

УДК 551.594.51

© 1994 г. А. В. Кустов, Дж. Келлер, Г. Софко,  
Д. Данскин, М. МакКиббен, Я. И. Фельдштейн,  
Л. И. Громова, А. Е. Левитин

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И РАДИОСИЯНИЯ В СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

Представлены данные регистрации радиосияний на частоте 50 МГц в северной полярной шапке в околополуденные часы. Эхо наблюдались при комбинации компонент ММП  $B_z > 0$  и  $B_y < 0$  и при необычайно интенсивных магнитных возмущениях. Показано, что появление эхо связано с рядом причин, среди которых отмечены следующие: усиление напряженности электрического поля в ионосфере, проводимости плазмы, ионосферной рефракции в «наклонном»  $E$ -слое, интенсивности продольных токов, связывающих магнитосферу с ионосферой.

### Введение

Недавние наблюдения УКВ-радиосияний в полярной шапке южного полушария на широтах более  $80^\circ$  показали тесную корреляцию их возникновения с изменением параметров межпланетного магнитного поля (ММП) [1—3]. Было установлено, что при положительных значениях  $B_z$ -компоненты ММП радиосияния возникают на больших широтах, чем при отрицательных значениях [1, 2]. Сведения о характере их зависимости от  $B_z$ -компоненты ММП противоречивы. В работе [1] сообщалось, что при  $B_z > 0$  радиосияния предпочтительно наблюдаются при  $B_y < 0$ , тогда как, согласно [2], сигналы значительно чаще существуют при  $B_y > 0$ . В последней работе отмечалась корреляция появления радиосияний и сильных электрических полей, контролируемых  $B_z$ -компонентой ММП.

Принципиальным отличием экспериментов [1—3] является значительное различие ракурсных углов в точках наблюдения. В измерениях [2, 3] ракурсные условия были хорошими для появления рассеянных сигналов (углы  $0$ — $2^\circ$ ). Данные этих наблюдений могут быть удовлетворительно объяснены с позиций теории неустойчивости тока на высотах  $\sim 110$  км. Согласно [2, 3], возникновение сигналов связано скорее всего с превышением порога фарли-бунемановской неустойчивости по электрическому полю. Отмечалось также, что увеличенная частота регистрации радиосияний в летнее время обусловлена большей проводимостью плазмы в это время. В работе [1] ракурсные углы наблюдений были существенно хуже (более  $4^\circ$ ). Аналогичное [2, 3] объяснение данных наблюдений [1] встречает значительные трудности [4].

В июле 1991 г. группа радиолокационных исследований университета Саскачеван (Канада) провела серию наблюдений радиоэхо на частоте 50 МГц из области северной полярной шапки. Предварительные результаты этого эксперимента изложены в работе [5]. Область рассеяния находилась на геомагнитной широте  $\sim 83^\circ$ . Одновременно на спутнике ИМП-8 велись измерения компонент ММП. Цель настоящей работы — исследование характера взаимосвязи появления радиосияний в полярной шапке северного полушария и характера ММП, а также изучение условий в ионосфере при возникновении радиосияний.

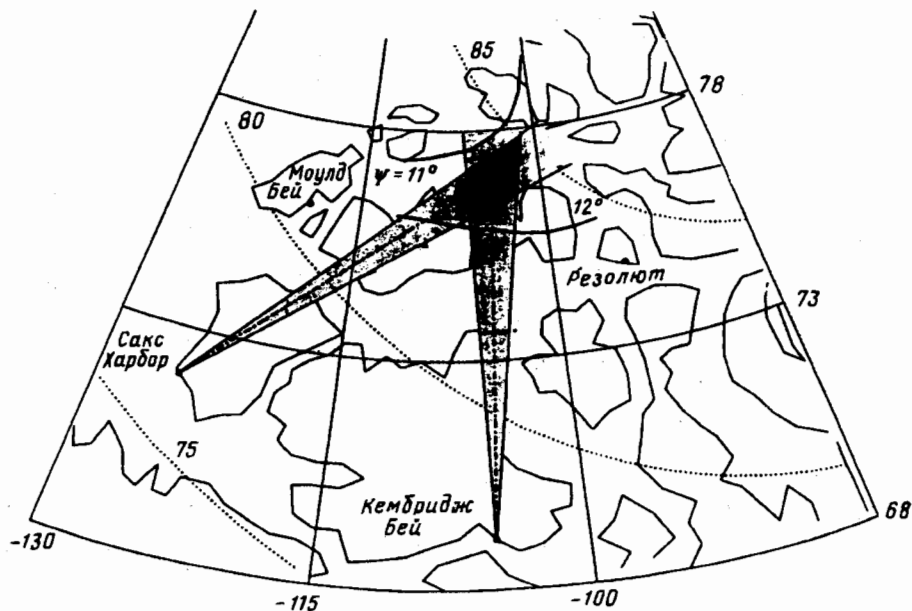


Рис. 1. Схема радарного эксперимента с использованием 50 МГц радиолинии Сакс Харбор — Кембридж Бей

