

ВОЗМОЖНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ КАНАЛОВ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ СПОРАДИЧЕСКИЙ E_s СЛОЙ

С.А. Долгачева, А.С., Калишин, Т.Д. Борисова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия,
dolgachyova2010@yandex.ru

THE POSSIBILITY OF ORGANIZING COMMUNICATION CHANNELS THROUGH A SPORADIC E_s LAYER

S.A. Dolgacheva, A.S. Kalishin, T.D. Borisova

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, dolgachyova2010@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрено распространение радиоволн КВ диапазона в АЗРФ в различных гелиогеофизических условиях в области E ионосферы на примере четырёх трасс наклонного зондирования (Соданкюла – Баренцбург, Ловозеро – Баренцбург, Ловозеро – Амдерма и Ловозеро – Диксон) с января 2021 по май 2024 г. Произведена автоматическая обработка EEs-моды отражения, получены вероятности отражения сигнала от спорадического E_s -слоя для всех частот излучаемых диапазонов передатчиков.

Ключевые слова: наклонное радиозондирование ионосферы, высокоширотная ионосфера, спорадический E_s -слой, автоматическая обработка ионосферных данных, КВ-радиосвязь

Abstract. The paper considers the propagation of HF radio waves in the Russian Arctic in various heliogeophysical conditions in the E region of the ionosphere using the example of four inclined sounding routes (Sodankula – Barentsburg, Lovozero – Barentsburg, Lovozero – Amderma and Lovozero – Dikson) from January 2021 to May 2024. Automatic processing of the EEs reflection mode was performed, the probabilities of signal reflection from the sporadic E_s layer were obtained for all frequencies of the radiated ranges of transmitters.

Keywords: oblique sounding, high-latitude ionosphere, sporadic E_s layer, automatic ionospheric data processing, HF radio communication

ВВЕДЕНИЕ

По данным наклонного зондирования высокоширотной ионосферы [Калишин и др., 2020] спорадический E_s -слой наблюдается регулярно во все сезоны, и, поэтому, выглядит перспективным для организации устойчивой радиосвязи в высоких широтах при помощи волн декаметрового диапазона (коротких волн). Был проведен анализ особенностей распространения радиоволн на примере четырёх радиотрасс: Соданкюла – Баренцбург (SOD–BBQ), Ловозеро – Баренцбург (LOZ–BBQ), Ловозеро – Амдерма (LOZ–AMD) и Ловозеро – Диксон (LOZ–DIK) (рис. 1). Диапазон излучения передатчика в геофизической обсерватории Соданкюла (Финляндия) составляет от 1 до 16 МГц. Передатчик в Ловозеро излучает в диапазоне от 2 до 29 МГц.

Поскольку по трекам на ионограммах наклонного зондирования сложно отличить отражения от

E и E_s -слоёв, параметры ионограммы оценивались в качестве суммарной односкачковой EEs-моды отражения (1EEs) и разделялись при помощи сравнения пересчитанных из частот МНЧ [Долуханов, 1960] с рассчитанными критическими частотами регулярного E -слоя на средних точках отражения (модель IRI-2016 [NASA]).

Для выявления рабочих диапазонов частот через подсчёт вероятности отражения в зависимости от времени суток, сезона и геомагнитной обстановки, был разработан алгоритм автоматического определения трека 1EEs. Периоды спокойных, слабовозмущенных и возмущенных геомагнитных условий определялись с помощью суммарного за сутки K_p -индекса. Спокойные дни соответствовали требованию $\sum K_p < 15$, слабовозмущенные $15 \leq \sum K_p \leq 24$, а возмущенные $\sum K_p > 24$.

