

## Особенности генерации и распространения сверхнизкочастотных волн, возбуждаемых в ионосфере Земли, при воздействии мощного КВ-радиоизлучения

А.С. Белов 

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС имени Ю.Е. Седакова»  
603137, Россия, г. Нижний Новгород,  
ул. Тропинина, 47

*Аннотация* – Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик сверхнизкочастотных излучений, возбуждаемых во внешней ионосфере при нагреве ионосферной плазмы излучением высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating. Эксперименты были выполнены в период 2006–2010 гг. с использованием двух основных схем генерации, включающих воздействие с помощью промодулированного по мощности излучения нагревного стенда и двух немодулированных волн накачки с расстройкой по частоте. In-situ измерения характеристик плазменно-волновых возмущений проведены на высотах внешней ионосферы Земли с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER. В работе определены основные пространственные, амплитудные и спектральные характеристики генерируемых низкочастотных излучений. Показано, что характерный размер области регистрации сверхнизкочастотных излучений составляет порядка 400–600 км вдоль траектории движения микроспутника DEMETER. Пространственное положение области регистрации определяется как используемой схемой генерации, так и распределением фоновой концентрации плазмы. Амплитуда напряженности электрического поля сверхнизкочастотных излучений на высотах внешней ионосферы Земли составляет 50–330 мкВ/м.

*Ключевые слова* – низкочастотные излучения; in-situ измерения; нагрев ионосферы.

### Введение

Магнитосфера, являясь верхней частью атмосферы Земли, определяющим образом влияет как на характер жизнедеятельности на Земле, так и, как одна из частных технических проблем, на функционирование глобальных космических систем.

Особую опасность для низкоорбитальных космических аппаратов представляют потоки высокоэнергичных электронов и протонов радиационных поясов [1; 2]. Для перспективного поколения космических аппаратов с высокоинтегрированной бортовой электроникой потоки высокоэнергичных частиц являются основным фактором, резко ограничивающим их сроки функционирования. В связи с этим крайне актуальной задачей являются не только контроль и прогнозирование, но и управление состоянием радиационных поясов Земли.

Важную роль в динамике околоземной плазмы играют низкочастотные электромагнитные волны. Низкочастотные радиоволны сверх- и очень низкочастотного диапазонов эффективно взаимодействуют с высокоэнергичными протонами и электронами радиационных поясов на циклотронном резонансе [3]. В результате этого взаимодействия изменяется питч-угол энергичных

частиц, приводя к высыпаниям их в ионосферу Земли. По этой причине контролируемое возбуждение низкочастотных радиоволн в магнитосфере может обеспечивать снижение числа высокоэнергичных частиц [4; 5].

Основная сложность практического использования этих волн для регулирования населенности радиационных поясов состоит в том, что взаимодействие волна – частица наиболее эффективно происходит в нелинейном режиме, зависящем от амплитуды волны. Когда амплитуда достигает порогового значения, начальный сигнал может быть усилен при взаимодействии с энергичными частицами, и в результате этого, он явится инициатором вторичных интенсивных излучений. Поэтому увеличение эффективности возбуждения низкочастотных излучений в околоземной плазме является достаточно широко развиваемым направлением в области космической погоды. При этом одним из наиболее результативных методов воздействия считается нагрев ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением наземных специальных установок – нагревных стендов.

Существуют две основные схемы генерации низкочастотных излучений с использованием нагревных стендов.

Первая схема эффективно реализуется в ионосферных экспериментах с помощью промоду-

лированного по мощности излучения нагревного стенда. Реализацию данной схемы можно представить следующим образом. При воздействии модулированным излучением на ионосферную плазму изменяется температура электронов  $\Delta T_e$  в возмущенной области ионосферы, вызывающая модуляцию частоты столкновений электронов. Изменение частоты столкновений вызывает модуляцию ионосферной проводимости в облучаемой области токовой струи, а как следствие этого – нелинейный переменный ток, который является искусственным ионосферным источником низкочастотного радиоизлучения («эффект Гетманцева») [6]. Зависимость интенсивности генерируемых низкочастотных сигналов, принимаемых наземными средствами регистрации, от параметров токовой струи исследовалась во многих работах (см., например, [7; 8]). В них было установлено, что в полярных широтах интенсивность излучения на частотах модуляции зависит от силы тока в авроральной электроструе и расстояния от нее до центра области воздействия. Высокие значения амплитуды генерируемых низкочастотных волн в основном наблюдаются при усилении тока электроструи во время геомагнитных возмущений.

Вторая схема, впервые реализованная в экспериментах на нагревном стенде «Сура» [9], основана на одновременном излучении двух немодулированных волн накачки, имеющих расстройку по частоте. Интерференционная картина высокочастотных радиоволн двух подрешеток формирует возмущения ионосферного тока  $\delta J_e$ , которые будут двигаться со сверхсветовой скоростью, а сам ток являться виртуальным источником излучения на разностной частоте  $F$  в случае выполнения условия:

$$F/f_{pump} > d/h, \quad (1)$$

где  $f_{pump}$  – несущая частота волны накачки;  $d$  – расстояние между фазовыми центрами источников;  $h$  – высота.

В случае выполнении условия (1) возможно значительное (на 10–20 дБ) увеличение уровня возбуждаемых низкочастотных сигналов [10] по сравнению с первой схемой.

Несмотря на значительный объем исследований, выполненных по данным схемам генерации в основном с использованием наземных средств регистрации, характеристики искусственных низкочастотных излучений на высотах внешней ионосферы Земли остаются сравнительно малоизученными.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик СНЧ-излучений (диапазон 30–3000 Гц), индуцируемых на высотах внешней ионосферы при нагреве ионосферной плазмы излучением высокоширотного нагревного стенда EISCAT-heating (69,58° N, 19,22° E) [11] с использованием обеих схем генерации в период 2006–2010 гг.

