



УДК 550.388.2

**Выборнов Федор Иванович**, доцент, д.ф.-м.н., профессор кафедры физики  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

**Усанов Владимир Андреевич**, студент 4 курса ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

### ИЗМЕРЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫХ ЧАСТОТ $E$ И $E_s$ СЛОЕВ ИОНОСФЕРЫ ЛЧМ ИОНОЗОНДОМ НА СУБАВРОРАЛЬНЫХ ТРАССАХ

*Аннотация.* В статье представлены результаты наблюдений вариаций параметров ионосферного КВ канала для  $E$  и  $E_s$  слоя на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск во время магнитно-ионосферной возмущенности.

*Ключевые слова:* ионосфера, ЛЧМ ионозонд, наклонное зондирование, короткие волны, наименьшая наблюдаемая частота, максимальная наблюдаемая частота, радиосвязь.

#### Введение

Для прогнозирования условий распространения радиоволн коротковолнового (КВ) диапазона необходимо проводить регулярные наблюдения на трассах наклонного зондирования различной протяженности и ориентации и установление взаимосвязи между ключевыми параметрами ионосферного канала (наименьшей наблюдаемой частотой (ННЧ), максимальной наблюдаемой частотой (МНЧ) и диапазоном частот прохождения сигналов) с параметрами гелиогеофизической обстановки.

В работе [1] подробно рассмотрены вопросы краткосрочного прогнозирования распространения КВ сигнала при отражении от F-слоя ионосферы в спокойных гелиогеофизических условиях на субавроральных трассах и показана возможность создания высоконадежного прогноза. В работе [2] показано, что во время магнитной бури происходит деградация ионосферного КВ канала и радиосвязь на субавроральной трассе может полностью прекратиться (эффект блэкаута) или быть в очень узком диапазоне частот. Обнаруженный в этой же работе эффект резкого увеличения МНЧ  $E_s$  на стадии восстановления и по окончании магнитной бури позволяет организовать канал КВ-УКВ связи с обходом пораженных областей ионосферы.

Теория образования  $E_s$  слоя подробно рассмотрена в ряде работ (см., например [3], и цитируемую там литературу). В последние десятилетия выявлены многие особенности  $E_s$  слоя, показана его облачная структура. В последние годы с появлением ЛЧМ ионозондов наклонного зондирования ионосферы появилась возможность проведения полномасштабных исследований  $E_s$  слоя ионосферы на любых трассах зондирования.

Ниже представлены первые результаты наблюдений вариаций параметров ионосферного КВ канала для моды сигнала, отраженного от  $E_s$  слоя ионосферы на субавроральных трассах Ловозеро – Васильсурск в спокойных условиях и во время магнитно-ионосферной возмущенности.

## Описание эксперимента и гелиогеофизической обстановки

В 2015 - 2019 году на полигоне НИРФИ Васильсурск проводился прием сигналов ЛЧМ передатчиков станций Ловозеро (Мурманская область), Горьковская (Ленинградская обл.), Соданкюля (Финляндия), Диксон, Салехард, Норильск. На рис. 1 на карте приведены все трассы зондирования ионосферы относительно приемного пункта Васильсурск (Нижегородская область). Для проведения детального анализа поведения ключевых параметров ионосферного канала для E и Es моды сигнала был выбран октябрь 2016 года, когда гелиогеофизическая обстановка менялась от спокойной до сильно-возмущенной. Ниже приводятся результаты, полученные на трассе Ловозеро – Васильсурск.

Проводился анализ экспериментальных данных, полученных на субавроральной трассе наклонного ЛЧМ-зондирования Ловозеро, Мурманская область ( $68^{\circ}\text{N}, 35^{\circ}\text{E}$ ) – Васильсурск Нижегородская область ( $56,1^{\circ}\text{N}; 46,1^{\circ}\text{E}$ ). Длина трассы зондирования вдоль дуги земного шара составляет 1440 км.



Рис.1. Карта трасс ЛЧМ зондирования ионосферы из п. Васильсурск.

Передатчик в Ловозеро работал в диапазоне частот 2.0 – 29 МГц, скорость перестройки частоты составляла 550 кГц/с, интервал зондирования 15 минут.