### Эксперимент

На рис. 1 приведена схема эксперимента. Передатчик в Сакс Харбор ( $71,7^\circ \text{ N}$ ;  $125,3^\circ \text{ W}$ ) работал в режиме непрерывного излучения на частоте 49,996 МГц. Стабильная частота передатчика позволяла вести прецизионные измерения доплеровской скорости рассеянного сигнала в Кембридж Бей ( $69,1^\circ \text{ N}$ ;  $105,1^\circ \text{ W}$ ). Поскольку передатчик и приемник были разнесены, измерения доплеровской скорости относились к биссектрисе угла между радиолучами передающей и приемной антенн. Важно отметить, что эта биссектриса была ориентирована почти под прямым углом к геомагнитным параллелям по модели [6] (на рис. 1, линии 75, 80 и  $85^\circ$ ). Как передающая, так и приемная антенны представляли собой набор из восьми диполей типа волновой канал, так что диаграмма направленности антенн в горизонтальной плоскости была  $\sim 7^\circ$ . В результате зона рассеяния (густая штриховка на рис. 1 в виде ромбовидной области) представляла собой относительно широкую область с центром в точке с координатами  $76,7^\circ \text{ N}$ ;  $104,2^\circ \text{ W}$ , геомагнитная широта по модели [6] около  $83,2^\circ \text{ N}$ . Регистрируемый сигнал вместе с радишумом оцифровался с частотой  $f = 10 \text{ кГц}$  и записывался на магнитную ленту. Процедура анализа позволяла вести дальнейшую компьютерную обработку сигналов с разрешением по частоте  $\sim 5 \text{ Гц}$  и по времени  $\sim 0,2 \text{ с}$ . В настоящей работе использовались усредненные за 10 с спектры, что является одной из стандартных методик при обработке данных целого ряда аналогичных наблюдений, проводившихся группой университета Саскачеван на широтах авроральной зоны в последнее десятилетие [7].

На рис. 1 сплошной линией изображены изолинии ракурсных углов наблюдений для высоты 107 км. В средней точке области рассеяния угол был  $\sim 11,5^\circ$ . Для последующего анализа привлекались также усредненные за 1 мин данные магнитных измерений на канадских ст. Кембридж Бей, Моулд Бей ( $76,2^\circ \text{ N}$ ;  $119,2^\circ \text{ W}$ ) и Резолют ( $74,8^\circ \text{ N}$ ;  $94,6^\circ \text{ W}$ ).

Круглосуточные наблюдения эхо из указанной выше области полярной шапки проводились 10—22 июля 1991 г. За весь период эксперимента четкие сигналы наблюдались лишь в течение ~3% времени. Среди всех событий наиболее интересным было событие 13 июля (день 194), когда сигналы были видны в течение продолжительного времени. Более того, это был единственный день, когда одновременно с регистрацией сигналов в нашем распоряжении были данные о компонентах ММП. Анализу наблюдений события 13 июля 1991 г. и посвящена данная работа.

В течение суток 13 июля 1991 г. большую часть времени радар регистрировал радишум. В 16.20 UT на фоне шума впервые появился сигнал, достигший интенсивности ~4 дБ в 16.25 UT, и затем пропал в 16.33 UT. В дальнейшем он появился вновь в 17.55 UT и с небольшими перерывами существовал до 20.23 UT, достигая в отдельные моменты времени интенсивности ~8 дБ. Что касается спектральных характеристик эхо, то это были диффузные сигналы типа П с очень большой шириной спектра в 1000—1300 м/с. Среднее доплеровское смещение спектров было не более 300 м/с с наиболее частыми значениями ~150 м/с. Моменты регистрации эхо с интенсивностью более 3 дБ указаны на рис. 2, где одновременно приведены вариации вариации северо-южной компоненты (X-компонента) геомагнитного поля на ст. Резольют, Моулд Бей и Кембридж Бей. Из рис. 2 следует, что более чем двухчасовой промежуток регистрации эхо приходился на интервал чрезвычайно сильной геомагнитной возмущенности. Амплитуда вариаций достигала значений ~1000 нТ. Характерно, что появление сигналов четко коррелирует с моментом усиления геомагнитной активности.