В проведенных экспериментах воздействие осуществлялось в поздние вечерние часы мощными радиоволнами X-поляризации, являющимися наиболее эффективными для генерации СНЧ-излучений [12]. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений измерялись на высотах ~660 км с помощью бортовой аппаратуры микроспутника DEMETER [13]. В измерениях использовался режим регистрации «burst mode», во время которого вся приемная аппаратура микроспутника работала с максимальной скоростью оцифровки данных.

В проведенных сеансах нагрева микроспутник DEMETER пересекал возмущенную область ионосферы, двигаясь с юго-восточного направления на северо-запад.

Кроме того, следует отметить, что по договоренности с центром управления DEMETER его измерительная аппаратура специально включалась на короткое время, когда спутник пролетал в области над нагревным стендом EISCAT-heating, хотя в стандартном режиме функционирования она была отключена на широтах выше 60° N.

## 1. Результаты in-situ измерений характеристик СНЧ-излучений, возбуждаемых при воздействии промодулированного по мощности излучения нагревного стенда

Всего было проведено более 10 сеансов нагрева в режиме воздействия на околоземную плазму промодулированного по мощности излучения нагревного стенда EISCAT-heating. В экспериментах мощные КВ-радиоволны излучались на частоте  $f_{pump} = 4040$  кГц (в ряде экспериментов – 3950 кГц) с эффективной мощностью излучения  $P_{eff} \sim 180$  МВт. При этом КВ-радиоизлучение было промодулировано по амплитуде в режиме меандр с глубиной модуляции 100 %. Нагревный стенд EISCAT-heating, как правило, включался на 15 минут за 10 минут до расчетного времени пролета микроспутника DEMETER через центр возмущенной силовой трубки геомагнитного поля.

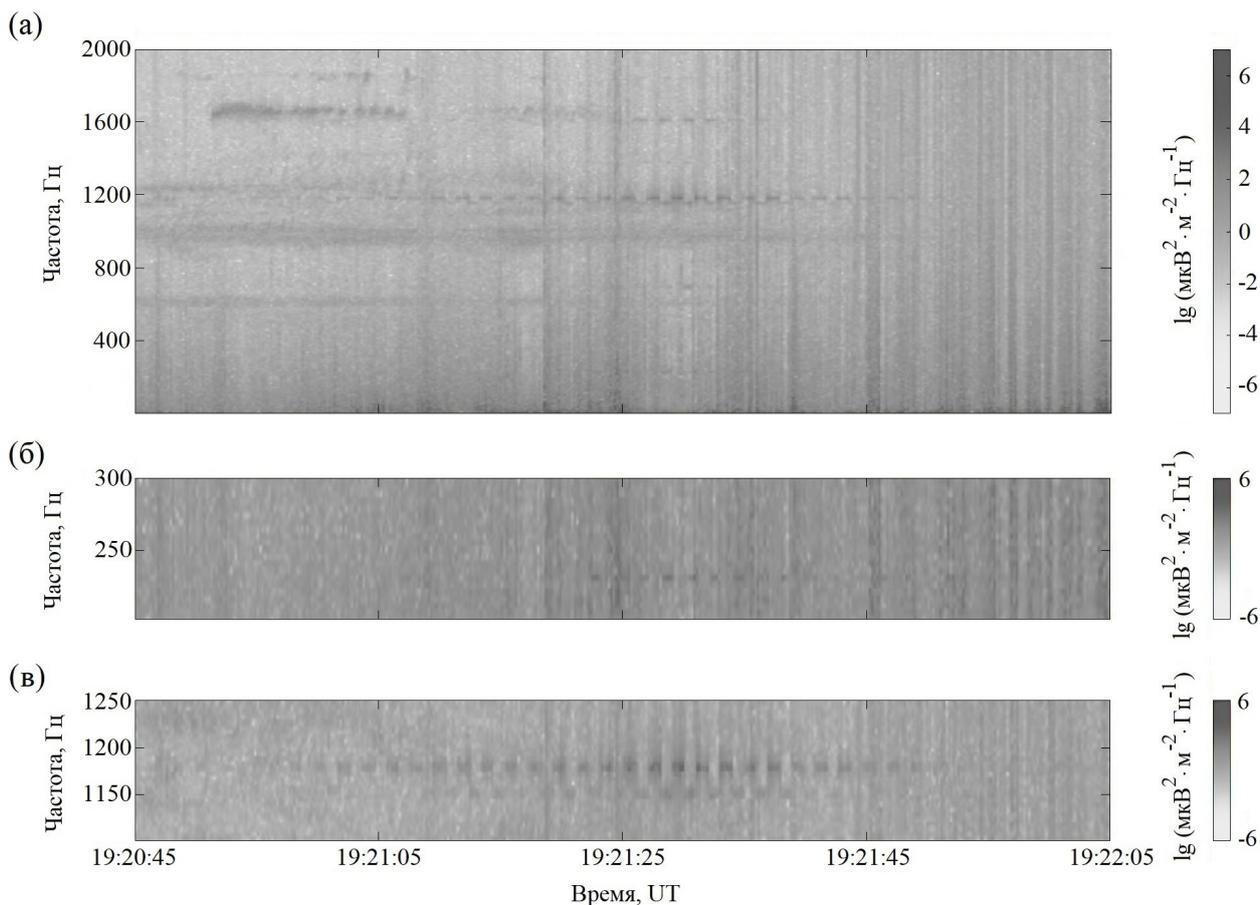


Рис. 1. Динамические спектрограммы сигнала  $E_x$  с электрической антенны микроспутника DEMETER, ортогональной к направлению геомагнитного поля, для сеанса нагрева 03.03.2010

Fig. 1. Dynamic spectrograms of the signal  $E_x$  from the microsatellite DEMETER electric antenna orthogonal to the direction of the geomagnetic field for the heating session dated March 3, 2010

Характерные результаты экспериментов были получены для сеансов нагрева, выполненных 03.03.2010 и 12.03.2010. В этих сеансах применялся циклический режим изменения частоты модуляции с использованием следующих ее значений: 230 и 1178 Гц. Длительность излучения на каждой частоте 1 с.

