

УДК 550.388

СВЯЗЬ ДИНАМИКИ ПОЛЯРНОГО ЭЛЕКТРОДЖЕТА С АМПЛИТУДОЙ СЧ/ОНЧ СИГНАЛА ИОНОСФЕРНОГО ИСТОЧНИКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО МОДУЛИРОВАННОМУ НАГРЕВУ ИОНОСФЕРЫ

А. В. Ларченко^{1}, О. М. Лебедь¹, Н. Ф. Благовещенская², С. В. Пильгаев¹,
Е. Б. Бекетова³, Ю. В. Федоренко¹*

¹ Полярный геофизический институт, г. Апатиты;

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург;

³ Филиал Мурманского арктического государственного университета, г. Апатиты, Россия

В работе рассмотрены результаты эксперимента по нагреву полярной ионосферы мощным модулированным коротковолновым радиоизлучением, проводившегося ААНИИ в октябре 2016 года на стенде EISCAT/Heating. Приведены данные совместной обработки значений эквивалентного тока полярного электроджета над областью нагрева, восстановленного по данным сети наземных станций IMAGE, и амплитуд сигнала горизонтальной компоненты магнитного поля от ионосферного источника на частоте модуляции, зарегистрированного на сети высокоширотных станций ПГИ. Рассмотрены случаи, характеризующиеся тесной положительной корреляцией вариаций амплитуды магнитного поля с изменениями тока полярного электроджета. Показано, что на частоте модуляции 3017 Гц при смене направления тока с восточного на северное связь между изменениями последнего и магнитного поля практически исчезает. Проанализированы временные и пространственные вариации коэффициента линейной регрессии амплитуды горизонтальной компоненты магнитного поля по величине тока электроджета. При переходе от дневных условий к ночным, который сопровождается уменьшением тока электроджета, коэффициент регрессии возрастает, а при удалении точки наблюдения от нагревного стенда снижается.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии на ионосферу мощного модулированного радиоизлучения коротковолнового (КВ) диапазона на высотах D и E -слоёв ионосферы (80÷120 км) за счёт изменения электронной температуры возникает модуляция проводимости. В присутствии электрического поля конвекции в области модулированной проводимости происходит генерация переменных ионосферных токов на частоте модуляции. Эти токи излучают электромагнитные волны на той же частоте, которые затем обнаруживаются наземными приёмниками. Данный эффект детектирования ионосферой модулированной КВ радиоволны давно известен и называется эффектом Гетманцева [1]. Объяснение этому эффекту приведено в работе [2], где показано, что параметры генерируемых сигналов на частоте модуляции созданного таким образом ионосферного источника отражают как состояние ионосферы в области нагрева и вдоль трассы распространения, так и параметры токовой системы в области источника и, соответственно, электрического поля конвекции. Возможности прямых измерений поля конвекции достаточно ограничены и требуют сложных технических средств. Для этих целей, например, использовали радар STARE, с помощью которого методом триангуляции проводились измерения скоростей потоков ионосферной плазмы [3, 4]. В настоящее время активно развивается скандинавский проект EISCAT_3D [5], включающий развертывание трёх радаров, однако соответствующее оборудование ещё не установлено. Одним

* alexey.larchenko@gmail.com

из косвенных методов получения информации о поле конвекции является восстановление эквивалентного тока электроджета по данным сети наземных магнитометров [6–9]. В то же время, с помощью косвенных методов активно исследуется нижний D -слой ионосферы [10–12], на данный момент не поддающийся прямому зондированию. В этой ситуации результаты экспериментов по модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением также могут быть использованы для исследования D -слоя ионосферы и электрического поля конвекции на его высотах.

Авторы работы [13] ещё в 1977 году экспериментально показали, что в полярных широтах интенсивность излучения на комбинационной частоте зависит как от расстояния между полярным электроджетом и центром зоны активного воздействия в ионосфере, так и от силы тока в электроджете. Эффективность конверсии модулированных высокочастотных (ВЧ) сигналов в диапазонах сверхнизких частот (СНЧ) и очень низких частот (ОНЧ) сильно зависит от величины тока полярного электроджета в месте нагрева. В работе [14] проводились сравнения параметров СНЧ/ОНЧ сигнала ионосферного источника с предполагаемым направлением электрического поля электроджета, измеряемого с помощью аврорального радара STARE. В результате показано, что СНЧ/ОНЧ сигналы ионосферного источника могут представлять собой чувствительный индикатор ионосферного электрического поля. В работе [15] также рассматриваются взаимосвязи интенсивности генерируемых СНЧ/ОНЧ сигналов с данными об электрическом поле электроджета, риометрическом поглощении и наземных изменениях ΔH магнитного поля вдоль линии север–юг относительно значений этой компоненты в спокойных геомагнитных условиях. Авторами были установлены случаи тесной положительной корреляции амплитуды СНЧ/ОНЧ сигналов с напряжённостью электрического поля, с коэффициентом корреляции до 0,89, но при этом отмечались и случаи слабой корреляции. Коэффициент корреляции с ΔH менялся в пределах от $-0,23$ до $0,93$, в то время как корреляция с риометрическим поглощением имела преимущественно отрицательный характер. Авторы предположили, что отрицательная корреляция с риометрическим поглощением вызвана ослаблением электрического поля в области нагрева в периоды высокого поглощения.

