ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.К.ФЕДОРОВА

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

электронный научный журнал
2026/52

Москва, 2026

ISSN 2304-7380

Электронный научный журнал «Гелиогеофизические исследования»

Главный редактор
Репин А. Ю., д.ф-м.н., доцент

Адрес редакции
129128, Россия, г. Москва, ул. Ростокинская, 9

Сайт: http://vestnik.geospace.ru

E-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Выходные данные «Гелиогеофизические исследования»
Журнал «Гелиогеофизические исследования» является сетевым электронным изданием.
Издаётся с 2012 года.
Доменное имя сайта vestnik.geospace.ru

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-50054 от 29 мая 2012 г., ISSN 2304-7380.
Учредителем, редакцией, издателем, распространителем, собственником имущества редакции журнала является федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Фёдорова» (ФГБУ «ИПГ»).

В журнале публикуются результаты научных исследований по проблемам прикладной геофизики отечественных и зарубежных учёных, научные обзоры, оригинальные теоретические и экспериментальные работы, материалы научных сессий, конференций, информация о событиях.
Тематика представляемых к публикации материалов регламентируется названием электронного журнала и его внутренних рубрик. Особое предпочтение отдаётся научным разработкам, учебно-методическим и образовательным инновациям в комплексных и актуальных областях научно-прикладных исследований.
В журнале публикуются статьи, отражающие результаты проблемно-ориентированных и прикладных научных исследований.

Плата за публикацию статей не взимается. Распространяется бесплатно.

СОДЕРЖАНИЕ

Аверин А. А., Ким В. Ю., Сахтеров В. И. Использование антенн зенитного излучения для наклонного зондирования ионосферы…... 4

Щирый А. О. Модифицированный алгоритм автоматического вычисления максимальной наблюдаемой частоты по ионограмме наклонного зондирования ионосферы..... 13

Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Долговременные тренды высоты слоя E..... 23

Кондратов А. Д., Холодков К. И., Буров В. А. Краткосрочное прогнозирование геомагнитных бурь с помощью прогнозирования планетарного К-индекса 32

Козлов С. И., Николайшвили С. Ш., Яким В. В., Якубовский С. В. Анализ перспективных направлений повышения эффективности функционирования радиолокационных средств 40

Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А. Тренды критической частоты слоя e по данным станции Москва..... 46

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 4 – 12, 2026

Поступила в редакцию 09.06.2025 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 621.371.332.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТЕНН ЗЕНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А. А. Аверин[1], В. Ю. Ким[1], В. И. Сахтеров[1,2]

[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Россия*
[2]*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия*

Ионосферная сеть Росгидромета, оснащенная отечественными ионозондами «Парус-А», производит измерения состояния ионосферы в 15-минутном режиме, при этом в последнее время появилась тенденция измерения в 5-минутном режиме. Также в связи с сокращением времени зондирования до 1-6 секунд появляется возможность проведения дополнительных измерений в режимах наклонного зондирования. Проведены экспериментальные исследования антенных систем, используемых в ионозондах серии «Парус-А», и излучающей антенны ЛЧМ-ионозонда, используемой в ИЗМИРАН для совместных экспериментов с Нижним Новгородом и Ростовом-на-дону. Показана возможность использования стандартных антенно-фидерных устройств ионозондов «Парус-А» после модернизации для проведения вертикального и наклонного зондирования ионосферы между станциями сети Росгидромет. Интересным представляется также получение ионограмм с 1 МГц и ниже.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, «Парус-А», антенны, скрещенный диполь, большой и малый ромб, дельта-антенна, вертикальное зондирование, наклонное зондирование.