На рис. 1 и 2 представлены результаты наблюдений генерации искусственных СНЧ-излучений на частотах модуляции волны накачки для сеанса 03.03.2010. Эти измерения были выполнены в достаточно спокойных геомагнитных условиях для значений индексов  $K_p = 2^+$  и  $AE = 229$  нТл.

На рис. 1 панель (а) приведена в диапазоне частот до 2000 Гц спектральная плотность сигнала  $E_x$  с электрической антенны прибора ICE микроспутника DEMETER, ортогональной к направлению геомагнитного поля. Фрагменты спектрограммы в диапазоне частот 200–300 Гц и 1100–1250 Гц представлены на панелях (б) и (в) рис. 1 соответственно.

Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на

частотах модуляции волны накачки, приведены на панелях (а) и (б) рис. 2. Кроме того, на рис. 2, г построена траектория движения микроспутника DEMETER на  $h = 100$  км, полученная путем параллельного переноса вдоль геомагнитного поля с высоты орбиты 660 км (звездочкой отмечено положение центра области нагрева). Зависимость от времени его расстояния  $D$  до центра области нагрева показана на панели (в) рис. 2.

На представленной на рис. 1 динамической спектрограмме четко видна генерация искусственного СНЧ-излучения на частотах модуляции волны накачки. Амплитуда напряженности электрического поля низкочастотных сигналов по данным, представленным на рис. 2, составила  $\sim 50$  мкВ/м на частоте 230 Гц и  $\sim 150$  мкВ/м на частоте 1178 Гц. СНЧ-излучение регистрировалось в течение порядка 1 мин на расстояниях от области наибольшего сближения до 180 км в северном направлении и до 240 км в направлении на юг.

Область регистрации стимулированного низкочастотного излучения, отмеченная на рис. 2, имеет

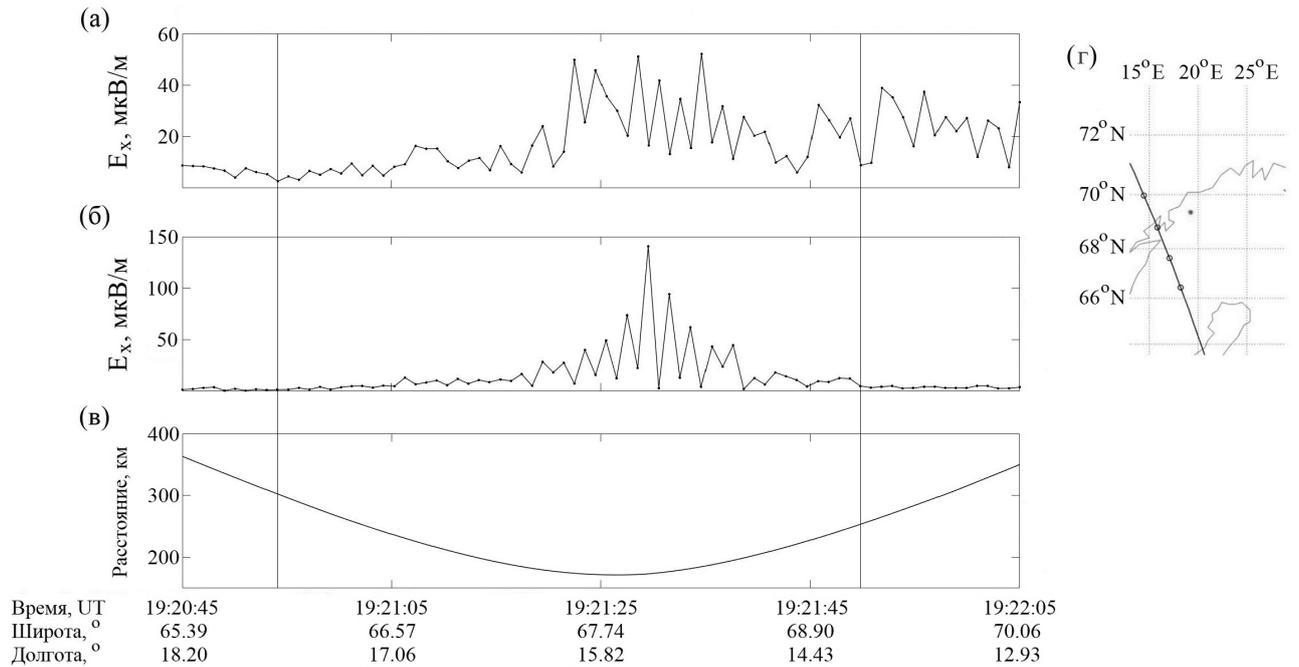


Рис. 2. Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на частотах модуляции волны накачки (панели (а) и (б)), и параметры траектории пролета DEMETER (панели (в) и (г)) для сеанса 03.03.2010

Fig. 2. Variations of the electric field strength magnitude identified in the band  $\Delta f = 4,9$  Hz at the pump wave modulation frequencies (panels (a) and (b)) and parameters of the DEMETER flight trajectory (panels (c) and (d)) for the session dated March 3, 2010