Следует отметить, что в планетарном масштабе сутки 13 июля охватывали интервал очень интенсивной магнитной бури. Индекс геомагнитной активности  $D_{st}$  был экстремален в 15—16 UT, составляя —185 нТл. Индекс  $K_p$  был равен 9<sub>-</sub> в 15—18 UT. После 18 UT начинается фаза восстановления бури:  $D_{st}$  спадает до -127 нТл в 20—21 UT,  $K_p$  уменьшается до  $K_p = 6$  в 18—21 UT. Таким образом, возникновение радиосияний соответствует началу фазы восстановления магнитной бури. Важно отметить, что сигналы пропали, когда планетарная активность усилилась вновь после 21 UT:  $K_p$  стал равен 7<sub>+</sub> в 21—24 UT, а  $D_{st}$  —153 нТл в 21—22 UT.

Развитие магнитной бури тесно связано с ориентацией и напряженностью компонент ММП. На рис. 3 приведена информация о ММП в интервале 16—21 UT. Магнитная буря сопровождалась интенсивной южной компонентой ММП ( $B_z < -20$  нТл). В 17.40 UT произошло резкое изменение ориентации ММП на северное. Это привело к затуханию планетарной возмущенности и к появлению примерно через 15 мин радиосияний. Устойчивый поворот ММП к югу вновь произошел в 20.10 UT. С этим процессом можно связать исчезновение эхо. Таким образом, существование радиосияний в околополюсной области имело место в основном при интенсивной северной компоненте ММП.

Сильные возмущения геомагнитного поля в приполюсной области на рис. 1 естественно связать с поворотом ММП к северу. Известно, что именно северная и азимутальная компоненты ММП связаны с особыми типами вариаций магнитного поля на широтах дневного каспа и в дневном секторе полярной шапки [8—12].

Из приведенных данных следует, что в настоящем эксперименте сигналы были зарегистрированы при  $B_z > 0$  и  $B_y < 0$ . Эта комбинация компонент ММП соответствует наблюдениям эхо в работе [1], но в данном случае для другого полушария. По данным [1] радиосияния наблюдались чаще в послеполуденное время, а по данным [2, 3] радиосияния возникали преимущественно в предполуденные часы при  $B_y > 0$  и вдвое реже в послеполуденные часы при  $B_y < 0$ . Что касается момента регистрации радиосияний по местному магнитному времени в данном эксперименте, то интервал 18—21 UT приходится на предполуденные

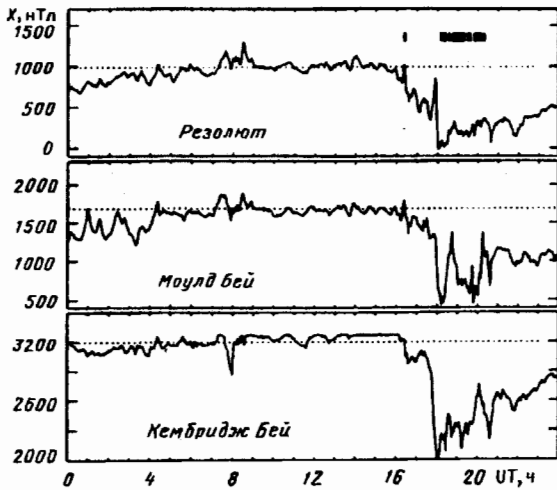


Рис. 2

Рис. 2. Вариации северо-южной компоненты геомагнитного поля на станциях Резолют, Моулд Бей и Кембридж Бей 13 июля 1991 г. и моменты регистрации радиоэхо