EDN: ADCDGJ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ионосферная сеть Росгидромета производит измерения состояния ионосферы в 15-минутном режиме, используются импульсные ионозонды «Парус-А» с длительностью импульса 100 мкс в диапазоне частот от 1 до 20 МГц [Гивишвили и др., 2013]. В ряде публикаций приводятся характеристики экспериментальных быстродействующих ионозондов с временем зондирования менее 10 секунд, в которых описаны установки с временем зондирования около 1 секунды [Браницкий и др., 2020; Ким и Полиматиди, 2013]. Учитывая, что происходит снижение уровня излучаемой мощности импульсов: 20 кВт ионосферной станции «Базис», 15 кВт станция «Парус-А», то можно предположить, что при этом уменьшается общий уровень помех от ионозондов в декаметровом диапазоне. Также обычно ионозонд «Парус-А» для увеличения срока службы ламп выходного каскада РПДУ работает при минимальной мощности 3 кВт, что сопоставимо с выходной мощностью ионозонда «Томион», использующего транзисторный передатчик с выходной мощностью 4 кВт [Колесник и др., 2024]. Все вышеприведенные данные способствуют кардинальному сокращению времени измерения ионограммы с 30-40 до 1-6 секунд. Появилось несколько станций, производящих ионосферные наблюдения в 5 минутном режиме. Учитывая проведение

Электронная почта авторов для переписки:

Ким Валерий Юрьевич, e-mail: vkim@izmiran.ru
Сахтеров Владимир Иванович, e-mail: sakhterov@ipg.geospace.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/adcdgj

экспериментальных работ по наклонному зондированию (НЗ) между однотипными станциями сети Росгидромет и при использовании транзисторных передатчиков встает вопрос о проведении регулярных сеансов НЗ внутри сети [Литвинов и др., 2024; Корляков и Литвинов, 2023].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяемые на ионосферных станциях антенно-фидерные устройства зенитного излучения в основном двух типов: антенна типа «Дельта» и антенна типа «Ромб». При этом в ионосферных обсерваториях ионозонд работает на две разные антенны «Ромб» с разными размерами антенных полотен – большим и малым. В процессе регистрации ионограммы передатчик в диапазоне рабочих частот от 1 до 6 МГц работает на большое полотно, а на частотах свыше 6 МГц переключается на малое полотно.

У обеих антенн согласующий трансформатор расположен снизу у центральной мачты, наверху мачты располагается нагрузочный резистор 600 Ом для согласования АФУ с передатчиков в широком диапазоне частот, коэффициент стоячей волны не превышает значения 6. Результаты моделирования таких антенн приведены в ряде публикаций [Корляков и Литвинов, 2023; Козлов и Гарбацевич, 2008]. В результате образования в диапазоне частот очень сложных диаграмм направленности излучающей антенны возможно проведение НЗ для станций, расположенных на небольших расстояниях или при удачном расположении АФУ. В отличие от приемных антенн, обязательно располагаемых по направлению «Север-Юг» и «Запад-Восток», излучающие антенны располагаются исходя из территориальных возможностей.

Для НЗ на протяженных трассах обычно применялись направленные V-образные антенны, но вследствие необходимости расположения двух вибраторов длиной более 50 метров и углом между вибраторами 100° требуются соответствующие территории [Сахтеров и др., 2002]. В ИЗМИРАН для экспериментов по НЗ долгое время применяется модернизированная антенна типа «Ромб» с элементами антенны бегущей волны. В такой антенне, приведенной на рисунке 1Б, произведено удлинение в два раза одного вибратора, и нагрузочный резистор перенесен в сторону удлиненного участка антенны. Вследствие такой модернизации диаграмма направленности смещена от зенита к горизонту. Конечно, в зависимости от рабочей частоты диаграмма направленности имеет сложную форму, и на частотах ниже 5 МГц антенна излучает в основном в зенит, а на высоких частотах порядка 10 МГц значительная мощность уходит в направлении удлиненного вибратора.

