

## ВОЗМОЖНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ КАНАЛОВ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ СПОРАДИЧЕСКИЙ *Es* 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 *Es* 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 *Es*-слоя для всех частот излучаемых диапазонов передатчиков.

**Ключевые слова:** наклонное радиозондирование ионосферы, высокоширотная ионосфера, спорадический *Es*-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 *Es* layer were obtained for all frequencies of the radiated ranges of transmitters.

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

### ВВЕДЕНИЕ

По данным наклонного зондирования высокоширотной ионосферы [Калишин и др., 2020] спорадический *Es*-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 *Es*-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  $\Sigma Kp$ -индекса. Спокойные дни соответствовали требованию  $\Sigma Kp < 15$ , слабовозмущенные  $15 \leq \Sigma Kp \leq 24$ , а возмущенные  $\Sigma Kp > 24$ .

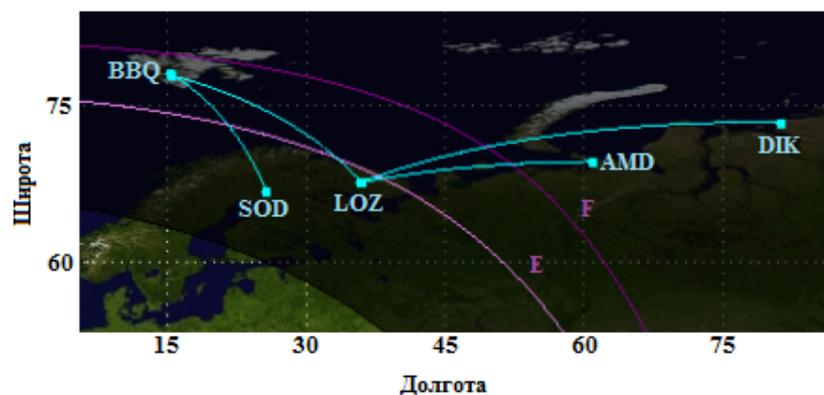


Рис. 1. Геометрия изучаемых радиотрасс. В качестве примера нанесены линии терминатора на высоте *E* и *F* областей ионосферы в 13 UT 16 декабря

### 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.

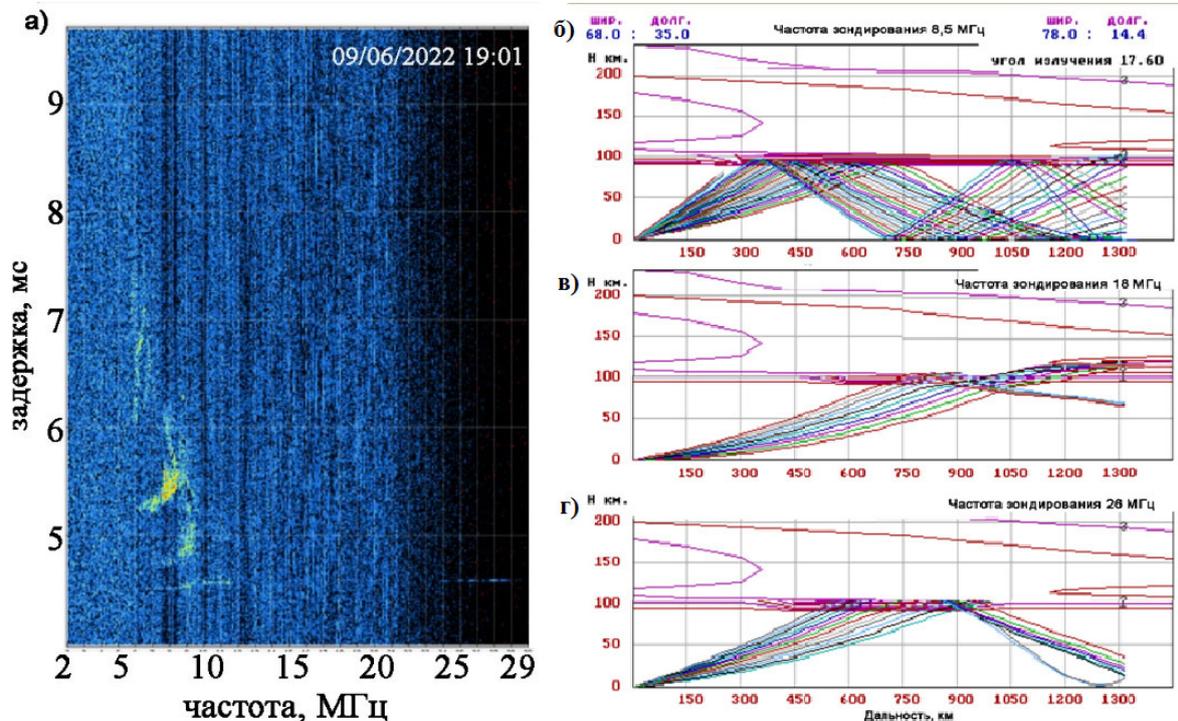


Рис. 2. Примеры ионограммы наклонного радиозондирования с прерывистым треком отражения от области *E* на трассе с. Ловозеро – п. Баренцбург в летний период (а), и результаты моделирования лучевых траекторий распространения радиоволн на трассе Ловозеро – Баренцбург для частот 8.5 МГц (б), 18 МГц (в) и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