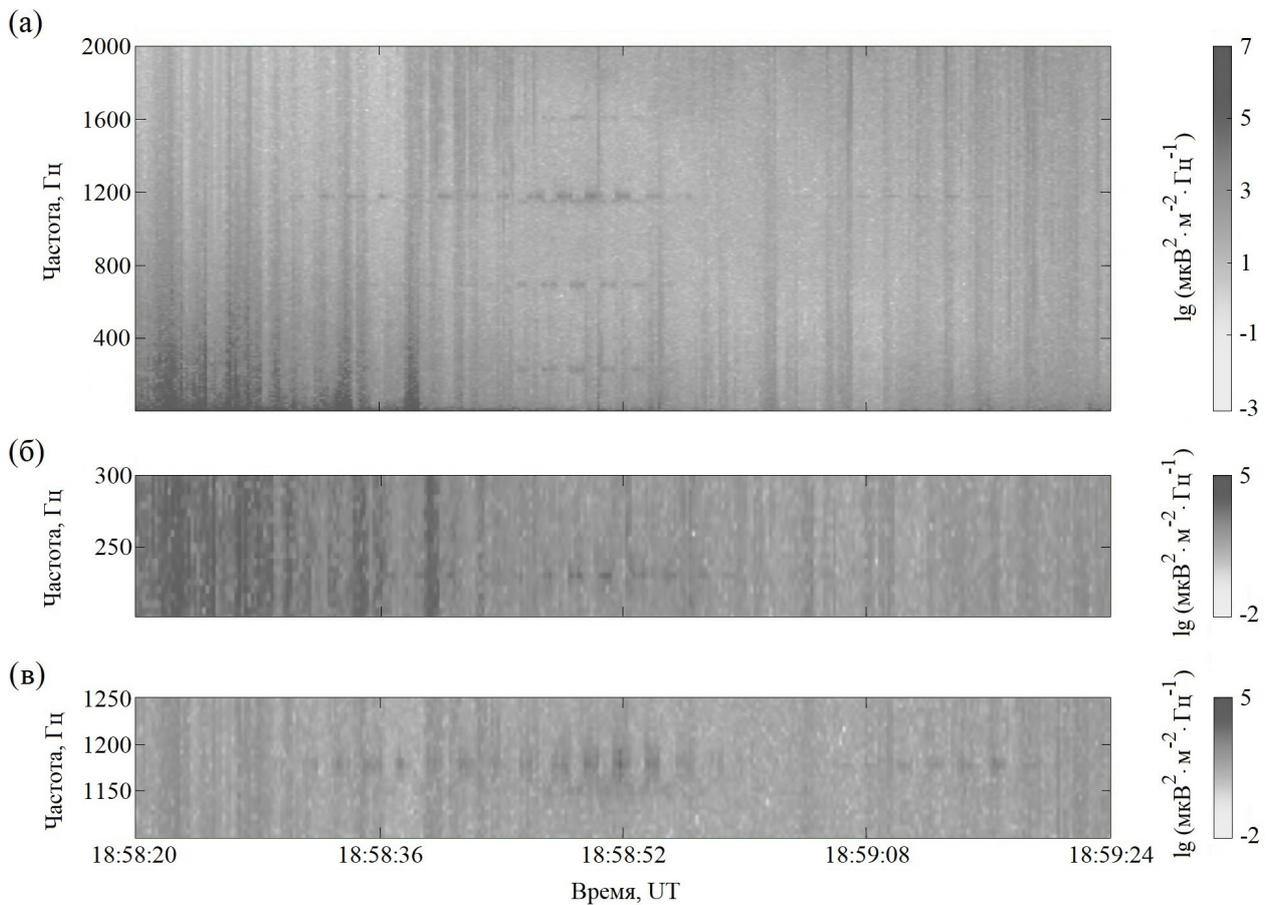


Рис. 3. Динамические спектрограммы сигнала  $E_x$  для сеанса нагрева 12.03.2010

Fig. 3. Dynamic spectrograms of the signal  $E_x$  for the heating session dated March 12, 2010

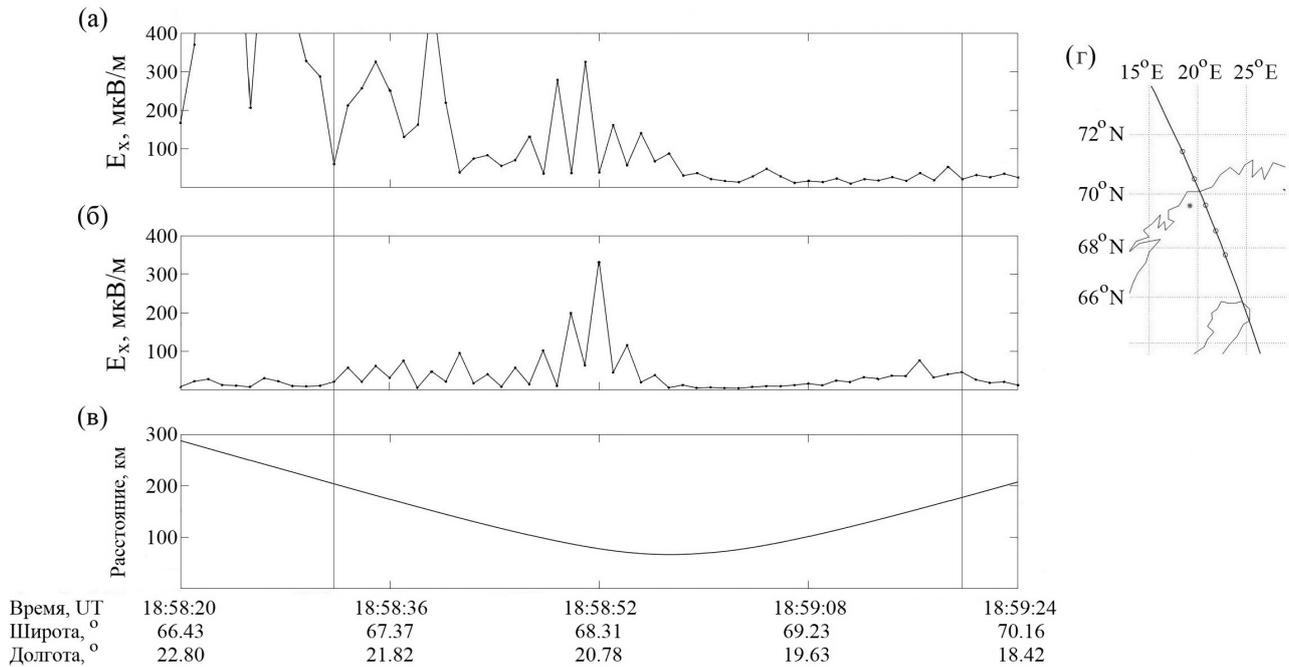


Рис. 4. Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на частотах модуляции волны накачки (панели (а) и (б)), и параметры траектории пролета DEMETER (панели (в) и (г)) для сеанса 12.03.2010  
 Fig. 4. Variations of the electric field strength magnitude identified in the band  $\Delta f = 4,9$  Hz at the pump wave modulation frequencies (panels (a) and (b)) and parameters of the DEMETER flight trajectory (panels (c) and (d)) for the session dated March 12, 2010

максимум, смещенный в северном направлении на 20 км относительно области наибольшего сближения микроспутника с центром зоны нагрева. При этом распределение плотности электронов на высоте орбиты микроспутника DEMETER в рассматриваемой области было достаточно однородным.