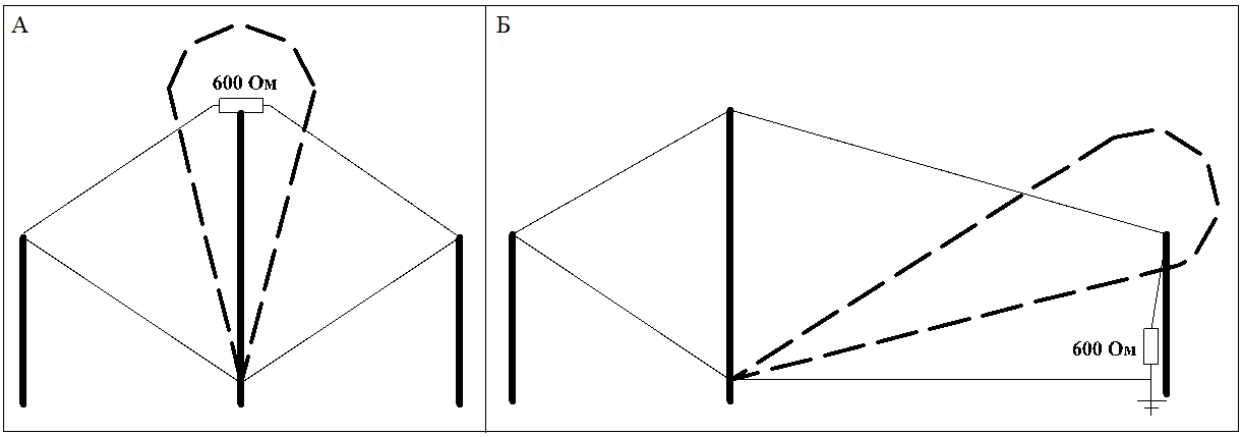

Рис. 1. Виды антенных полотен типа «Ромб» для ионозондов ВЗ: А – подключение для зенитного излучения; Б – модернизированная антенна «Ромб» для наклонного излучения. Направление основного излучения показано штриховой линией, полотно антенны и нагрузочный резистор показан тонкой линией, опорные мачты (стойки) показаны толстыми линиями

Передающая антенна такого типа ранее применялась в ИЗМИРАН для экспериментальных исследований ракурсного рассеяния (РР) радиоволн от искусственных магнитно-ориентированных неоднородностей, которые создавались в ионосфере при работе нагревного стенда «Сура». На рисунке 2 представлен пример регистрации ионограммы вертикального зондирования (ВЗ) в момент работы стенда «Сура», видно, что ионограмма ВЗ имеет четкие треки начиная с частоты ~1.2 МГц, критическая частота ионосферы равна 5.8. Одновременно в интервале частот от ~10 МГц до ~ 11.5 МГц

видны сигналы РР в интервале дальностей от ~ 650 км до 700 км. Полученная дальность сигналов РР соответствует наклонной дальности до области нагрева над стендом «Сура», поэтому можно считать, что антенна достаточно эффективно излучает в боковом направлении удлиненного вибратора антенны.