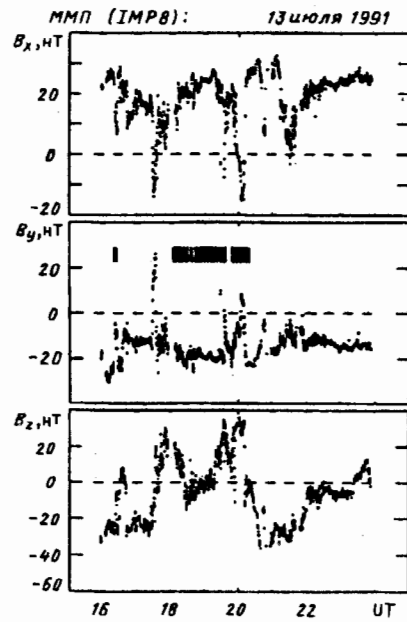


Рис. 3

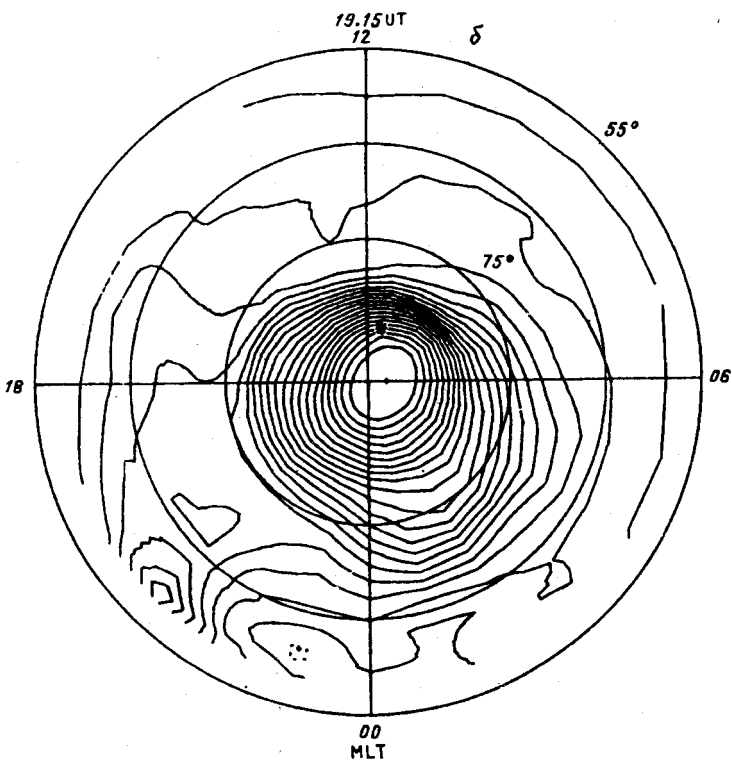
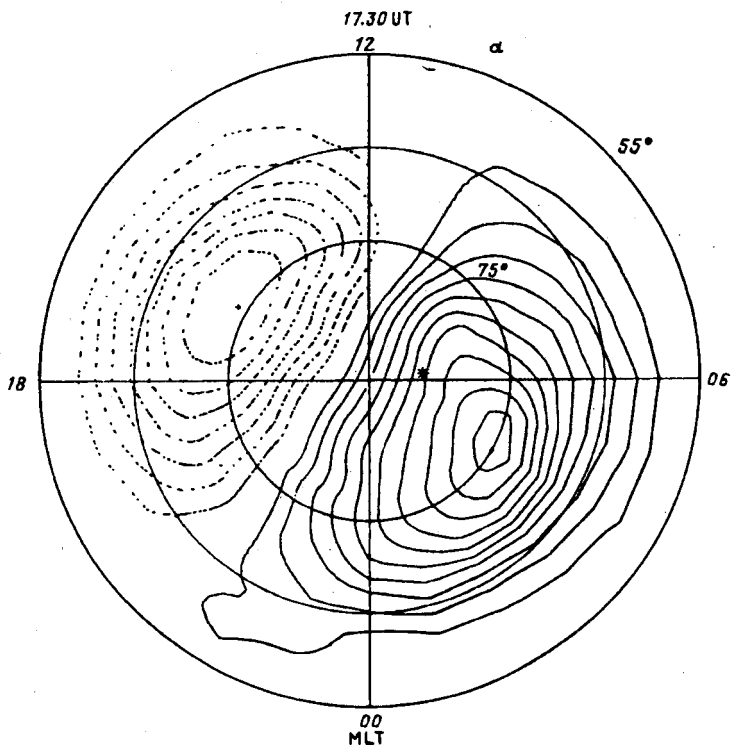
Рис. 3. Вариации компонент ММП и моменты регистрации радиоэхо

часы. Согласно модели [6], полдень на широте точки рассеяния соответствует 21.37 UT. Следовательно, момент регистрации радиосияний в настоящем эксперименте соответствует данным работ [2, 3], но при другой ориентации  $B_y$ .

Таким образом, наблюдения радиоэхо 13 июля 1991 г. в полярной шапке северного полушария согласуются по времени появления в предполуденные часы с результатами [2, 3] для южного полушария. Ориентация  $B_y$ -компоненты ММП при этом различна. Детальное рассмотрение асимметрии магнитных возмущений в дневном секторе полярной шапки двух полушарий, контролируемое  $B_y$ -компонентой ММП, проведено в работе [13].