В статье [16] приведены статистические данные одновременных наблюдений генерации СНЧ сигнала и величины ΔH , которая ассоциируется с компонентой тока электроджета вдоль линии восток–запад. Регистрация СНЧ сигнала проводилась только в одной точке наблюдения на расстоянии 37 км от нагревного стенда в ближней зоне ионосферного источника. Авторами показано, что на данном расстоянии в 73 % случаев амплитуда регистрируемого СНЧ сигнала превышает 0,15 пТл. Большие значения амплитуды сигнала (выше 1,5 пТл) в основном наблюдались во время усиления тока электроджета, хотя были отмечены и случаи регистрации таких амплитуд во время слабого электроджета. Отсюда следует, что относительное изменение амплитуды СНЧ сигнала на единицу изменения силы тока электроджета зависит от абсолютной величины силы тока. При слабом токе электроджета относительные изменения амплитуды СНЧ сигнала больше, чем при сильном. Авторы полагают, что такая зависимость вызвана изменениями во времени параметров ионосферы и эффективности ВЧ нагрева. Также в данной работе показано, что изменения амплитуды СНЧ сигнала имеют статистически значимую (с вероятностью ошибки менее 0,05) положительную корреляцию с величиной ΔH примерно в 55 % случаев и отрицательную корреляцию примерно в 15 %. Можно сделать вывод, что использование нагревных стендов для активного воздействия модулированным КВ радиоизлучением на ионосферную плазму в период существования полярного электроджета позволяет отслеживать его динамику и получать информацию о поле конвекции и состоянии ионосферы на высотах D -слоя.

В данной работе мы рассмотрим результаты наблюдений на высокоширотной сети станций Полярного геофизического института ОНЧ-сигналов низкочастотного ионосферного источника, образованного в результате нагрева ионосферы мощным модулированным КВ радиоизлучением

стенда EISCAT/Heating, и проведём совместный анализ амплитуд зарегистрированных низкочастотных сигналов и тока полярного электроджета над нагревным стендом. В качестве последнего мы будем использовать эквивалентный ионосферный ток, восстановленный по измерениям магнитного поля на сети магнитометров IMAGE [8, 9, 17].

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

1.1 Режим работы нагревного стенда

В работе обсуждаются данные, полученные в ходе нагревного эксперимента 24, 25 и 26 октября 2016 года в АНИИ на стенде EISCAT/Heating (г. Тромсё, Норвегия). 24 и 26 октября воздействие на ионосферу мощной амплитудно-модулированным КВ радиоизлучением необыкновенной поляризации (X-мода) на частоте 4040 кГц проводилось циклами, состоящими из периодов нагрева на частотах модуляции 1017; 1617; 2017 и 3017 Гц по 10 мин с последующей 5 минутной паузой. 25 октября режим нагрева был другим. С 15 до 17 часов всемирного времени (UT), начиная с 1-й минуты часа, происходило ступенчатое изменение частоты модуляции по схеме 1017; 1617; 1817; 2017 и 3017 Гц (по 5 мин на каждой частоте и 5 мин пауза). Более подробное описание эксперимента и его первые результаты приведены в работе [18].

В данной работе мы ограничились рассмотрением одного дня эксперимента 25 октября 2016 года. В этот день воздействие на ионосферу мощным модулированным КВ радиоизлучением было наиболее длительным успешно проведены 4 цикла нагрева, в то время как 24 и 26 октября было проведено всего два цикла нагрева, к тому же сигналы на станциях 26 октября были сильно зашумлены. Эффективная мощность излучения фазированной антенной решётки в направлении магнитного зенита в этот период составляла 140 МВт. Угол между направлением на максимум основного лепестка диаграммы излучения стенда и направлением в зенит составлял 12° в направлении на юг. При высоте области нагрева 85 км [19] ионосферный источник был расположен на расстоянии 18 км к югу от нагревного стенда (рис. 1).

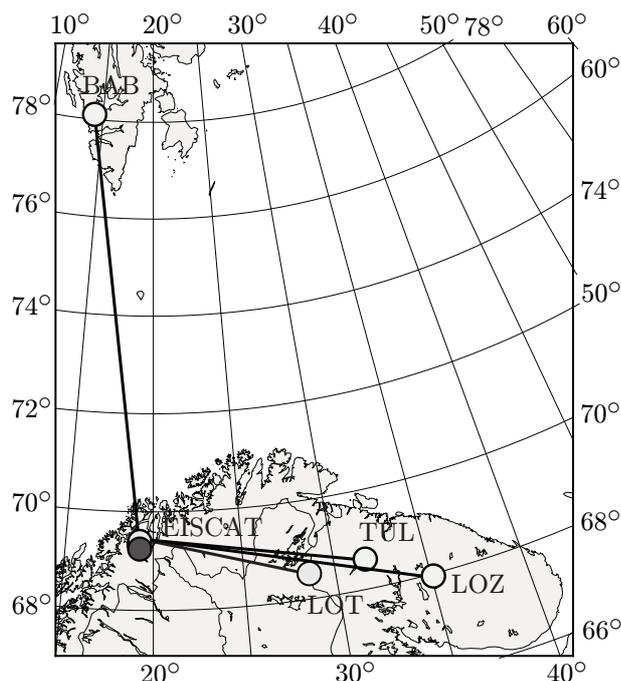


Рис. 1. Расположение нагревного стенда EISCAT/Heating и станций регистрации: «Лотта» (LOT), «Верхнегуломский» (TUL), «Ловозеро» (LOZ) и «Баренцбург» (BAB). Тёмным кругом отмечено положение области ионосферного источника. Расстояние от стенда до станций LOT, TUL, LOZ и BAB составляет 395; 509; 661 и 946 км соответственно

1.2 Регистрация сигналов ионосферного источника

Регистрация низкочастотных сигналов на частоте модуляции мощного КВ радиоизлучения осуществлялась одновременно на сети станций «Лотта» (LOT; 68,503° с. ш. 28,6202° в. д.), «Верх-