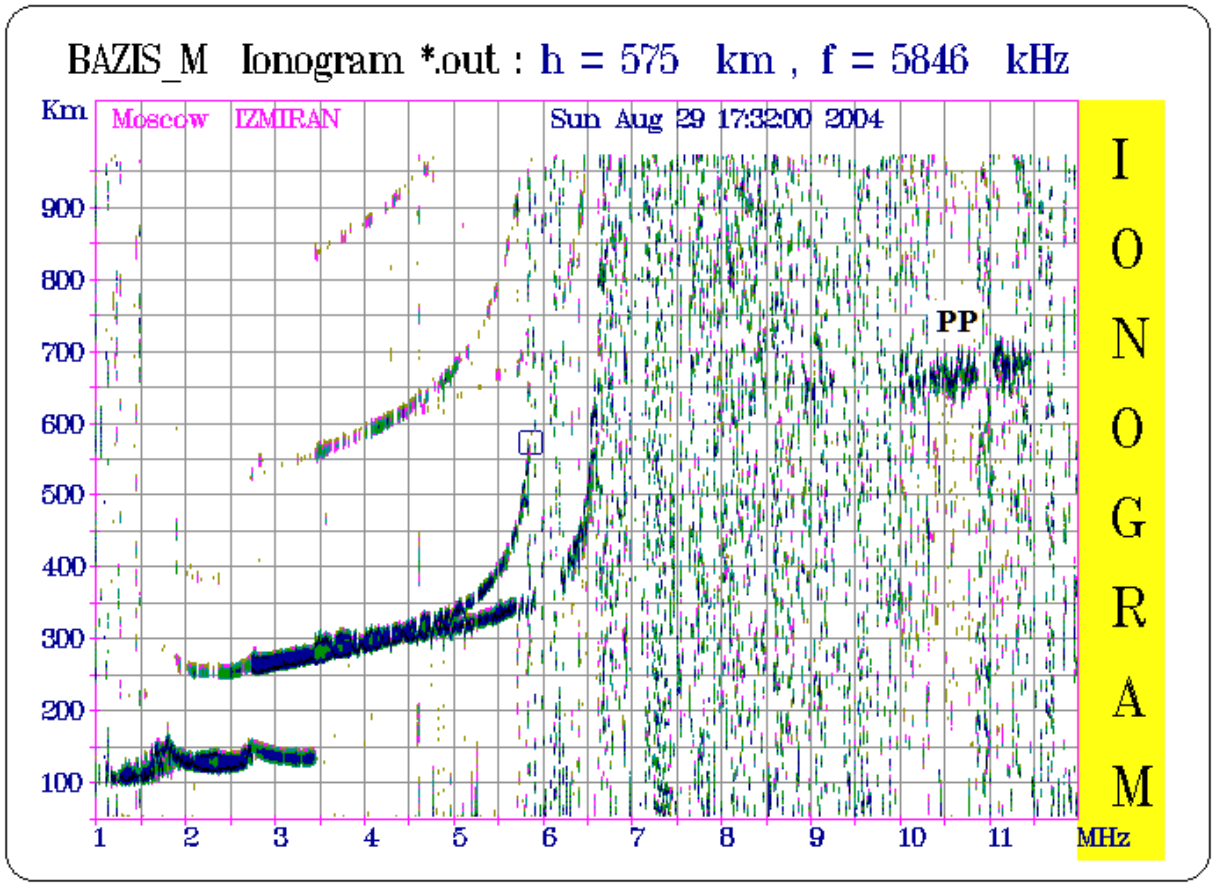

Рис. 2. Ионограмма ВЗ над Москвой и сигналы обратного ракурсного рассеяния от возмущенной области над стендом «Сура. Квадратным значком показана критическая частота слоя *F*2, РР – сигналы ракурсного рассеяния. Ионозонд «Базис-М», 17:32:00 МДВ 29.08.2004 г., Троицк, ИЗМИРАН.

Рассматриваемая здесь антенна также использовалась в экспериментах по ЛЧМ наклонному зондированию на трассе Москва (ИЗМИРАН) – Ростов-на-Дону (ЮФУ), когда непрерывный ЛЧМ-сигнал излучался в основном в направлении нагревного стенда «Сура». На рисунке 3 приведена соответствующая ионограмма НЗ, из которой видно, что в пункте приема Ростов-на-Дону одновременно принимаются сигналы НЗ из Москвы и сигналы ракурсного рассеяния от области нагрева над стендом «Сура». Это свидетельствует о том, что передающая антенна в ИЗМИРАН имеет достаточную азимутальную эффективность для использования в задачах НЗ.

