе под председательством главы Минкомсвязи России И. Щёголева.

В состав комиссии включены новые лица: Ю.И.Борисов — заместитель министра промышленности и торговли Российской Федерации, Н.С.Мардер — заместитель министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, А.М.Смирный — заместитель министра внутренних дел Российской Федерации, Е.Р.Мейчик — начальник связи Вооруженных Сил Российской Федерации, заместитель начальника Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации, А.С.Мишарин — заместитель министра транспорта Российской Федерации, С.К.Ситников — руководитель Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, Р.Р.Гизатулин — директор департамента Минприроды России.

Говоря об итогах заседания ГКРЧ, министр связи и массовых коммуникаций Российской Федерации сообщил, что комиссия приняла решение о переработке Плана перспективного использования

частот и Таблицы распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации. «Есть определенная периодичность, сейчас сроки подошли, и мы, соответственно, решили, что такая работа должна быть начата и достаточно оперативно проведена», — отметил И.Щёголев.

По словам министра, комиссия занималась темой цифрового телерадиовещания, были рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости ряда устройств и целесообразности применения формата DRM при разворачивании сетей радиовещания. «Мы сочли, что этот формат приемлем», — добавил И. Щёголев. — После сегодняшнего решения комиссии те, кто желает производить такое оборудование, как передающее, так и приемное, или разворачивать соответствующие сети, такую возможность получили».

ГКРЧ рассмотрела вопрос использования полос для телевизионного вещания. По решению комиссии, Россвязькомнадзору поручено до 10 февраля проанализировать ситуацию с кодовыми заявками и доложить о ней ГКРЧ. «Это нужно для следующего принятия решения о том, как мы дальше будем поступать с введенным в декабре 2007 г. мораторием, который действует на целый ряд частот», — пояснил глава Минкомсвязи.

Комиссией было принято также решение о выделении полосы радиочастот в диапазоне 7900...8400 МГц для использования радиорелейных станций прямой видимости. «Мы достаточно подробно обсуждали судьбу тех частот, на которых могут разворачиваться сети беспроводного широкополосного доступа, в том числе мобильного», — сказал И. Щёголев. — Было принято решение, что такой ресурс является ограниченным и в соответствии с законом «О связи» должен распределяться по конкурсу. Аппарату комиссии дано поручение совместно с научно-исследовательским институтом Министерства обороны и других заинтересованных служб уточнить наличие доступного свободного ресурса в целом ряде полос частот с тем, чтобы мы могли перейти к их распределению по конкурсной процедуре».

В завершение заседания был рассмотрен вопрос о выделении частот для ввозимого на территорию Российской Федерации радиоэлектронного оборудования. «Это решение было принято, и уже в первом квартале нам необходимо передать соответствующий проект в распоряжение правительства Российской Федерации», — подытожил министр.