нетуломский» (TUL; 68,592° с. ш., 31,755° в. д.), «Ловозеро» (LOZ; 67,975° с. ш., 35,082° в. д.) и «Баренцбург» (BAV; 78,093° с. ш., 14,208° в. д.). Их расположение приведено на рис. 1. Из него видно, что материковые станции LOT–TUL–LOZ расположены практически на одной линии распространения сигнала от ионосферного источника. Во всех точках наблюдения были установлены цифровые ОНЧ-приёмники, позволяющие регистрировать две горизонтальные магнитные и вертикальную электрическую компоненты поля с частотой дискретизации 32 кГц [20, 21]. Для оценки амплитуд сигналов ионосферного источника использовались только данные регистрации горизонтальных магнитных компонент.

Калибровка аппаратуры была выполнена с помощью разработанного в ПГИ генератора сигналов специальной формы [22], позволяющего с высокой точностью измерить амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики измерительных каналов ОНЧ-приёмников. Измерения проводились с помощью тороидальной катушки с воздушным сердечником, через которую были продеты рамочные антенны. С выхода генератора на клеммы катушки через резистор подавался калибровочный сигнал, создающий в обмотке ток известной величины, и рассчитывался магнитный поток через плоскость рамочной антенны. С большой степенью точности можно предполагать, что калибровочное магнитное поле полностью сконцентрировано внутри сечения тора, а измеряемое поле ОНЧ-волн однородно по площади антенны. Значение напряжённости однородного магнитного поля, пересекающего плоскость антенны, определялось из отношения площадей сечения тора и рамочной антенны.

Обработка данных измерений компонент магнитного поля проводилась в два этапа. На первом этапе в соответствии с расписанием работы нагревного стенда выделялись участки записи, соответствующие периодам генерации модулированного КВ радиоизлучения. Затем для каждого периода генерации по записям на станциях компонент B_x и B_y магнитного поля строились зависимости амплитуды сигнала на частоте модуляции от времени. Последние нормировались на передаточные характеристики соответствующих измерительных каналов и рассчитывалась амплитуда горизонтального магнитного поля

$$|B_h| = \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2}.$$

1.3. Ток полярного электроджета по измерениям на сети станций IMAGE

Как уже говорилось выше, в данной работе мы полагаем, что вариации электрического поля конвекции в области нагрева ионосферы связаны с изменениями тока полярного электроджета. Для исследования его динамики мы использовали эквивалентный ток ионосферы, восстановленный по измерениям компонент геомагнитного поля на сети наземных магнитометров IMAGE [17]. Под эквивалентным током понимается бесконечно тонкий лист тока, расположенный на высоте 100 км от земной поверхности и создающий магнитное поле, эквивалентное наблюдаемому на сети наземных магнитометрических станций [8, 9]. Получаемые таким путём данные представляют собой двумерные картины векторного поля эквивалентного тока.

В работе [16] для оценки тока электроджета использовалось геомагнитное поле, измеренное в одной точке. Оно является интегралом от распределённого по пространству тока и поэтому вряд ли хорошо описывает токовую систему над областью нагрева. Мы предполагаем, что, в отличие от оценок с использованием величины ΔH , измеренной в одной точке, использованная в настоящей работе оценка тока электроджета над областью нагрева по данным сети IMAGE более точна. Далее мы обсудим связь эквивалентного тока ионосферы, текущего над предполагаемым низкочастотным ионосферным источником, с измерениями величины низкочастотного горизонтального магнитного поля этого источника на сети наземных станций.

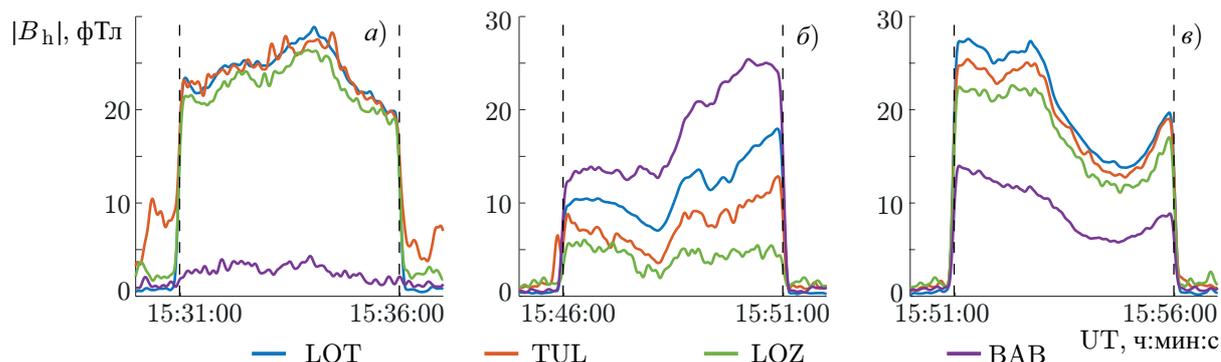


Рис. 2. Амплитуды зарегистрированных на станциях сигналов на частотах модуляции 1 017 Гц (а), 2 017 Гц (б) и 3 017 Гц (в) в периоды нагрева

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

По данным регистрации компонент электромагнитного поля на сети станций ПГИ были рассчитаны амплитуды горизонтального магнитного поля во всех четырёх циклах нагрева на всех частотах модуляции ВЧ излучения стенда. Для наглядной оценки качества данных на рис. 2 для примера приведены изменения величины $|B_h|$ во втором цикле нагрева на нескольких частотах модуляции. Время начала и окончания генерации стендом модулированного ВЧ излучения обозначено вертикальными штриховыми линиями.