Данная антенна имеет значительные размеры, т.к. боковая стойка удлиненного вибратора расположена на двойном расстоянии по сравнение со стандартной антенной. Высота центральной мачты 22 метра, высота боковых стоек 12 метров и учитывая, что стандартное расстояние между мачтой и боковой стойкой у антенны типа «Ромб» составляет ~ 50 метров, то при удвоении расстояния до боковой стойки общая длина между боковыми стойками составляет ~ 150 метров. Естественно, не на всех ионосферных станциях есть такие площади для размещения антенно-фидерных устройств такого размера.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

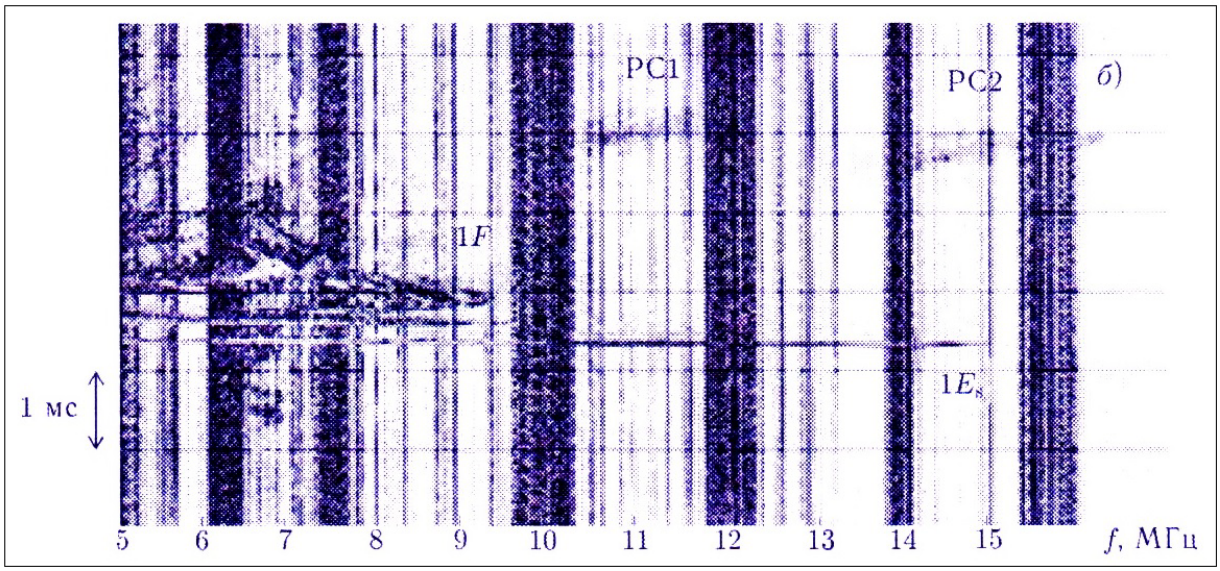

Рис. 3. Ионограмма ЛЧМ-зондирования на трассе ИЗМИРАН – «Сура» – Ростов-на-Дону, снятая в 15:06 UT 31 августа 2007 г. Здесь 1F – мода распространения прямого сигнала через F – слой, 1E_S – мода распространения прямого сигнала через спорадический слой E, РС – рассеянные сигналы [Урядов и др., 2008]

Для исследования возможности использования описанной выше модифицированной антенны для проведения одновременно ВЗ и НЗ было проведено численное моделирование диаграмм направленности при изменении длины одного из вибраторов антенны типа «Дельта» (рис. 4). На рисунке 4А видно, что у стандартной антенны «Дельта» основной лепесток диаграммы направлен в зенит, а у модифицированной «Дельта» (рис. 4Б), основной лепесток диаграммы направленности наклоняется в сторону удлиненного вибратора. Отметим, что при такой конфигурации полотна антенны нагрузочный резистор с вершины центральной мачты переносится в сторону удлиненного вибратора, что значительно упрощает профилактику и обслуживание такой антенны.