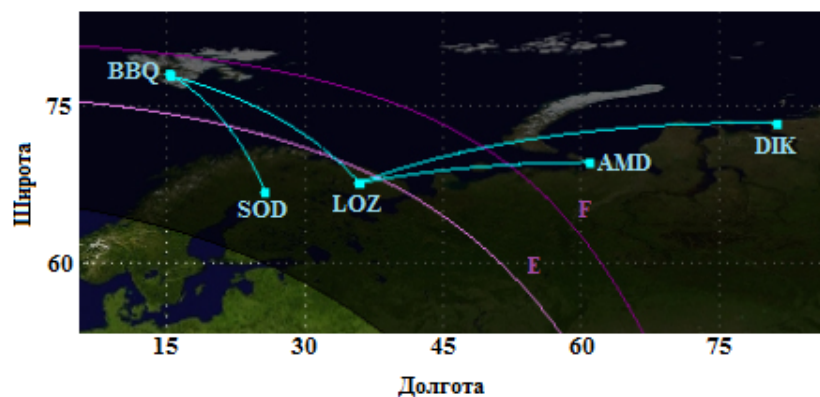


Рис. 1. Геометрия изучаемых радиотрасс. В качестве примера нанесены линии терминатора на высоте E и F областей ионосферы в 13 UT 16 декабря

ОСОБЕННОСТИ СПОРАДИЧЕСКОГО ES-СЛОЯ В РЕГИОНЕ АЗРФ

Трассы можно разделить на две группы: поперек овала сияний (LOZ-BBG и SOD-BBG) и вдоль овала (LOZ-AMD и LOZ-DIK). Спорадический слой *Es* в средних точках радиотрасс наблюдается регулярно во все сезоны. Наиболее интенсивный *Es*-слой был зафиксирован в вечерние и ночные часы в спокойных и слабовозмущенных условиях, когда средние точки трасс входят в зону овала полярных сияний. В возмущенных условиях овал сияний смещается к югу, электронная плотность в точках отражения резко уменьшается, приводя к уменьшению критической частоты *Es* и МНЧ. На ионограммах часто присутствует «разрыв» моды *Es*. На рис. 2а отражения наблюдаются в диапазоне частот от 10 до 11,8 МГц и от 25 до 28 МГц. Для объяснения причины «разрыва» трека было выполнено моделирование распространения диагностических сигналов на данной радиотрассе [Патент, 2014]. По результатам моделирования (рис. 2 б–г), в некоторых диапазонах частот распространение на трассе невозможно, поскольку все лучевые траектории проходят мимо пункта приема. Разрыв трека хорошо заметен на графике распределения вероятностей отражения частот (рис. 3).

ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЧАСТОТ ОТ СПОРАДИЧЕСКОГО ES-СЛОЯ

Из-за прерывистости трека, для оценки частот, пригодных для связи, была сделана автоматическая оцифровка 1EES-моды в диапазоне задержек для

каждой трассы. Алгоритм определения трека состоит из двойной фильтрации ионограммы на основе статистических методов с экспериментально подобранными порогами.

По полученным массивам частот и задержек были рассчитаны вероятности отражения для каждой частоты диапазона передатчика в различных условиях для каждого часа (рис. 3).

Результаты обработки показали два наиболее вероятных частотно-временных диапазона, общих для всех четырех трасс – ночной и вечерний. Эти два диапазона отличаются друг от друга механизмом образования спорадического *Es*-слоя. Во время ночного диапазона точки отражения трасс находятся внутри аврорального овала. Вечерний диапазон обусловлен резким увеличением ионизации в середине трассы или в области отражения волны, сопровождаемым понижением высоты слоя *Es* с одновременным ростом критической частоты. При этом МНЧ возрастает ещё и за счёт увеличения коэффициента передачи [Благовещенский, Жеребцов, 1987].

Ночной диапазон для трасс поперёк овала сияний имеет более узкие частотные границы (8–9.5 МГц), чем у трасс, расположенных вдоль овала. Для трасс поперёк овала так же характерно сужение временных рамок от лета к зиме. На трассе LOZ-AMD меняются частоты в зависимости от сезона и геомагнитной обстановки: в летний период 9–21 МГц, в период равноденствия 4–15/18/25 МГц, зимой 4–20 МГц. На трассе LOZ-BBG диапазон не меняется в рамках 21–29 МГц частоты.