На всех приведённых здесь частотах на всех станциях ясно видна разница в амплитудах сигналов во время работы нагревного стенда и во время его выключения, показывающая высокое отношение сигнал/шум. Стоит отметить, что вблизи частоты 1 017 Гц на станции TUL присутствует помеха индустриального характера, вызванная изменяющимися во времени частотами гармоник линий сети электропередач, которая, однако, не изменила форму $|B_h|$ во время работы. На станции VAB на частоте 1 017 Гц значения $|B_h|$ малы по сравнению с измеренными на других станциях и отношение сигнал/шум (см. рис. 2) несколько меньше.

На частоте 1 017 Гц (см. рис. 2), лежащей ниже частоты первого поперечного резонанса f_{r1} , где сигнал может распространяться в волноводе Земля–ионосфера только на TEM-моду, зарегистрированы близкие по величине амплитуды сигналов вне зависимости от удалённости точки наблюдения от нагревного стенда. Этот факт, вероятно, свидетельствует об особенностях возбуждения ионосферным источником TEM-моды, структура поля которой отличается от структуры поля других мод волновода Земля–ионосфера. Частота первого поперечного резонанса определяется как $f_{r1} = c/(2h)$, где c — скорость света в вакууме, h — эффективная высота нижней границы ионосферы. Типичная эффективная высота ионосферы во время эксперимента составляет величину около $80 \div 85$ км, что даёт $f_{r1} \approx 1\,800$ Гц.

Из данных трёх материковых станций, расположенных вдоль трассы EISCAT–LOZ, следует, что ослабление сигнала с расстоянием на частоте 2 017 Гц значительно больше, чем на частоте 3 017 Гц. Объяснение этого факта может быть следующим. Распространение сигнала происходит над низкопроводящей (с удельной проводимостью $\sigma = 10^{-5}$ См/м) земной поверхностью [23], амплитудные коэффициенты отражения от которой составляют примерно $R = 0,85$ как для частоты 2 017 Гц, так и для 3 017 Гц. Для распространения в волноводе фазы волн, многократно отражённых от верхней и нижней границ волновода, должны совпадать, что приводит к условию $2hk \cos \theta = 2\pi m$, где $k = \omega/c$, θ — угол падения волны, ω — круговая частота волны, m — номер моды. Отсюда следует, что при эффективной высоте ионосферы 80 км распространяющаяся от EISCAT до LOZ волна испытывает не менее 12 отражений от земной поверхности на

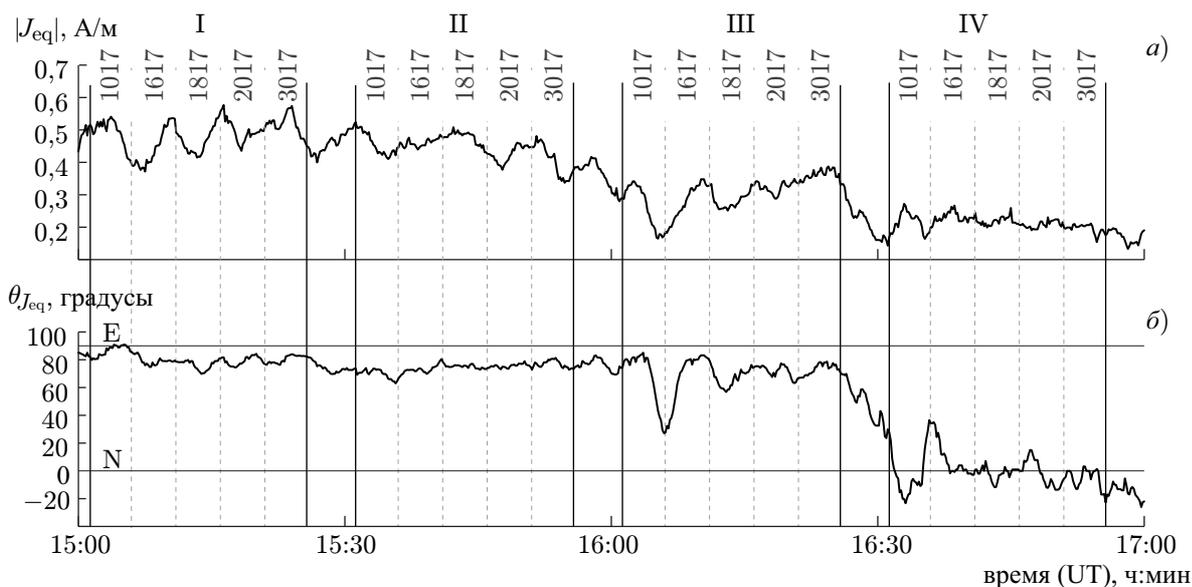


Рис. 3. Модуль (а) и направление (б) эквивалентного тока в точке над областью ионосферного источника

частоте 2017 Гц с углом $\theta = 21^\circ$ и только 4 отражения на частоте 3017 Гц с $\theta = 52^\circ$, что ведёт к уменьшению амплитуд на частотах 2017 и 3017 Гц на $R^{(12)} = 17$ дБ и на $R^{(4)} = 5,7$ дБ соответственно. Кроме коэффициента отражения от земной поверхности, на затухание сигналов при распространении также влияет коэффициент отражения от анизотропной верхней стенки волновода Земля–ионосфера, который контролируется состоянием ионосферы и зависит от угла падения. При углах падения, близких к углу наклона силовых линий статического магнитного поля Земли, он существенно меньше у правополяризованных волн, в то время как у левополяризованных волн он может принимать значения, близкие к единице, что ведёт к преобладанию левой поляризации горизонтальной компоненты магнитного поля на земной поверхности. Можно ожидать, что этот эффект будет более ярко выражен на частоте 2017 Гц [24] и гораздо слабее на частоте 3017 Гц из-за больших значений угла падения. В рассматриваемом случае (см. рис. 2) измеренное горизонтальное магнитное поле на материковых станциях обладало небольшой круговой поляризацией, изменяющейся между правой и левой. Отсюда следует, что коэффициенты отражения правополяризованных и левополяризованных волн от ионосферы были примерно равны, а большее число отражений на частоте 2017 Гц привело к большему ослаблению сигнала с расстоянием по сравнению с частотой 3017 Гц.