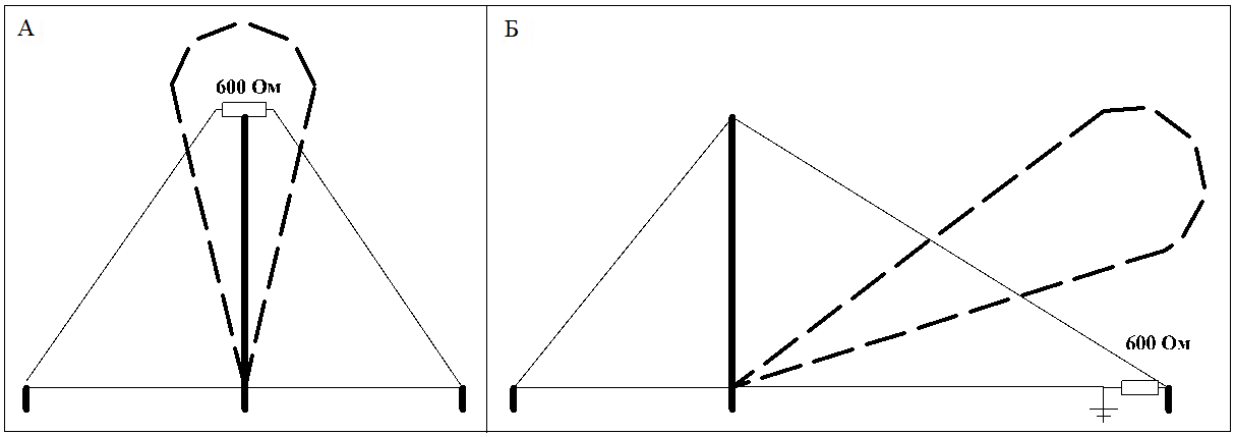

Рис. 4. Антенна типа «Дельта»: А – подключение для зенитного излучения; Б – модернизация для наклонного излучения. Направление основного излучения показаны штриховыми линиями, полотна антенн и нагрузочные резисторы показаны тонкими линиями, опорные мачты (стойки) показаны толстыми линиями

Программное моделирование также показало, что при расположении боковых мачт высотой 2.5 м и расстоянии 30 и 60 метров от центральной мачты антенна типа «Дельта» незначительно уступает по характеристикам антенне типа «Ромб». Однако, как обычно для антенн декаметрового диапазона, на каких-то частотах эффективность излучения в направлении главного максимума выше у одной антенны, а на других частотах – ниже. Отметим, что изображение диаграмм направленности приводится схематично, для наглядности изображены только примерное расположение главных лепестков, без боковых.

Дальнейшее развитие создания компактных антенн для ионосферных наблюдений было предложено на основе модификации антенны типа «Дельта». Известно, что одним из недостатков обычной антенны типа «Дельта» является неэффективность излучения на частотах ниже 3 МГц из-за недостаточного размера полотна антенны. Это можно изменить при наличии достаточно мощного передатчика за счет увеличения излучаемой мощности, однако при использовании транзисторного широкополосного передатчика необходимое увеличение мощности затруднительно. Программное моделирование показало низкую эффективность антенны типа «Дельта» на частоте 1 МГц по сравнению с 20 МГц [Программа…].

Вместо увеличения мощности данную задачу можно решить через увеличение эффективности антенно-фидерного устройства. Потому для решения данной проблемы было предложено сделать двойную «Дельту» с удлиненными вибраторами. Схема такой антенны приведена на рисунке 5 и представляет собой два удлиненных вибратора, располагаемых зеркально. При этом вместо верхнего нагрузочного сопротивления 600 Ом используются два резистора по 300 Ом, через которые удлиненные вибраторы заземляются на грунт.