Для сеанса, проведенного 12.03.2010, на рис. 3 приведены динамические спектрограммы сигнала  $E_x$  с электрической антенны, ортогональной к направлению геомагнитного поля. Геомагнитные условия проведения измерений были близки к сеансу 03.03.2010: значения индексов  $K_p = 2^-$  и  $AE = 57$  нТл.

Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на частотах модуляции волны накачки, приведены для данного сеанса на рис. 4. Кроме того, на рис. 4 (панели (б) и (в)) приведены данные для сеанса 12.03.2010 о траектории пролета микроспутника DEMETER аналогично рис. 2.

Амплитуда напряженности электрического поля СНЧ-излучений по данным, представленным на рис. 4, составила  $\sim 330$  мкВ/м на частотах 230 и 1178 Гц. СНЧ-излучение регистрировалось в течение порядка 50 с на расстояниях от области наибольшего сближения до 165 км в северном направлении и до 200 км в направлении на юг. Максимальные значения напряженности элек-

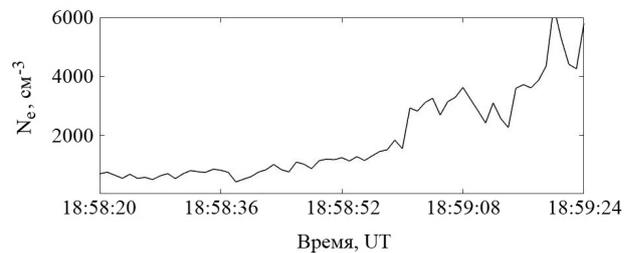


Рис. 5. Результаты измерений с использованием прибора ISL микроспутника DEMETER плотности  $N_e$  в сеансе, проведенном 12.03.2010  
 Fig. 5. Measurement results using ISL instrument of DEMETER microsatellite  $N_e$  density for the session dated March 12, 2010

трического поля СНЧ-излучений регистрируются в области, смещенной в южном направлении на 70 км относительно области наибольшего сближения микроспутника с центром зоны нагрева.

Проведенные измерения плотности плазмы с помощью бортовой аппаратуры спутника DEMETER (рис. 5) показали, что распределение  $N_e$  носит на высоте 660 км существенно неоднородный характер. Зона максимальных регистрируемых значений напряженности поля находится вблизи полярной стенки высокоширотного провала, которая на меньших высотах, исходя из моделей ионосферы (например, модель IRI [14]), смещена в область более низких широт.

Подобное распределение  $N_e$ , согласно расчетам, выполненным в [15], приводит к изменению

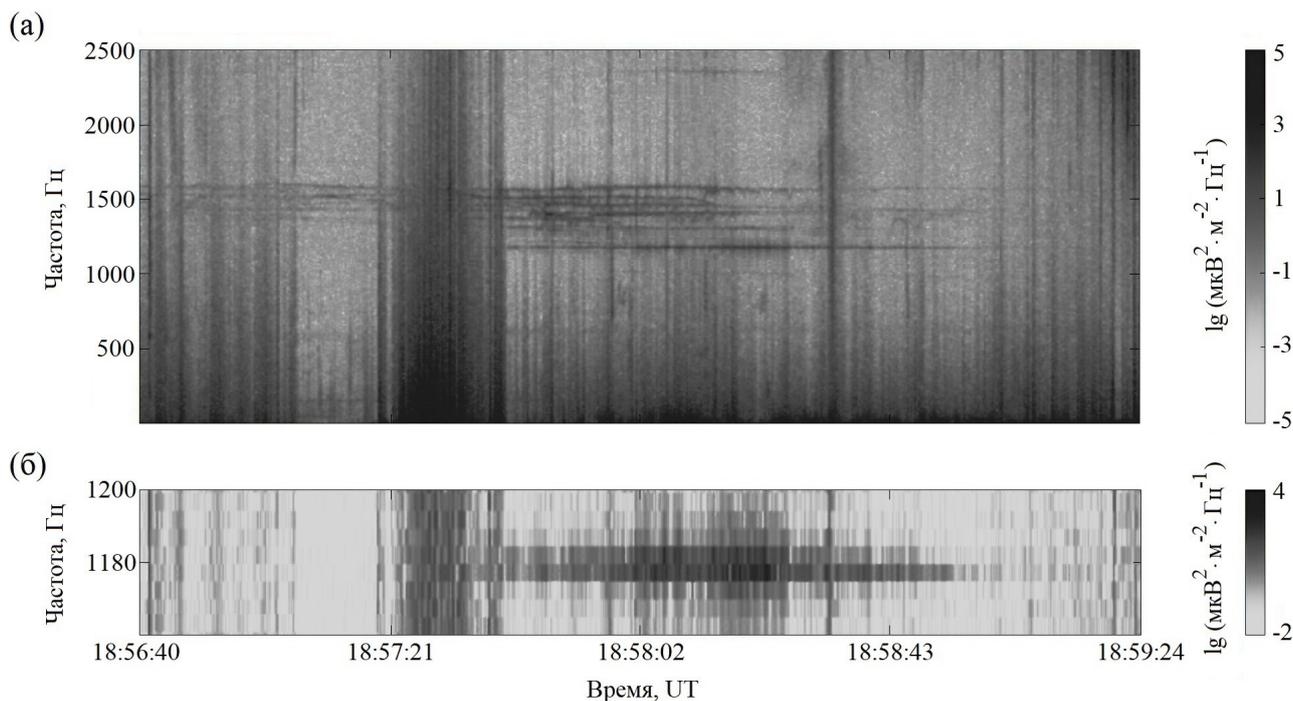


Рис. 6. Динамические спектрограммы сигнала  $E_x$  для сеанса нагрева 08.11.2010  
 Fig. 6. Dynamic spectrograms of the signal  $E_x$  for the heating session dated November 8, 2010

траектории распространения низкочастотных излучений и, следовательно, смещению области регистрации СНЧ-сигналов.