Интересно заметить, что амплитуда $|B_h|$ наблюдаемой на станции ВАВ на частоте 2017 Гц горизонтальной компоненты магнитного поля иногда выше, чем на материковых станциях, расположенных ближе к нагревному стенду, и выше, чем зарегистрированная здесь же величина $|B_h|$ на частоте 3017 Гц. При этом было установлено, что горизонтальное магнитное поле на частоте 2017 Гц на станции ВАВ было полностью левополяризованным. Этот факт можно объяснить тем, что левополяризованные волны при соответствующем состоянии нижней ионосферы могут испытывать весьма малое затухание при распространении в волноводе Земля–ионосфера, особенно при прохождении над высокопроводящей морской поверхностью ($\sigma \approx 5$ См/м) с коэффициентом отражения от неё, близким к единице. К тому же у диаграммы излучения холловского тока при направлении электрического поля на север один из максимумов также расположен в направлении на север, где и находится станция ВАВ. По-видимому, поэтому амплитуда $|B_h|$ по данным наблюдений на станции ВАВ иногда выше, чем на материковых станциях, расположен-

ных в направлении на восток от ионосферного источника.

Важно, что во время нагрева во всех приведённых случаях обнаруживаются сильные вариации амплитуды зарегистрированных сигналов. Так, на частотах 2017 и 3017 Гц наблюдаются изменения величины $|B_h|$ более чем в 2 раза за 5 мин. Из-за малой величины рассматриваемых временных интервалов сложно объяснить настолько значительные вариации амплитуды быстрыми изменениями параметров волновода Земля–ионосфера. Можно утверждать, что вариации амплитуд вызваны изменениями конфигурации ионосферного источника, а именно изменениями величины и направления горизонтального электрического поля в области нагрева, что может быть использовано для исследований физических процессов в этой области.

На рис. 3 приведены вариации амплитуды и направления эквивалентного тока J_{eq} над областью ионосферного источника. Римскими цифрами сверху обозначены порядковые номера циклов нагрева. Вертикальными сплошными линиями отмечены начало и окончание каждого цикла, штриховыми — времена переключения частоты модуляции. Серым шрифтом приведены значения частот модуляции (в герцах), соответствующие отмеченным временным интервалам. Из рисунка видно, что большую часть времени эксперимента (первые три цикла) ток электроджета над областью источника направлен преимущественно в восточном направлении. В эти три цикла ток электроджета плавно снижался. В четвёртом цикле нагрева в связи с приближением разрыва Харанга (перехода от восточного к западному электроджету) наблюдается более быстрое ослабление величины эквивалентного тока и изменение его направления на северное.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При сравнении изменений величины $|B_h|$ с вариациями восстановленного эквивалентного ионосферного тока $|J_{eq}|$ было обнаружено, что вариации этих величин положительно коррелируют. Так, количество случаев связи $|J_{eq}|$ и $|B_h|$ с коэффициентом линейной корреляции $r > 0,8$ составило около 38 % от их общего числа (80), включающего данные регистрации на всех станциях (LOT, TUL, LOZ, VAB) во всех циклах нагрева (I–IV) на всех частотах модуляции (1017; 1617; 1817; 2017; 3017 Гц). Случаи менее выраженной корреляции или вовсе её отсутствия можно объяснить отклонением локализации электрического поля в области нагрева, которая расположена на высоте около 85 км [19], от локализации вариаций электрического поля в области максимума тока электроджета (высота 100 км).

Наиболее явно связь между вариациями амплитуды $|B_h|$ и эквивалентным током выражена на частоте 3017 Гц. Тесная корреляция между этими величинами наблюдалась в следующих друг за другом первых трёх циклах нагрева на всех станциях, что дало возможность исследовать как временные, так и пространственные закономерности поведения сравниваемых величин. На рис. 4 приведены вариации амплитуды $|B_h|$ на частоте 3017 Гц на всех станциях, амплитуда эквивалентного ионосферного тока над ионосферным источником и коэффициенты корреляции r этих величин. На нижней панели показаны амплитуды и направления вектора эквивалентного тока в соответствующих циклах нагрева по данным сети IMAGE. Из рисунка следует, что в первых трёх циклах нагрева на всех четырёх станциях наблюдаются схожие по форме вариации $|B_h|$ и $|J_{eq}|$. Направление эквивалентного тока при этом близко к восточному, а его величина меняется в пределах $0,35 \div 0,56$ А/м. В четвёртом цикле нагрева происходит значительное ослабление амплитуды сигнала по сравнению с первыми тремя циклами, совпадающее с ослаблением величины эквивалентного тока до $0,17 \div 0,21$ А/м, что, по-видимому, связано с приближением разрыва Харанга к области нагрева. Связь вариаций амплитуды $|B_h|$ с эквивалентным током электроджета в этом цикле также исчезает.