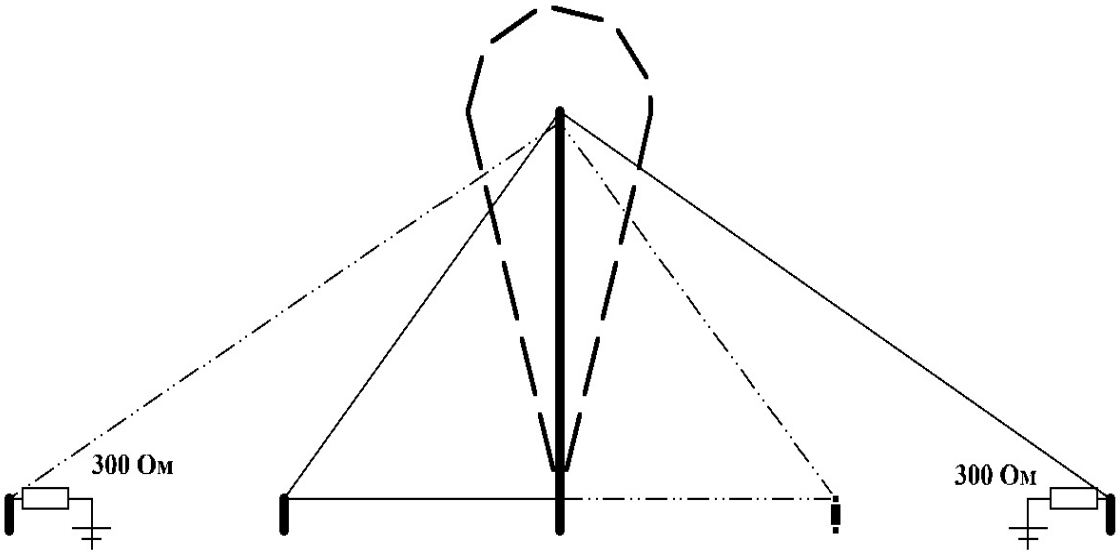

Рис. 5. Антенна типа двойная «Дельта» с удлиненными вибраторами. Направление зенитного излучения показано пунктирной линией, вибраторы антенны показаны тонкими сплошными и штрихпунктирными линиями, нагрузочные резисторы показаны тонкими сплошными линиями, опорные мачты (стойки) показаны толстыми линиями

Для наглядности вибраторы изображены разными линиями, диаграмма также приведена пунктирной линией. Данная антенна была изготовлена в ИЗМИРАН на основе мачты высотой 12 м. Боковые стойки высотой 2 метра располагались на расстояниях 15 и 30 метров от центральной мачты. Для сравнительных экспериментов на этой же матче перпендикулярно располагалась антенна типа «Дельта» с длиной между стойками 30 метров. Согласующий трансформатор 1:12 располагается внизу центральной мачты.

При экспериментах использовался ионозонд «Парус» с испытательного стенда ИЗМИРАН, прием осуществлялся на штатные антенны стенда, скрещенная антенна типа «Дельта», высотой 18 метров, расстояние между боковыми стойками 36 м. Передающая антенна стенда типа «Дельта», высота 20 м, расстояние между боковыми стойками 56 м. Для излучения использовался транзисторный усилитель мощности с выходной мощностью 1.2 кВт «СОМ» от экспериментального ионозонда со стенда «Электроугли», его применение снимает ограничения по интервалу между сеансами зондирования. На рисунке 6 приведены ионограммы, полученные при излучении антеннами типа «Дельта» с разными высотами центральных мачт и с разными длинами вибраторов. Прием осуществлялся на штатные скрещенные приемные антенны стенда, физические размеры передающих антенн приведены в комментариях к рисункам. На принятых ионограммах минимальная частота в районе 4 МГц.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