### Электродинамические параметры в области радиосияний

Для изучения электродинамической ситуации в ионосфере, соответствующей появлению радиосияний в околополюсной области, проведен расчет пространственно-временного распределения электростатического потенциала, величины и ориентации электрического поля, а также продольного тока в точке рассеяния, используя данные о компонентах ММП. Такого рода моделирование проводилось в работах [8—12]. В применявшейся методике сначала находится токовая функция, связанная с наземными магнитными вариациями. Последние контролируются параметрами солнечного ветра и компонентами ММП. Соответствующие коэффициенты связи параметров солнечного ветра с планетарным распределением вариаций магнитного поля приведены в работе [10]. Далее, по известной токовой функции путем численного решения уравнения второго порядка в частных производных для потенциала электрического поля в области широт  $\Phi > 60^\circ$  находилось пространственное распределение изолиний конвекции, электрического поля, ионосферного и продольного токов во всей высокоширотной области, включая



точку рассеяния в настоящем эксперименте. Решение получено на сетке с шагом по широте в  $1^\circ$  и по местному магнитному времени в 1 ч. В связи с возможным запаздыванием реакции магнитосферы на вариации ММП (что, на наш взгляд, очевидно из-за  $\sim 15$ -минутного различия во времени появления и исчезновения эхо при изменениях  $B_z$ -компоненты ММП), данные по ММП усреднялись за 15 мин. Для расчета, в соответствии с применяемой методикой [8], проводимость ионосферы предполагалась изменяющейся с течением времени вследствие изменения уровня солнечной волновой и корпускулярной радиации. При среднем значении проводимости  $\sim 12 \text{ Ом}^{-1}$  и интенсивности ионосферных токов  $\sim 0,6 \text{ А/м}$ , электронная плотность холловского слоя толщиной в 12 км составляет  $\sim 4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

Крупномасштабная магнитосферная конвекция в отдельные 15-минутные промежутки мирового времени, характеризующие ее разнообразие в зависимости от ММП, в интервале существования радиоэхо приведена на рис. 4. Там же звездочкой нанесено расположение точки рассеяния радиоволн. В 17.30 UT высокоширотная область охвачена двухвихревой системой конвекции с более интенсивным вихрем, в котором плазма движется против часовой стрелки в утреннем секторе и по часовой стрелке в вечернем. В полярной шапке конвекция представляется широкой полосой с дневной стороны на ночную. В 19.15 UT конвекция кардинально иная, а именно одновихревая с направлением движения против часовой стрелки. Вихрь с фокусом в районе геомагнитного полюса охватывает всю полярную шапку. В районе точки рассеяния преобладает движение плазмы на дневную и вечернюю стороны. В другие 15-минутные интервалы системы конвекции подобны изображенным на рис. 4 с некоторыми вариациями в связи с  $B_z > 0$ . В полярной шапке в интервалы с  $B_z \gg 0$  появляется сгущение конвекции в дневном секторе с движением к Солнцу.

Результаты моделирования электрических полей и токов приведены на рис. 5 вместе с информацией о наземных магнитных вариациях (рис. 5а) и параметрах радиоэхо (рис. 5б и рис. 5в). На рис. 5а даны значения горизонтального магнитного возмущения  $(X^2 + Y^2)^{1/2}$ , усредненные по данным магнитометров в Моулд Бей в Резолют, в отклонениях от спокойного уровня до начала магнитного возмущения. На рис. 5б приведен временной ход интенсивности сигнала относительно шума в дБ. Заметна корреляция интенсивности сигнала и магнитного возмущения. Сигналы имели место при возмущениях более 500—600 нТл. На рис. 5в изображена проекция электрического поля на направление поперек биссектрисы радиолинии  $E_p$  и доплеровские скорости  $v_D$  в единицах электрического поля по данным радара.  $E_p > 0$  направлено на запад и соответствует дрейфу электронов к экватору,  $v_D > 0$  соответствует дрейфу области рассеяния к полюсу. Изменение знака  $v_D$  предсказывается модельными расчетами со сдвигом в 15 мин, что свидетельствует о запаздывании модельных значений поля относительно изменений ММП. Видно, что  $v_D$  была значительно ниже предсказываемой модельными расчетами. Этот эффект известен по наблюдениям STARE радаров [14]. Направление  $v_D$  противоположно предсказаниям модели. Возможное объяснение расхождения — точка рассеяния располагается в районе сильных градиентов зональной компоненты электрического поля с переходом на восточное направление при увеличении широты.