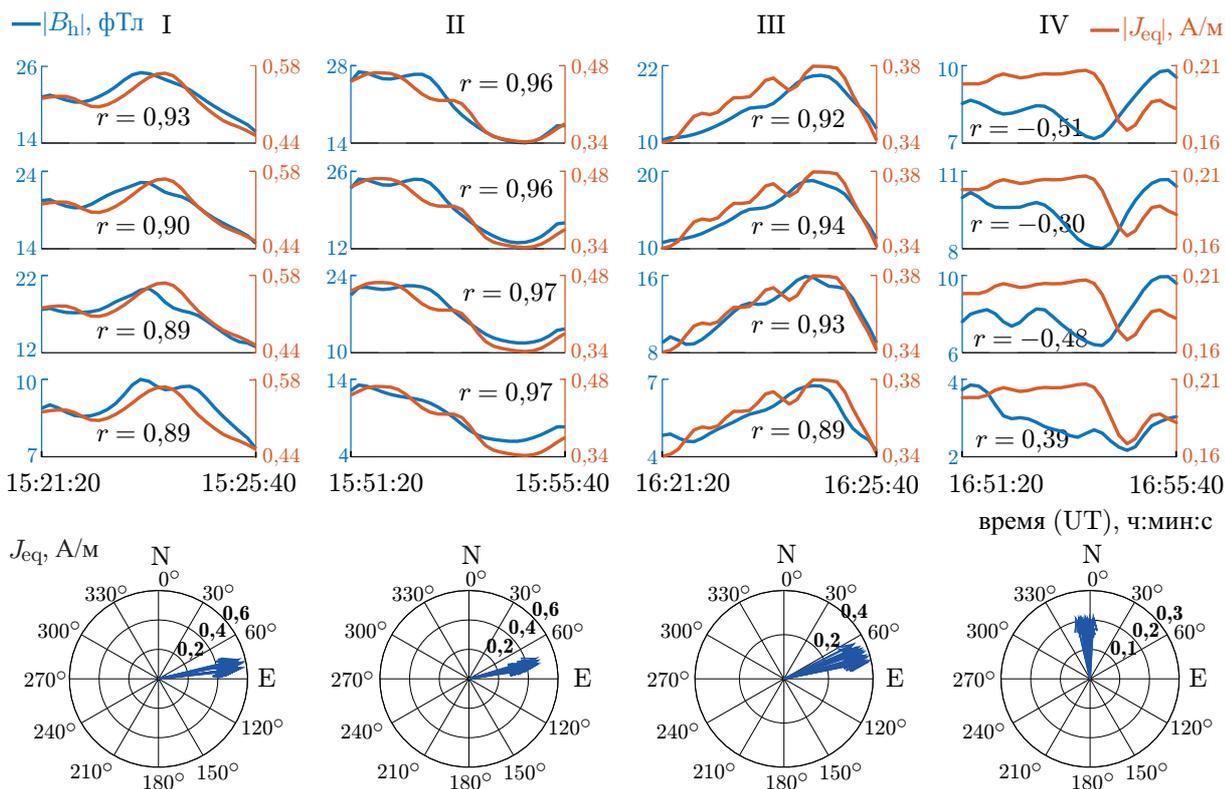


Рис. 4. Вверху показаны вариации амплитуды $|B_h|$ (синий цвет) на частоте 3017 Гц и значения эквивалентного ионосферного тока $|J_{eq}|$ (оранжевый цвет) над ионосферным источником на станциях LOT (строка 1), TUL (2), LOZ (3) и BAB (4). Внизу — вектор эквивалентного ионосферного тока в географической системе координат

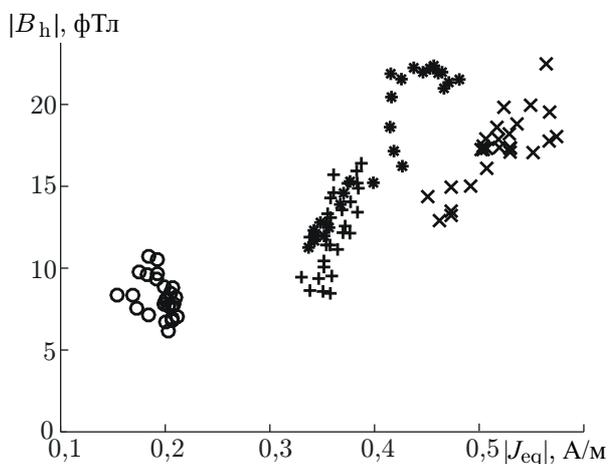


Рис. 5. Зависимость амплитуды сигнала ионосферного источника, зарегистрированного на станции LOZ, от эквивалентного тока над областью нагрева для циклов I (символ \times ; 15:21–15:26 UT), II ($*$; 15:51–15:56 UT), III ($+$; 16:21–16:26 UT) и IV (o ; 16:51–16:56 UT)

$= \alpha + \beta |J_{eq}|$, и получили коэффициенты линейной регрессии β , описывающие наклон аппроксимационной прямой. На рис. 6 приведены зависимости $|B_h|$ от $|J_{eq}|$ для каждой точки наблюдения,

С целью выявления связи между $|B_h|$ и $|J_{eq}|$ мы построили зависимости $|B_h|$ от $|J_{eq}|$. На рис. 5 показана такая зависимость для всех четырёх циклов нагрева, отвечающая данным регистрации на станции LOZ. По нашему мнению, приведённая зависимость хорошо иллюстрирует возрастание амплитуды сигнала с увеличением эквивалентного тока, что уже было отмечено в ряде работ [13, 15, 16]. На остальных станциях зависимости $|B_h|(|J_{eq}|)$ вели себя аналогично изменениям амплитуды $|B_h|$ на станции LOZ, показанным на рис. 5.