Общая геофизическая обстановка для выбранного интервала обработки с 1 по 31 октября 2016 г. показана на рис. 2. Максимальные значения магнитного индекса Kp составляли величины 5-7. Во время наблюдений имели место несколько периодов магнитной активности. Первый в начале октября приходился на фазу восстановления умеренной магнитной бури, главная фаза которой продолжалась с 06 UT 29.09.16 г. до 09 UT 29.09.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения – 66 нТл (см. рис.2а).

Слабая магнитная буря имела место 04 октября, когда индекс Dst достиг минимального значения – 43 нТл (см. рис. 2а).

Сильная магнитная буря началась в 00 UT 13.10.16 г. с резкого возрастания Dst, затем с резкого уменьшения Dst началась главная фаза бури, которая продолжалась до 00 UT 14.10.16 г., когда индекс Dst достиг минимального значения –103 нТл. Затем началась фаза восстановления бури.

На фазе восстановления магнитных бурь произошло несколько магнитосферных суббурь различной интенсивности (2, 16, 17 и в период 26-29 октября), которые идентифицированы по усилению аврорального индекса AE (см. рис. 2б). Умеренная магнитная буря имела место 25 – 30 октября, когда индекс Dst достигал минимального

значения – 59 нТл и – 63 нТл в 17:30 UT 25.10.16 г. и 04:00 UT 29.10.16 г. соответственно (см. рис. 2а).

Представляет интерес сопоставление поведения диапазона частот прохождения КВ-сигналов на субавроральной трассе в дни с различной магнитной активностью, что имеет важное значение для обеспечения надежной работы систем связи КВ диапазона на высокоширотных радиоперелиниях.

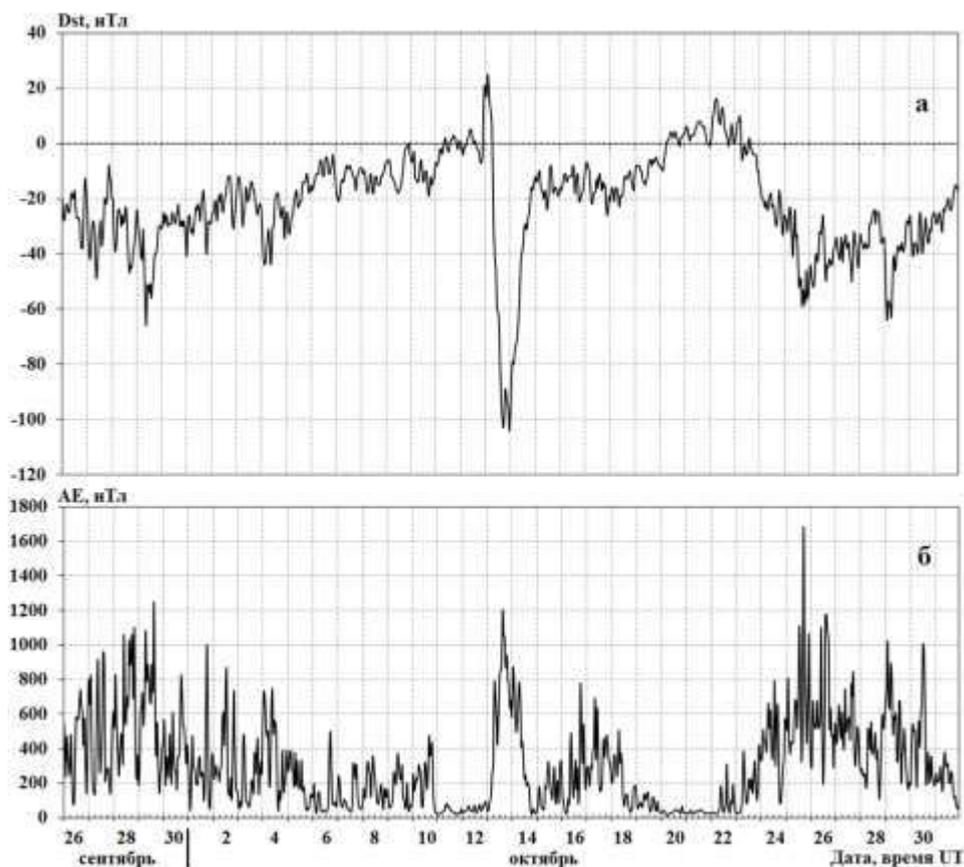


Рис.2. Геофизическая обстановка 26 сентября - 31 октября 2016г.  
а – магнитный индекс Dst, б – авроральный индекс AE.