Рис. 4. Изолинии электростатического потенциала, характеризующие крупномасштабную конвекцию в высокоширотной области в различные моменты UT 13 июля 1991 в координатах: исправленная геомагнитная широта — местное магнитное время. а — в 17.30 UT;  $B_y = -9 \text{ нТл}$ ;  $B_z = -22 \text{ нТл}$ . Значения потенциала в фокусе утреннего вихря 211,4 кВ, в фокусе вечернего — 156,9 кВ. Изопотенциали проведены через 20 кВ. б — в 19.15 UT;  $B_y = -19 \text{ нТл}$ ;  $B_z = 0 \text{ нТл}$ . Значения потенциала в фокусе вихря в полярной шапке 104,3 кВ; изопотенциали проведены через 5 кВ

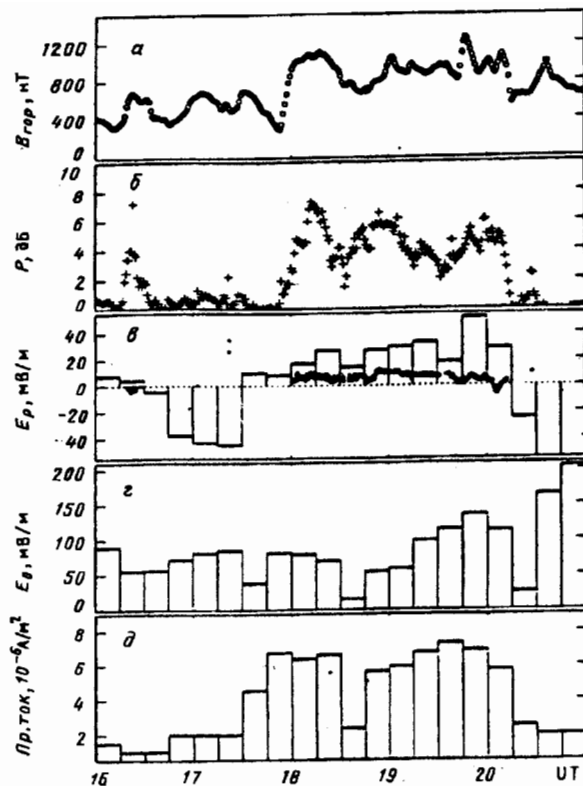


Рис. 5. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля (а), интенсивности радиоэхо (б) и доплеровской скорости (в) — (темные кружки экспериментальные наблюдения, гистограмма — расчетные 15-минутные значения компоненты электрического поля поперек радиолуча), полного электрического поля (г) и продольного тока (д)

На рис. 5г приведены модельные значения полного электрического поля. Обращает на себя внимание величина поля. В течение почти всего промежутка регистрации радиоэхо поле превышало 50 мВ/м. В конце интервала наблюдений радиосигнала не наблюдались, хотя поле достигало значений более 100 мВ/м.

На рис. 5д приведены значения продольного тока в окрестности точки рассеяния в мкА/м<sup>2</sup>. При  $B_z > 0$  токи втекали в ионосферу и их интенсивность достигала значений 7 мкА/м<sup>2</sup>. При  $B_z < 0$  величина тока уменьшается до 1–2 мкА/м<sup>2</sup>. Следует отметить, что приведенные значения соответствуют модели без эффекта насыщения разности потенциала через полярную шапку при интенсивных значениях  $B_z$ -,  $B_y$ -компонент ММП [12]. Учет этого эффекта может привести к уменьшению значений поля и тока вплоть до 40%. На рис. 5д ясно видна корреляция в усилении продольного тока и мощности сигнала радиоэхо, показанной на рис. 5б.

### Дискуссия

Приведенные выше данные и модельные расчеты позволяют сделать несколько выводов о причинах появления эхо в обсуждаемом эксперименте.

Во-первых, радиосигналы наблюдались в основном при положительных значениях  $B_z$ . Вероятно, это связано с эффектом приближения области интенсивных продольных токов в околокасповой области (и соответственно поперечных элек-

трических полей) к точке рассеяния на геомагнитной широте  $\sim 83^\circ$ . Что касается знака  $B_y$ , компоненты ММП, то сигналы наблюдались в предполуденные часы и при  $B_y < 0$ , т. е. когда электрические поля должны быть максимальными, что соответствует выводам работ [2, 3] и ряду других работ, посвященных анализу электромагнитной обстановки в околополюсной области в зависимости от ММП (см. [8—12] и ссылки в них). Проведенные модельные расчеты подтвердили вывод о наличии сильных электрических полей по крайней мере порядка 50 мВ/м при регистрации эхо. В недавней теоретической работе [15] показано, что в условиях столь интенсивных электрических полей и при значительном уширении спектральной линии возможна генерация неоднородностей за счет неустойчивости Фарли-Бунемана до ракурсного угла шесть и более градусов. Однако, как отмечалось, при наблюдениях в отдельные моменты времени сигналы не регистрировались, хотя расчетные значения поля заметно превышали 100 мВ/м. Следовательно, кроме электрического поля, на появление радиоэхо влияли некие дополнительные факторы.