Наличие тесной корреляции $|B_h|$ и $|J_{eq}|$ в первых трёх циклах нагрева и значимые изменения наблюдаемых величин позволили нам провести аналогичный применённому в [16] регрессионный анализ. Для данных каждой станции мы с помощью метода наименьших квадратов провели линейную аппроксимацию амплитуды $|B_h|$, $|B_h| =$

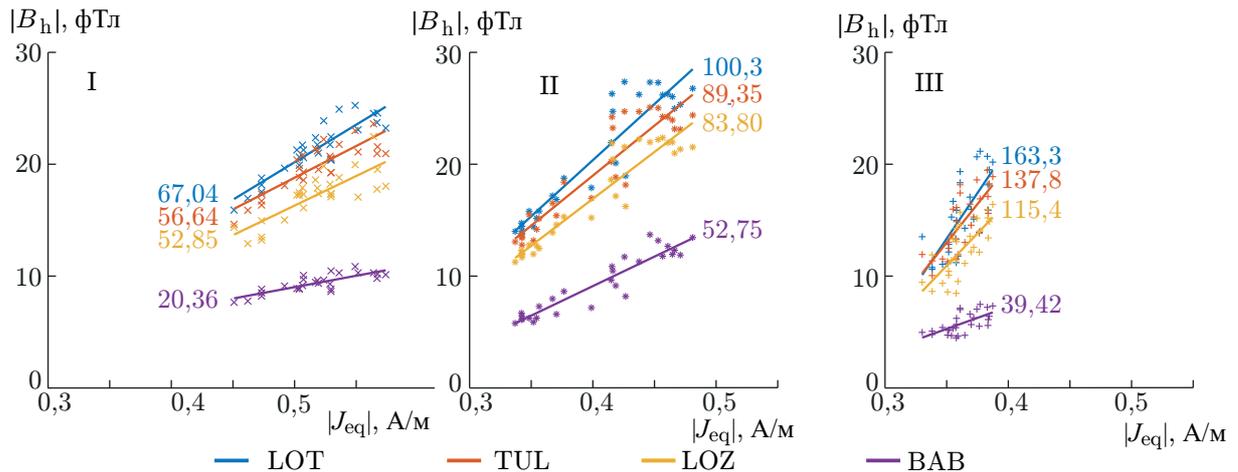


Рис. 6. Зависимости $|B_h|$ от $|J_{eq}|$ по данным регистрации сигналов ионосферного источника на каждой станции в первых трёх циклах нагрева и соответствующие им значения β

аппроксимирующие прямые и соответствующие им коэффициенты регрессии β . Из рис. 6 видно, что изменения коэффициентов β обнаруживаются как с вариацией расстояния точки наблюдения от области ионосферного источника, так и от цикла к циклу. С течением времени средняя за период генерации величина $|J_{eq}|$ снижается и вместе с тем на всех станциях возрастает β . Исключение составляет точка регистрации на станции ВАВ, где в третьем цикле нагрева коэффициент регрессии по сравнению со вторым циклом снижается.

Ранее авторами [16] была обнаружена аналогичная зависимость величины относительного изменения амплитуды сигнала ионосферного источника на единицу изменения силы тока электроджета от абсолютной величины силы тока. Они связывают наблюдаемый эффект с тем, что во время сильного электроджета в области нагрева за счёт высыпания авроральных частиц возрастает электронная концентрация N_e . Однако в работе [18] было показано, что электромагнитное поле, возбуждаемое ионосферным источником, находящимся на высоте около 85 км, практически отсутствует на высотах 90–100 км, где в основном происходят изменения концентрации N_e за счёт высыпаний при полярных сияниях. Поэтому логично предположить, что влияние высыпаний на конфигурацию ионосферного источника пренебрежимо мало. В нашем случае в области нагрева и на трассах распространения сигналов от ионосферного источника до точек регистрации происходит изменение состояния ионосферы, связанное с прохождением терминатора, и, соответственно, уменьшением величины N_e в области нагрева. Поэтому наблюдаемый эффект изменения (возрастания) коэффициентов регрессии от цикла к циклу можно скорее связать с изменениями профиля N_e в области нагрева за счёт прохождения терминатора, а не с влиянием высыпаний авроральных частиц.

При прочих равных условиях во всех трёх циклах нагрева обнаруживается уменьшение коэффициента β с увеличением расстояния от области источника до точки регистрации. Возможно, эти изменения объясняются неравномерностью диаграммы направленности излучения ионосферного источника в вертикальной плоскости и особенностями возбуждения и наложения мод волновода Земля–ионосфера.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследований связи амплитуды горизонтального магнитного поля низкочастотного ионосферного источника в эксперименте по нагреву ионосферы мощным

модулированным КВ радиоизлучением стенда EISCAT/Heating с величиной тока полярного электроджета.

В отличие от встречающихся в литературе исследований, где проводились сравнения амплитуды сигнала ионосферного источника с данными наземных измерений ΔH компоненты геомагнитного поля вблизи нагревного стенда, в данной работе впервые привлечены данные о величине эквивалентного ионосферного тока, восстановленного по данным сети наземных магнитометров. Показано, что вариации амплитуды сигнала ионосферного источника и восстановленного по данным сети IMAGE эквивалентного ионосферного тока связаны. Приблизительно в 38 % случаев наблюдается тесная корреляция ($r > 0,8$) между вариациями амплитуды сигнала и величины ионосферного тока.