## 2. Результаты in-situ измерений характеристик СНЧ-излучений, возбуждаемых при воздействии на ионосферу Земли двух немодулированных волн накачки с расстройкой по частоте

В данном режиме воздействия в поздние вечерние часы был проведен всего один сеанс 08.11.2010, для которого значения индексов геомагнитной активности составляли  $K_p = 1^+$  и  $AE = 145$  нТл.

В эксперименте антенная решетка стенда разделялась на две подрешетки. Одна из антенных подрешеток запитывалась от шести передатчиков на одной несущей частоте  $f_{pump}$ , другая – от шести других коротковолновых радиопередатчиков на частоте  $f_{pump} + F$ . Каждая из подрешеток состояла из 3 рядов по 6 скрещенных диполей. Подрешетка, излучающая на частоте  $f_{pump}$ , была пространственно смещена в северном направлении относительно второй подрешетки. Расстояние между фазовыми центрами излучающих подрешеток  $d = 135$  м. Значение расстройки частот  $F$  составляло 1178 Гц.

К сожалению, представленная комбинация параметров воздействия является неоптимальной

(условие (1) не выполнено) для постановки экспериментов со сверхсветовым источником. В то же время скорость перемещения максимумов интерференционного поля близка к скорости света, когда период допустимой расстройки становится сравним со временем установления возмущений температуры электронов на высотах генерации НЧ-излучений, что и реализуется в данном эксперименте.

На рис. 6 приведена для сеанса 08.11.2010 динамическая спектрограмма сигнала  $E_x$  с электрической антенны, ортогональной к направлению геомагнитного поля в диапазоне частот до 2500 Гц. На спектрограмме в диапазоне частот 1300–1600 Гц наблюдаются электростатические сигналы на гармониках ионно-циклотронной частоты.

Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на частоте  $F$ , приведены на панели (а) рис. 7. Кроме того, на рис. 7 (панели (б) и (в)) приведены данные о траектории пролета микроспутника DEMETER аналогично рис. 2 и 4.

Амплитуда напряженности электрического поля  $E_x$  на частоте  $F$  составила порядка 50 мкВ/м. СНЧ-излучение регистрировалось в течение 80 с на расстояниях от центра области нагрева до 200 км в южном направлении и до 400 км в направлении на север.

Область регистрации стимулированного низкочастотного излучения, отмеченная на рис. 7,

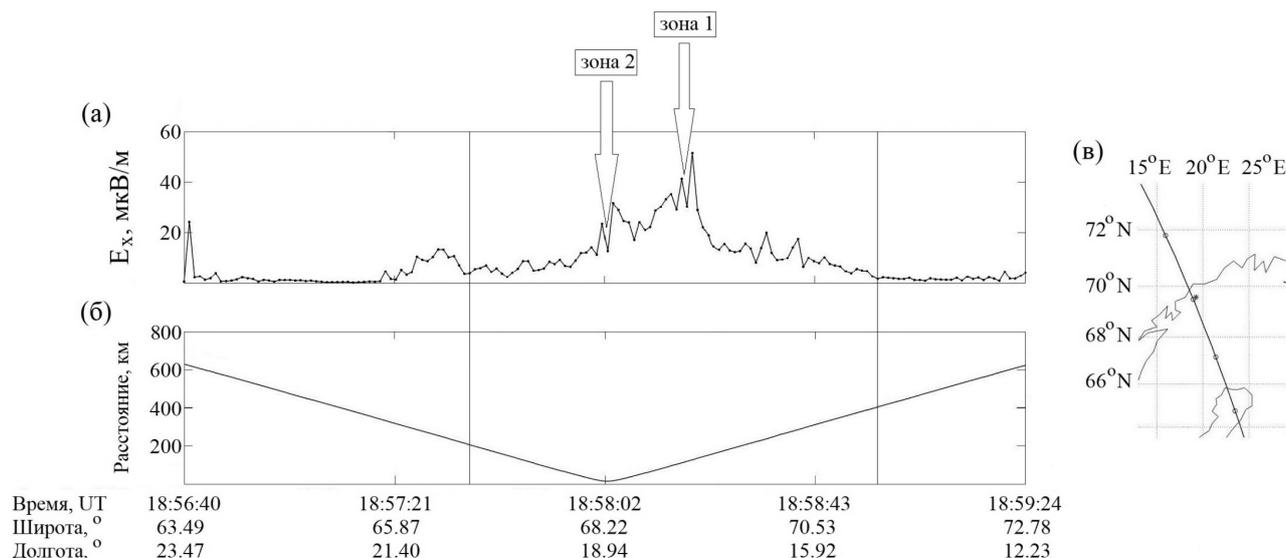


Рис. 7. Вариации величины напряженности электрического поля, выделенной в полосе  $\Delta f = 4,9$  Гц на частоте расстройки двух немодулированных волн накачки (панель (a)), и параметры траектории пролета DEMETER (панели (б) и (в)) для сеанса 08.11.2010  
 Fig. 7. Variations of the electric field strength magnitude identified in the band  $\Delta f = 4,9$  Hz at the detuning frequency of two unmodulated pump waves (panel (a)) and parameters of the DEMETER flight trajectory (panels (b) and (c)) for the session dated November 8, 2010

имеет существенно неоднородную пространственную структуру. В ней можно выделить две характерные области:

- зона с наибольшей интенсивностью излучения («зона 1») с поперечным масштабом порядка 60 км, смещенная относительно центра области нагрева в северном направлении на 110 км;
- зона с интенсивностью сигнала до 30 мкВ/м («зона 2»), имеющая протяженность вдоль траектории движения микроспутника DEMETER 85 км и зарегистрированная пространственно симметрично относительно центра области нагрева.