Во-вторых, наблюдения подтвердили прежние выводы о том, что для возникновения радиосияний необходимо наличие достаточно плотной ионизации в области  $E$ . Напомним, что в работах [2, 16] отмечалось предпочтительное наблюдение радиосияний в полярной шапке в летнее время (как при плохих, так и хороших ракурсных углах измерений). В описываемом эксперименте эхо наблюдались в околополуденные часы, когда электронная плотность, вероятно, была около  $4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Поскольку радиосияния не наблюдались в вечерние и полуденные часы, когда в принципе можно ожидать хотя бы кратковременного существования интенсивных электрических полей  $E > 20$  мВ/м, то порог по электронной плотности для использовавшейся радиополосы составляет не менее  $(2-3) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Напомним, что изменения проводимости освещенной в летних условиях области  $E$  невелики. В работе [17] сообщалось о пороге возникновения радиосияний для радара ПГИ в авроральной зоне  $\sim 2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Это пороговое значение по плотности зависит от инструментальной чувствительности радара [18]. Однако прямое сопоставление указанного значения с выводами настоящей работы затруднительно в первую очередь не из-за разной аппаратурной чувствительности радаров, а из-за большой разницы в ракурсных условиях наблюдений.

Согласно идеям [18], величина магнитного возмущения определяет пороговые условия наблюдения радиосияний. Хотя детального исследования величины порога по магнитному возмущению не проводилось, сообщалось, что это обычно наблюдается в авроральной зоне при магнитных возмущениях в 100—200 нТл [19, 20]. Поскольку плотность ионизации в ионосфере в ходе наблюдений была усиленной в 2—3 раза по отношению к обычным значениям в ночной авроральной зоне, пороговые условия по току могут составить 300—500 нТл. Из данных, приведенных на рис. 5, следует, что порог по току для околополюсных эхо имеет несколько большее значение  $\sim 500-600$  нТл, что еще раз свидетельствует о важности других факторов для появления радиоэхо.

Таким образом, из проведенных выше расчетов и оценок следует, что для наличия эхо присутствия сильного электрического поля и плотной  $E$ -области еще не достаточно. Более того, судя по расчетам, появление эхо не коррелирует с величиной поля. Важно иметь лишь большую его величину. По всей видимости, ракурсный эффект в значительной степени искажает простые закономерности, найденные для околополюсных ракурсных условий наблюдения в цитированных работах [17, 18]. Для больших ракурсных углов играют весьма существенную роль, несомненно, рефракционные эффекты. В самом деле, изменение электронной плотности в несколько раз может изменить интенсивность регистрируемого сигнала в лучшем случае на 10—15 дБ. Изменение же ракурсного угла на 2—3° может увеличить сигнал на 10—30 дБ. Разумеется, сам эффект рефракции зависит от электронной плотности в ионосфере.



место при больших напряжениях северной и отрицательных значениях азимутальной компоненты ММП при затухании интенсивных возмущений на широтах авроральной зоны.

3. Радиосияния в околополюсной области наблюдались при электрических полях  $\sim 50$  мВ/м и электронной плотности  $\sim 4 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>. Появление радиосияний контролируется не только величиной электронной плотности, электрического поля и продольных токов. Определенный вклад вносят, по-видимому, рефракционные эффекты, которые могут быть связаны со спорадической активностью в области *E* или эффектами растекания продольных токов.