Впервые в исследованиях зависимости амплитуды сигнала ионосферного источника от величины тока полярного электроджета были использованы данные нескольких станций регистрации, что позволило оценить не только временные, но и пространственные зависимости наблюдаемых величин. Для частоты 3017 Гц в трёх следующих друг за другом циклах нагрева проведены оценки коэффициента линейной регрессии амплитуды горизонтального низкочастотного магнитного поля по величине тока электроджета. Обнаружено, что коэффициент линейной регрессии увеличивается при переходе от дневных условий к ночным и одновременном уменьшении тока электроджета. Основываясь на ранее проведённых исследованиях [18], мы полагаем, что наблюдаемый эффект изменения коэффициентов регрессии вызван изменениями профиля N_e в области нагрева за счёт прохождения терминатора, а не влиянием высыпаний авроральных частиц. При прочих равных условиях с ростом расстояния от нагревного стенда до точки наблюдения коэффициент регрессии снижается, что, возможно, вызвано неравномерностью диаграммы направленности излучения ионосферного источника в вертикальной плоскости и особенностями возбуждения и наложения мод волновода Земля–ионосфера.

Данная работа представляет результаты эксперимента, которые могут быть использованы в исследованиях, направленных на объяснение приведённых в данной работе закономерностей при помощи численного моделирования процессов генерации ОНЧ волн при модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением и их распространения в волноводе Земля–ионосфера.

Авторы выражают благодарность Европейской научной Ассоциации EISCAT и институтам, поддерживающим сеть магнитометров IMAGE, а также сотрудникам обсерваторий ПГИ «Ловозеро», «Верхнегуломский» и «Баренцбург» за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гетманцев Г. Г., Зуйков Н. А., Котик Д. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, № 4. С. 229.
2. Котик Д. С., Трахтенгерц В. Ю. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 21, № 2. С. 114.
3. Greenwald R. A., Weiss W., Nielsen E., et al. // Radio Science. 1978. V. 13, No. 6. P. 1021.
4. Nielsen E., Bruns M., Pardowitz I., et al. // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, No. 1. P. 21.
5. URL: <https://www.eiscat.se/eiscat3d>.
6. Kamide Y., Richmond A. D., Matsushita S. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, No. A2. P. 801.
7. Haines G. V. // Computers & Geosciences. 1988. V. 14, No. 4. P. 413.
8. Amm O., Viljanen A. // Earth, Planets and Space. 1999. V. 51, No. 6. P. 431.
9. Pulkkinen A., Amm O., Viljanen A. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, No. A2. Art. no. 1053.
10. Fejer J. A. // J. Atmos. Terr. Phys. 1970. V. 32, No. 4. P. 597.
11. Newman D. B., Ferraro A. J. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, No. 13. P. 2442.
12. Mathews J. D., Breakall J. K., Ganguly S. // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, No. 5. P. 441.

13. Капустин И. Н., Перцовский Р. А., Васильев А. Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25, № 5. С. 248.
14. Rietveld M. T., Kopka H., Nielsen E., et. al. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, No. A3. P. 2140.
15. Rietveld M. T., Mauelshagen H.-P., Stubbe P., et. al. // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, No. A8. P. 8707.
16. Jin G., Spasojevic M., Inan U.S. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A8. Art. no. A08301.
17. Tanskanen E. I. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. A5. Art. no. A05204.
18. Лебедь О. М., Федоренко Ю. В., Благовещенская Н. Ф. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 6. С. 751.
19. Lehtinen N. G., Inan U.S. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. A6. Art. no. A06301.
20. Ларченко А. В., Лебедь О. М., Федоренко Ю. В. // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60, № 8. С. 793.
21. Пильгаев С. В., Ларченко А. В., Филатов М. В. и др. // Тр. Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 32, № 6. С. 113.
22. Пильгаев С. В., Ларченко А. В., Филатов М. В. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 49.
23. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A. A. // Earth, Planets and Space. 2002. V. 54, No. 5. P. 535.
24. Fedorenko Yu., Tereshchenko E., Pilgaev S., et al. // Radio Sci. 2014. V. 49, No. 12. P. 254.

Поступила в редакцию 25 июня 2019 г.; принята в печать 30 июля 2019 г.

**RELATIONSHIP BETWEEN THE POLAR ELECTROJET DYNAMICS
AND THE ELF/VLF SIGNAL AMPLITUDE OF THE IONOSPHERIC SOURCE
IN THE MODULATED IONOSPHERIC HEATING EXPERIMENT**

*A. V. Larchenko, O. M. Lebed', N. F. Blagoveshchenskaya, S. V. Pilgaev, E. B. Beketova, and
Yu. V. Fedorenko*

We consider the results of the experiment on the polar ionosphere heating by a high-power modulated HF wave conducted by the AARI at the EISCAT/heating facility in October 2016. The data on joint processing of the values of the equivalent polar electrojet current above the heated ionosphere region recovered by the IMAGE network of ground-based stations and the amplitudes of a signal of the horizontal component of the magnetic field from an ionospheric source at the modulation frequency recorded at the PSI network of high-latitude stations are presented. The events with a strong positive correlation between the magnetic field amplitude variations and the polar electrojet current variations are considered. It is shown that if the direction of the current changes from eastward to northward, correlation between the current variations and magnetic field variations almost disappears at a modulation frequency of 3017 Hz. Temporal and spatial variations of the coefficient of linear regression of the amplitude of the horizontal component of the magnetic field with respect to the electrojet current are analyzed. In the transition from day to night, which is accompanied by the electrojet current decrease, the regression slope increases, and it decreases with increasing distance between the heater and the observation point.