Результаты моделирования пространственной структуры возбуждаемых по данной схеме СНЧ-излучений представлены в работе [16]. Полученные в настоящей работе пространственные характеристики области регистрации в целом соответствуют результатам численного моделирования. Пространственное распределение возбуждаемых СНЧ-излучений имеет неоднородную структуру, более вытянутую в северном направлении, с зоной с наибольшей интенсивностью сигнала, смещенной также на север на расстояние порядка 50–100 км от центра области нагрева. Данная структура реализуется при условии, что подрешетка, излучающая на частоте  $f_{pump}$ , пространственно смещена на север относительно второй подрешетки, работающей на частоте  $f_{pump} + F$ , что и было осуществлено в эксперименте «EISCAT-heating – DEMETER».

Амплитуда возбуждаемых на частотах 1–2 кГц в данном режиме воздействия СНЧ-излучений со-

гласно работам [9; 16] меньше значений, соответствующих традиционной схеме генерации низкочастотных волн с помощью промодулированного по амплитуде излучения нагревного стэнда, что также подтверждается результатами натурального эксперимента.

Следует отметить, что для получения полной достоверной картины генерации и распространения низкочастотных сигналов в рамках данной схемы воздействия требуются проведение дополнительных экспериментальных исследований и набор статических данных.

## Заключение

Все представленные экспериментальные исследования проводились в спокойных геомагнитных условиях при достаточно низкой амплитуде тока электроструи. Полученные в выполненных исследованиях результаты позволяют сформулировать следующие выводы, касающиеся свойств и особенностей генерации СНЧ-излучений при модификации высокоширотной ионосферы Земли мощными высокочастотными радиоволнами Х-поляризации, излучаемыми нагревным стэндом EISCAT-heating в поздние вечерние часы:

- эффективная генерация СНЧ-излучений в ионосферной плазме имеет место даже в очень спокойных геомагнитных условиях;
- характерный размер области регистрации СНЧ-излучений составляет порядка 400–600 км вдоль траектории движения микроспутника DEMETER;

– пространственное положение области регистрации максимального уровня СНЧ-сигналов, возбуждаемых в результате эффекта нелинейной демодуляции амплитудно-модулированной мощной радиоволны, в значительной мере определяется распределением фоновой концентрации плазмы;

– область регистрации низкочастотных сигналов, возбуждаемых при использовании двух немодулированных волн накачки с расстройкой по частоте, имеет неоднородную пространственную структуру со смещенной относительно центра области нагрева в северном направлении на расстояние порядка 100 км зоной наибольшей интенсивности излучения;

– амплитуда напряженности электрического поля  $E_x$  СНЧ-излучений на высотах внешней ионосферы Земли составляет 50–330 мкВ/м.

Пространственные характеристики области регистрации СНЧ-излучений на высотах верхней ионосферы Земли, генерируемых по традиционной схеме, соответствуют результатам экспериментов,

выполненных на нагревном стенде HAARP [17]. Полученные уровни напряженности электрического поля СНЧ-излучений также соответствуют результатам измерений в экспериментах HAARP-DEMETER даже с учетом того, что эффективная мощность излучения стенда HAARP более чем в два раза превосходила величину  $P_{eff}$  для стенда EISCAT-heating.

Представленные данные in-situ измерений характеристик СНЧ-излучений, возбуждаемых при воздействии на ионосферу двух высокочастотных волн накачки, имеющих расстройку по частоте, в целом соответствуют результатам численного моделирования и ранее выполненных наземных измерений. Зарегистрированные здесь значения напряженности электрического поля СНЧ-излучений оказались сопоставимы с величинами по традиционной схеме генерации даже при неоптимальной комбинации параметров воздействия.

*Автор выражает благодарность Фролову В.Л. и Благовещенской Н.Ф. за предоставленные исходные данные, полезные дискуссии и замечания.*

### Список литературы

1. Radiation effects on satellites during extreme space weather events / A.D.P. Hands [et al.] // Space Weather. 2018. Vol. 16, no. 9. P. 1216–1226. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018SW001913>
2. Baker D.N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to Space Weather // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28, no. 6. P. 2007–2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/27.902228>
3. Helliwell R.A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford: Stanford Univ. Press, 1965. 368 p.
4. Helliwell R.A. VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica // Rev. Geophys. 1988. Vol. 26, no. 3. P. 551–578. DOI: <https://doi.org/10.1029/RG026i003p00551>
5. Controlled precipitation of radiation belt electrons / U.S. Inan [et al.] // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108, no. A5. P. 1186–1–6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
6. Обнаружение комбинационных частот при взаимодействии мощного коротковолнового излучения с ионосферной плазмой / Г.Г. Гетманцев [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, № 4. С. 229–232.
7. The characteristics of ionospheric heating-produced ELF/VLF waves over 32 hours / M.T. Rietveld [et al.] // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92, no. A8. P. 8707–8722. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA092iA08p08707>
8. Jin G., Spasojevic M., Inan U.S. Relationship between electrojet current strength and ELF signal intensity in modulated heating experiments // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114, no. A8. P. A08301–1–9. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JA014122>
9. Излучение искусственных сверхсветовых неоднородностей нижней ионосферы / Л.Ф. Мироненко [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 3. С. 298–309. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1998/3/298>
10. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources / M.B. Cohen [et al.] // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117, no. A12. P. A12310–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JA018140>
11. Introduction to ionospheric heating at Tromsø – I. Experimental overview / M.T. Rietveld [et al.] // J. Atmos. Terr. Phys. 1993. Vol. 55, no. 4–5. P. 577–599. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(93\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90007-L)
12. ELF and VLF wave generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere / P. Stubbe [et al.] // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. Vol. 44, no. 12. P. 1123–1131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90023-X)
13. The Demeter microsatellite and ground segment / T. Cussac [et al.] // Planet. Space Sci. 2006. Vol. 54, no. 5. P. 413–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.013>
14. Bilitza D. International reference ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. Vol. 36, no. 2. P. 261–275. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000RS002432>
15. Piddychiy D. Propagation of ELF waves generated by an HF ionospheric heater in the Earth's plasma environment. Dis. D. Ph. Stanford Univ., 2012. 160 p.
16. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources / M.B. Cohen [et al.] // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117, no. A12. P. A12310–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JA018140>
17. DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater / D. Piddychiy [et al.] // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, no. A10. P. A10308–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JA013208>