Магнитограммы канадских высокоширотных обсерваторий получены от департамента энергетики, рудных ископаемых и источников сырья Канады. Данные межпланетного магнитного поля получены от д-ра Р. П. Леппинга через МЦД-А.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 93-05-8722.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеева Н. Г.* Наблюдение радиоаворы в дневное время // Геомагнетизм и аэронавигация. 1983. Т. 23. № 1. С. 149.
2. *Voloshinov N. N., Troshichev O. A.* Effects of interplanetary magnetic field on the distribution of radioaurora in the southern polar cap // Planet. Space Sci. 1986. V. 34. № 2. P. 307.
3. *Troshichev O. A., Voloshinov N. N.* Effects of magnetic activity and interplanetary magnetic field on the position of radioaurorae in the southern polar region // Planet. Space Sci. 1988. V. 36. P. 441.
4. *Кустов А. В., Сергеева Н. Г.* К вопросу о причинах появления радиоотражений в полярной шапке // Исследования радиоаворы за период МИМ. Апатиты: КФ АН СССР; 1983. С. 26.
5. *Kustov A. V., Koehler J. A., Sofko G. J. et al.* Observations of 50 MHz type II coherent echoes from within the polar cap // Ann. Geophys. 1994. V. 12.
6. *Baker K. B., Wing S.* A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // J. Geophys. Res. 1989. V. 92. P. 9139.
7. *Haldoupis C., Sofko G. J., Koehler J. A. et al.* High resolution Doppler spectrum measurements of 3-meter auroral irregularities at large magnetic aspect angles // Phys. Scripta. 1987. V. 35. P. 910.
8. *Левитин А. Е., Фельдштейн Я. И., Афонина Р. Г. и др.* Модель крупномасштабных электрических полей и токов в высокоширотной ионосфере. Ч. 1—6. М.: Гидрометеорологическое издательство, 1986. 1043 с.
9. *Friis-Christensen E., Kamide Y., Richmond A. D., Matsushita S.* Interplanetary magnetic field control of high-latitude electric fields and currents determined from Greenland magnetometer data // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 1325.
10. *Levitin A. E., Afonina R. G., Belov B. A., Feldstein Y. I.* Geomagnetic variations and field-aligned currents at northern high-latitudes and their relations to solar wind parameters // Phil. Trans. Roy. Soc. 1982. V. A304. P. 253.
11. *Feldstein Y. I., Levitin A. E.* Solar wind control of electric fields and currents in the ionosphere // J. Geomag. Geoelectr. 1986. V. 38. P. 113.
12. *Дремухина Л. А., Левитин А. Е., Фельдштейн Я. И.* Конвекция в высоких широтах в периоды  $B_z > 0$  ММП // Геомагнетизм и аэронавигация. 1990. Т. 30. С. 190.
13. *Feldstein Y. I.* Magnetic field variations in the polar region during magnetically quiet periods and interplanetary magnetic fields // Space Sci. Rev. 1976. V. 18. P. 777.
14. *Nielsen E., Schlegel K.* Coherent radar doppler measurements and their relationship to the ionospheric electron drift velocity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 3498.
15. *Hamza A. M.* A nonlinear theory for large aspect angle echoes in the auroral *E* region // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 16981.
16. *McNamara A. G.* The occurrence of radio aurora at high latitudes: the IGY period 1957—1959 // Geophysiske Publikasjoner. 1972. V. 29. P. 135.
17. *Кустов А. В., Успенский М. В., Степанов Г. С. и др.* Электрическое поле, ионизация *E*-слоя и возникновение когерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация. 1992. Т. 32. С. 116.

18. Тимофеев Е. Е., Яхнин А. Г., Исаев Н. В. и др. Пространственные профили электрического поля и электронной концентрации в области регистрации аврорального рассеяния радиоволн//Геомagnetизм и аэрономия. 1988. Т. 28. С. 871.
19. Haldoupis C., Nielsen E., Schlegel K. Dependence of radar auroral scattering cross section on the ambient electron density and destabilising electric field//Ann. Geophys. 1990. V. 8. P. 195.
20. Mareshal M., McDiarmid D. R., McNamara A. G. Some properties of diffuse radio aurora at high aspect angles//J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 6687.
21. Uspensky M. Y., Williams P. J. S. The amplitude of auroral backscatter. I. Model estimates of the dependence on electron density//J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V. 50. P. 73.
22. Uspensky M. V., Starkov G. V., Stepanov G. S., Williams P. J. S. The amplitude of auroral backscatter: II. Topology of the backscatter range-azimuth distribution//J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V. 52. P. 929.
23. Беспозванная А. С., Широчков А. В. О связи  $E_s$  в приполюсной области с параметрами межпланетного магнитного поля//Геомagnetизм и аэрономия. 1976. Т. 16. С. 84.
24. Ляцкая А. М., Ляцкий В. Б., Мальцев Ю. П. Влияние продольных токов на профиль электронной концентрации//Геомagnetизм и аэрономия. 1978. Т. 18. С. 229.
25. Шафтан В. А. Связь радиосияний с продольными токами//Геомagnetизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 236.

Институт атмосферных и космических исследований университета Саскачеван  
Канада

Поступила в редакцию  
23.06.93

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН

После доработки  
16.09.93