### Результаты наблюдений

Интенсивные спорадические слои в E-области авроральной ионосферы могут образовываться во время роста геомагнитной активности в условиях высыпания заряженных частиц из магнитосферы. Для высокоширотной ионосферы вероятность образования Es увеличивается с ростом Kp индекса. При этом наиболее вероятно появление Es-слоя в ночное время. В дневное время зависимость появления Es от магнитной активности проявляется слабее. Величина электронной концентрации в E области зависит от геомагнитной активности и особенно проявляется во время магнитосферной суббури. Следует отметить, что ухудшение условий прохождения сигналов на субавроральной трассе во время геомагнитных возмущений согласуется с данными поглощения радиоволн, полученными с помощью риометра в Соданкюля (Финляндия). В спокойные дни 6, 12, 15 и 21 октября уровень поглощения был небольшой 1-2,5 дБ. Во время магнитосферных бурь 2, 16 и 17 октября поглощение 3,5-4,5 дБ, а во время магнитных бурь 1, 4, 13 и 14 октября поглощение 4,5-6,0 дБ. Таким образом, данные риометра дополняют данные наклонного зондирования и являются хорошим индикатором для оценки ионосферного отклика на геомагнитную активность.

На рис. 3 приведены результаты обработки дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) E слоя ионосферы для части вышеперечисленных дней с разной

геомагнитной активностью. В вечерние и ночные часы наблюдаются сигналы с высокими значениями МНЧ, достигающие до 29 МГц и большим диапазоном частот прохождения КВ-сигналов  $\Delta f = 16-25$  МГц. Такие сигналы объясняются отражением от сильного спорадического слоя Es. Сравнение ДЧХ E слоя ионосферы, полученных в условиях с очень низкой и высокой геомагнитной активностью (21 и 27 – 29 октября), подтверждает значимость высокой геомагнитной активности для значений МНЧ и ННЧ E/Es слоя ионосферы.

Необходимо отметить, что появление высоких значений МНЧ Es может отмечаться и в дни с низкой геомагнитной возмущенностью. Например, результаты обработки ДЧХ E слоя ионосферы за 8 и 9 октября 2016 г. с высокими значениями МНЧ Es не могут быть объяснены высокой геомагнитной активностью. Кроме геомагнитных возмущений на появляемость и параметры Es слоя могут влиять другие возмущения, которые могут иметь различное происхождение в зависимости от ионосферных условий.