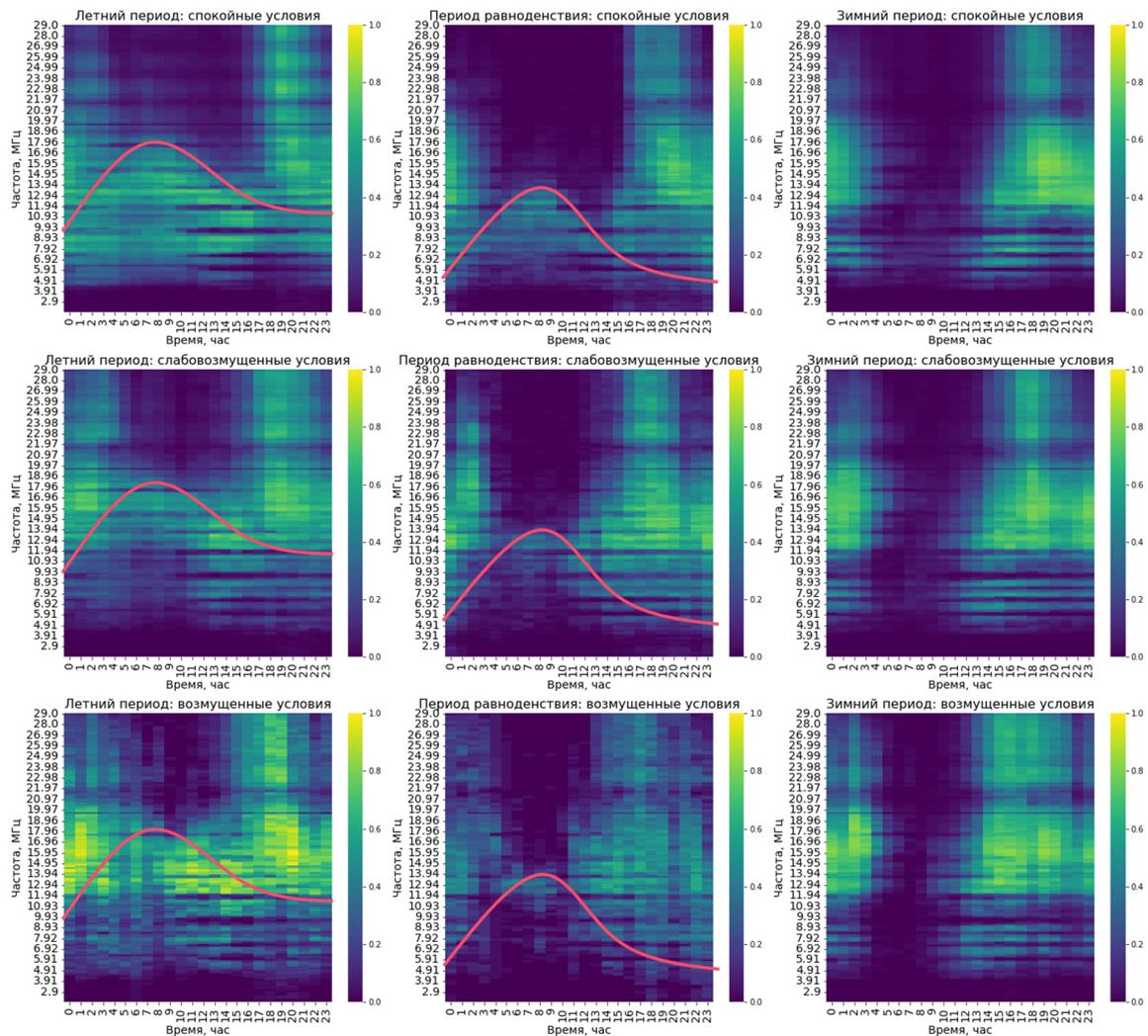


Рис. 3. Распределение вероятностей отражения по часам для каждой частоты трассы LOZ–DIK. Критические частоты регулярного E-слоя, пересчитанные в МГц, обозначены красной линией. Время в UT

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 двум 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)