## References

1. Hands A.D.P. et al. Radiation effects on satellites during extreme space weather events. *Space Weather*, 2018, vol. 16, no. 9, pp. 1216–1226. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018SW001913>
2. Baker D.N. The occurrence of operational anomalies in spacecraft and their relationship to Space Weather. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, vol. 28, no. 6, pp. 2007–2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/27.902228>
3. Helliwell R.A. *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford: Stanford Univ. Press, 1965, 368 p.
4. Helliwell R.A. VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica. *Rev. Geophys.*, 1988, vol. 26, no. 3, pp. 551–578. DOI: <https://doi.org/10.1029/RG026i003p00551>
5. Inan U.S. et al. Controlled precipitation of radiation belt electrons. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. A5, pp. 1186–1–6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
6. Getmantsev G.G. et al. Detection of combination frequencies in the interaction of high-power short-wave radiation with ionospheric plasma. *Pis'ma v ZhETF*, 1974, vol. 20, no. 4, pp. 229–232. (In Russ.)
7. Rietveld M.T. et al. The characteristics of ionospheric heating-produced ELF/VLF waves over 32 hours. *J. Geophys. Res.*, 1987, vol. 92, no. A8, pp. 8707–8722. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA092iA08p08707>
8. Jin G., Spasojevic M., Inan U.S. Relationship between electrojet current strength and ELF signal intensity in modulated heating experiments. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, no. A8, pp. A08301–1–9. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009JA014122>
9. Mironenko L.F. et al. Radiation of artificial superluminal irregularities of the lower ionosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika*, 1998, vol. 41, no. 3, pp. 298–309. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1998/3/298> (In Russ.)
10. Cohen M.B. et al. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, no. A12, pp. A12310–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JA018140>
11. Rietveld M.T. et al. Introduction to ionospheric heating at Tromsø – I. Experimental overview. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, vol. 55, no. 4, pp. 577–599. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(93\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90007-L)
12. Stubbe P. et al. ELF and VLF wave generation by modulated HF heating of the current carrying lower ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1982, vol. 44, no. 12, pp. 1123–1131. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(82\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(82)90023-X)
13. Cussac T. et al. The Demeter microsatellite and ground segment. *Planet. Space Sci.*, 2006, vol. 54, no. 5, pp. 413–427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.013>
14. Bilitza D. International reference ionosphere 2000. *Radio Sci.*, 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000RS002432>
15. Piddychiy D. Propagation of ELF waves generated by an HF ionospheric heater in the Earth's plasma environment. Dis. D. Ph. Stanford Univ., 2012, 160 p.
16. Cohen M.B. et al. ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, no. A12, pp. A12310–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JA018140>
17. Piddychiy D. et al. DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, no. A10, pp. A10308–1–8. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JA013208>

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 4, pp. 53–62

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.4.53-62

Received 6 October 2021  
Accepted 8 November 2021

### Features of generation and propagation of the extremely low frequency waves excited in the ionosphere under the powerful HF radioemission influence

Alexey S. Belov 

Branch of RFNC-ARIEP «RIMS named after Yu.E. Sedakov»  
47, Tropinin Street,  
Nizhny Novgorod, 603137, Russia

**Abstract** – The experimental results of the extremely low frequency emission characteristics excited in the outer ionosphere under the ionospheric plasma heating by high-latitude EISCAT facility are presented. The experiments have been conducted in the period of 2006–2010 yr. using two main schemes of extremely low frequency generation including the impact of the heating facility amplitude modulated emission and two unmodulated pump waves with the frequency detuning. In-situ measurements of the plasma wave disturbances were performed at the outer ionosphere heights using on-board equipment of DEMETER microsatellite. In work the spatial, amplitude and spectral characteristics of the generated extremely low frequency emissions are determined. It is shown that the characteristic size of the extremely low frequency emission is about 400–600 km along the trajectory of the DEMETER microsatellite. The registration area spatial position is determined by both the applied generation scheme and the background plasma density distribution. The extremely low frequency emission electric field strength at the Earth's outer ionosphere heights is 50–330  $\mu\text{V/m}$ .

**Keywords** – low-frequency emissions; in-situ measurements; ionospheric heating.

---

## Информация об авторе

**Белов Алексей Сергеевич**, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, Россия.

*Область научных интересов:* радиофизика, прикладная электродинамика, активные воздействия на околоземную плазму.

*E-mail:* alexis-belov@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0533-3771>

## Information about the Author

**Alexey S. Belov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, deputy head of the Research Division – head of the Research Department, Branch of RFNC-ARIEP «RIMS named after Yu.E. Sedakov», Nizhny Novgorod, Russia.

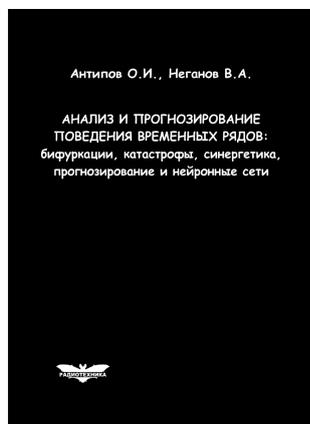
*Research interests:* radiophysics, applied electrodynamics, active impacts on the near-earth plasma.

*E-mail:* alexis-belov@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-0533-3771>

**Антипов, О.И.**

**Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети** / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с.



ISBN 978-5-88070-294-7

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

*Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.*