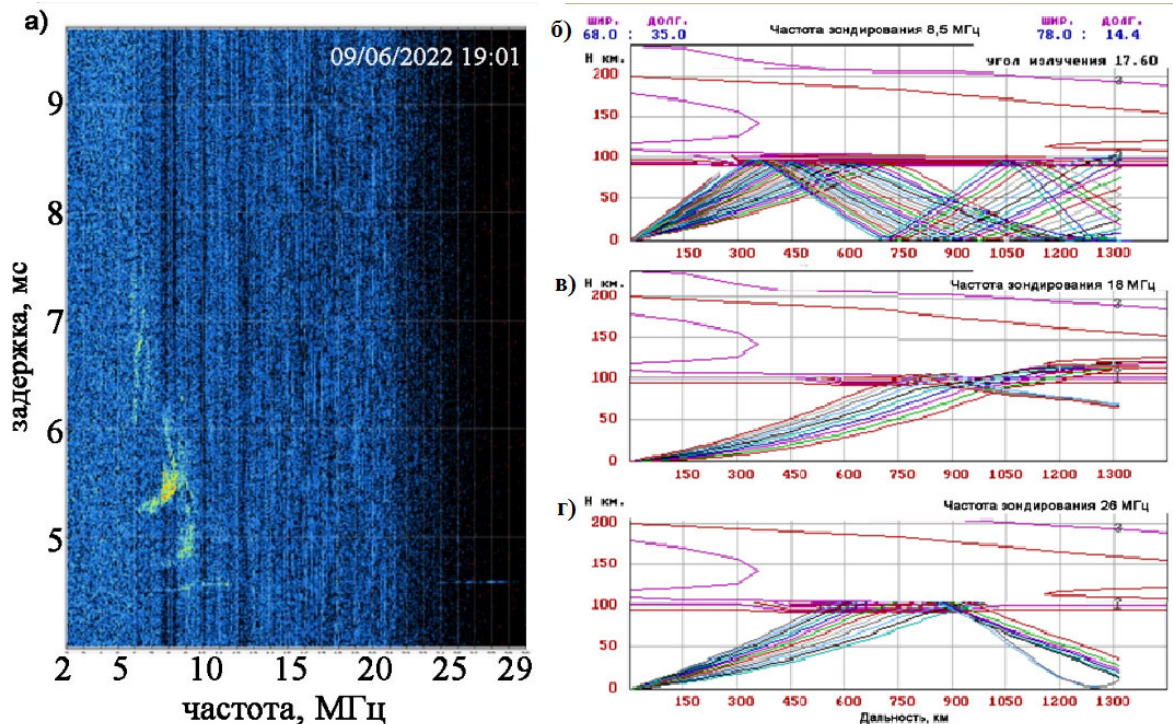


Рис. 2. Примеры ионограммы наклонного радиозондирования с прерывистым треком отражения от области *E* на трассе с. Ловозеро – п. Баренцбург в летний период (а), и результаты моделирования лучевых траекторий распространения радиоволн на трассе Ловозеро – Баренцбург для частот 8.5 МГц (б), 18 МГц (в) и 26 МГц (г)