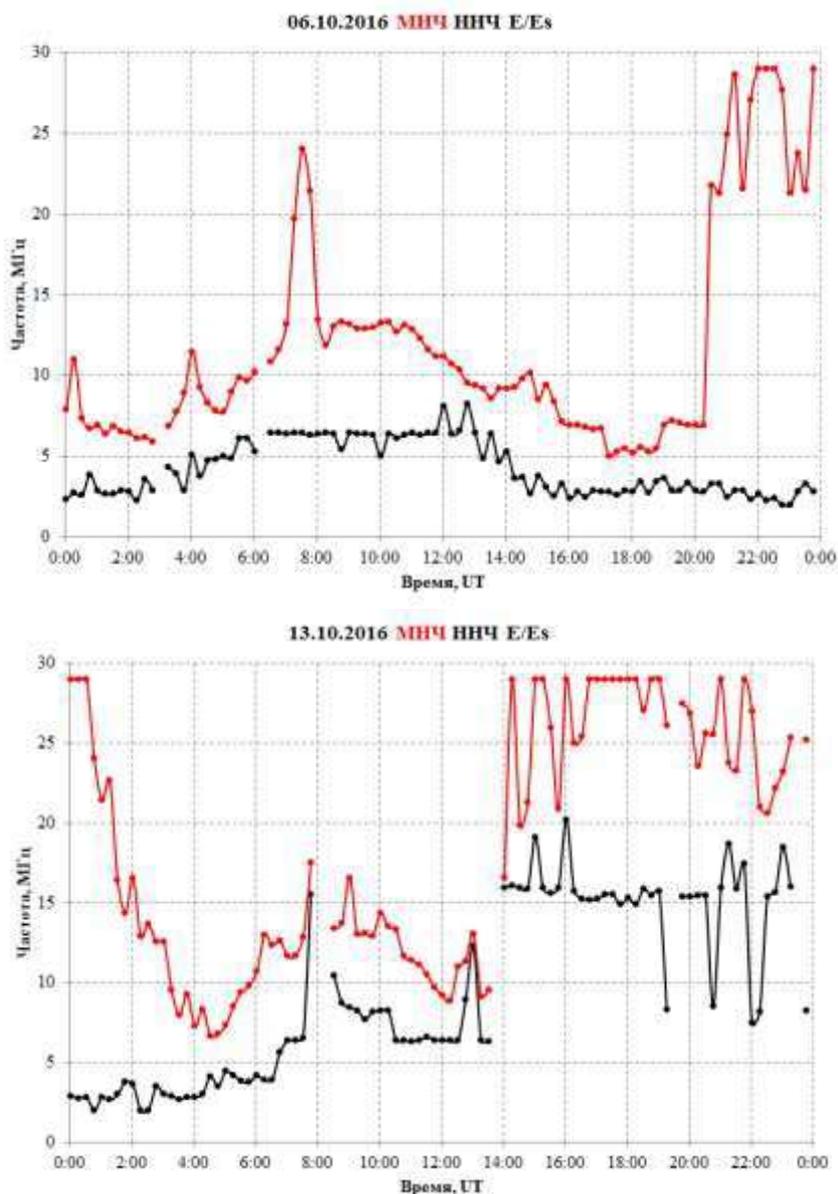


Рис.3. Временной ход МНЧ E/Es (красный) и ННЧ E/Es (черный) в дни с различной геомагнитной активностью на трассе Ловозеро – Васильсурск.