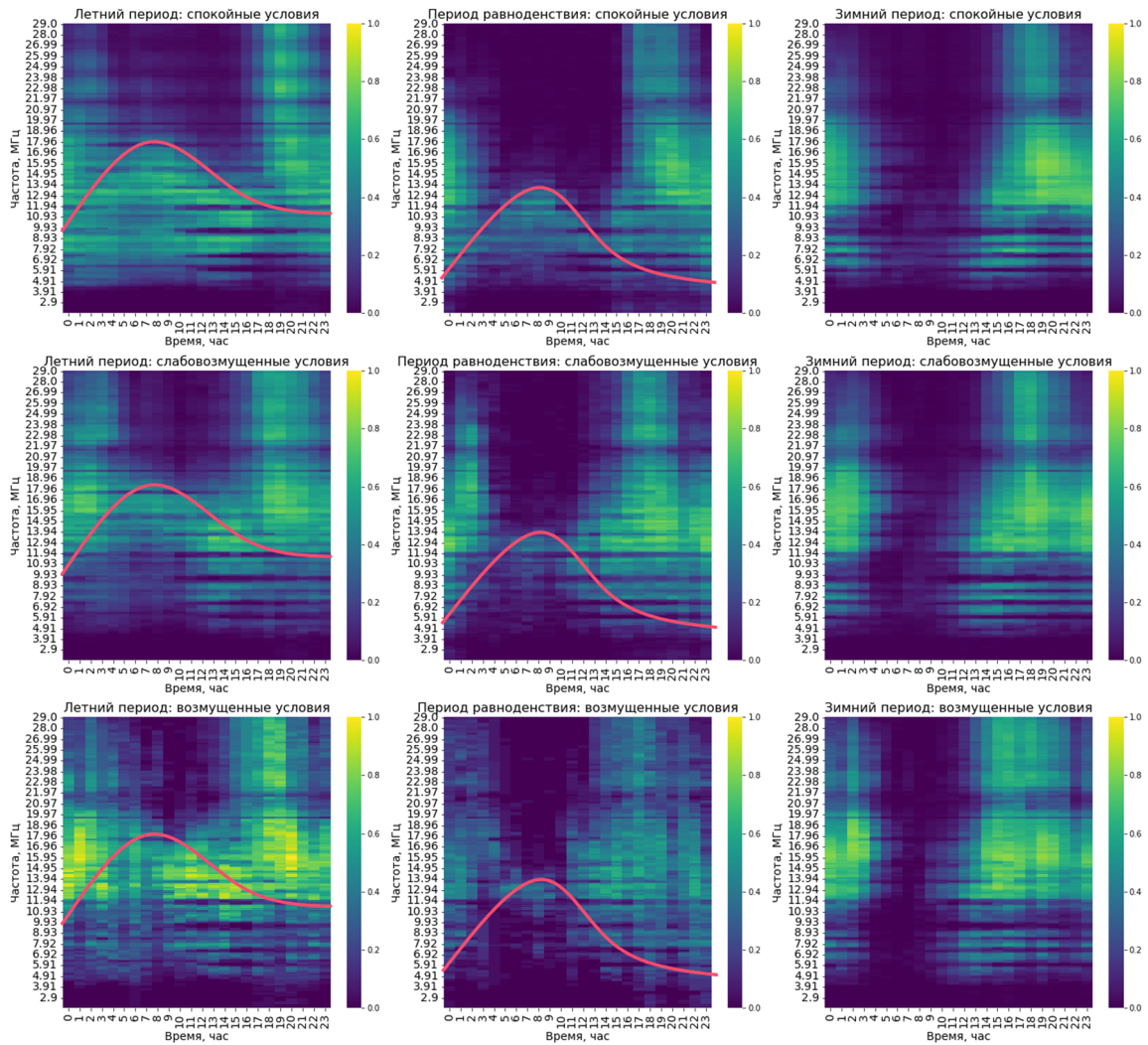


Рис. 3. Распределение вероятностей отражения по часам для каждой частоты трассы LOZ–DIK. Критические частоты регулярного E-слоя, пересчитанные в МГц, обозначены красной линией. Время в UT

Вечерний диапазон на трассах поперёк овала сияний смещается от лета к зиме на пару часов в сторону полудня. На трассе LOZ–DIK диапазон 1 присутствует от 12 до 29 МГц круглый год. На трассе LOZ–AMD верхняя граница диапазона частот меняется по сезонам 21 до 17 МГц, нижняя граница около 5 МГц.

В дополнение к этим двух диапазонам, на трассе SOD–BBG летом присутствует отражение 11–15 МГц с 1 до 22 UT, частично перекрываемое регулярным E-слоем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что частоты, отражаемые от Es-слоя в силу геометрии распространения не всегда попадают в точку приёма, что усложняет задачу рекомендации надёжных рабочих частот, особенно в реальном времени — необходимо не только иметь оперативную информацию о состоянии ионосферы, но и считать трассировку лучей. Найденные диапазоны частот с наибольшей вероятностью отражения иллюстрируют механизмы возникновения спорадических слоёв, следовательно, могут быть предсказаны моделями высокоширотной ионосферы. Вероятность отражения частот во всех случаях, кроме

возмущенных условий в летний период, не превышает 80 %, поэтому необходимо более детальное исследование с модельными расчетами положения аврорального овала, критической частоты Es-слоя и данных со спутников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В., Жеребцов Г. А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 271 с.
 Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связьиздат, 1960. 391 с.
 Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах // Вестник РФФИ. 2020. № 3–4(107–108). С. 60–78. DOI 10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78.
 Патент на «Программное обеспечение для модернизации параметров KB радиоканала, учитывающего эффекты модификации высокоширотной ионосферы при воздействии мощных KB радиоволн, представляющее модель KB радиоканала (CHATRASCA: TRASSA и CHANNEL)» № 2014618249 от 13.08.2014.
 URL: <https://kauai.cmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri/> (дата обращения 10.05.2024)