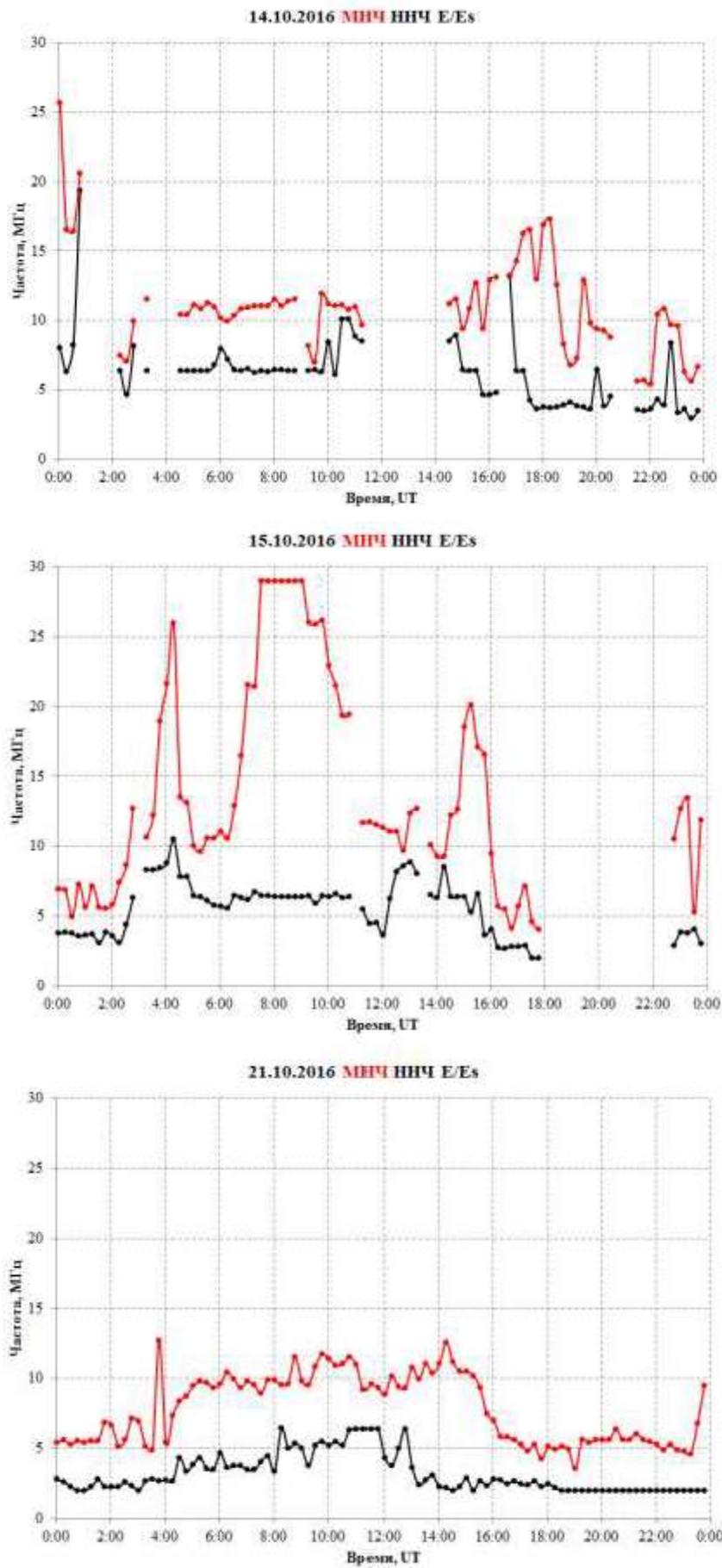


Рис. 3 (продолжение). Временной ход МНЧ E/Es (красный) и ННЧ E/Es (черный) в дни с различной геомагнитной активностью на трассе Ловозеро – Васильсурск.

## Выводы

В работе представлены результаты исследования влияния геомагнитной активности на диапазон изменений ключевых параметров ионосферного канала для E и Es моды сигнала на субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск в октябре 2016 года.

Установлено, что степень воздействия геомагнитной возмущенности на ионосферный КВ канал зависит от уровня геомагнитной активности. Высыпание заряженных частиц в высокоширотной ионосфере может являться источником повышения электронной концентрации и усиления авроральных токов в нижней ионосфере, а, как следствие, быть причиной образования спорадического слоя Es. Совокупность всех этих факторов влияет на сильную изменчивость диапазона частот прохождения КВ-сигналов Es-модой на высокоширотных радиоперекрестках.

На субавроральной трассе Ловозеро – Васильсурск во время магнитосферных суббурь и высыпания заряженных частиц в результате образования мощного спорадического слоя Es существенно улучшались условия распространения радиоволн. МНЧ Es достигал верхнего предела частоты ЛЧМ-зондирования 29 МГц, а диапазон частот прохождения КВ-сигналов возрастал в разы по сравнению с невозмущенными условиями. Во время образования в авроральной E области интенсивного спорадического слоя Es существенно улучшаются условия КВ радиосвязи за счет распространения при отражении от Es, что может нейтрализовать неблагоприятное воздействие магнитной бури на работу радиоэлектронных систем связи и загоризонтных КВ радиолокаторов. При этом для обеспечения устойчивой КВ радиосвязи можно использовать более высокочастотный участок КВ диапазона.

### Список литературы:

1. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Экстраполяция максимальной применимой частоты путём адаптации ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования в евроазиатском регионе. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 12. С. 975–990.
2. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Особенности распространения коротковолновых сигналов на трассах наклонного зондирования во время солнечной и магнитной активности в сентябре 2017года. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2019. Т.62, №2. - С. 95-109.
3. Гершман Б.Н., Игнатъев Ю.А. Теория образования спорадического слоя E и возникающих в нем неоднородностей. // Ионосферные исследования. Исследования спорадического слоя Es. Издательство Казанского университета, №50. 1997 г. С. 7-28. – 264 с.

## MEASUREMENT OF THE MAXIMUM OBSERVED FREQUENCIES OF E AND Es IONOSPHERE LAYERS BY LFM IONOSONDE ON SUBAURORAL TRACKS

Fedor I. Vybornov, Vladimir A. Usanov

*The article presents the first results of observing variations in the parameters of the ionospheric HF channel for the E and Es layer on subauroral tracks during the magnetic-ionospheric disturbances.*

*Keywords: ionosphere, LFM ionosonde, oblique sounding, short waves, lowest observed frequency, maximum observed frequency, radio communication.*