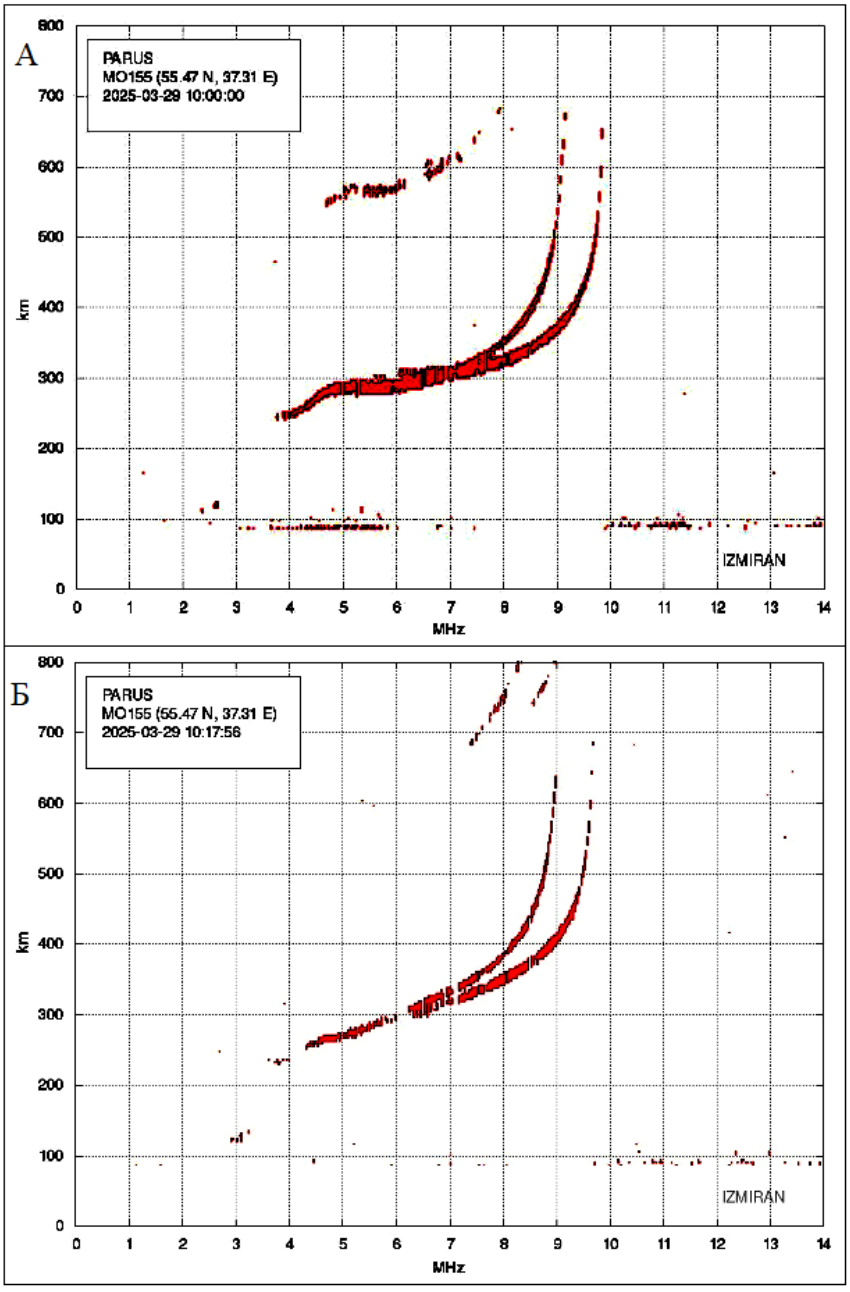

Рис. 6. Ионограмма ВЗ, ионозонд «Парус», антенна типа «Дельта»: А – высота 20 м, расстояние между боковыми стойками 56 м; Б – высота 12 м, расстояние между боковыми стойками 30 м

На рисунке 7 приведены ионограммы, принятые на штатные антенны стенда. Для излучения использовалась антенна типа двойная «Дельта», минимальная частота приема наблюдается около 2 МГц. Учитывая, что минимальная частота приема зависит в основном от характеристик передающей антенны и излученной мощности, результаты проведенного эксперимента показывают возможность снижения минимальной частоты приема при использовании центральной мачты высотой 18-22 метра. Высота боковых мачт 2 метра выбрана исходя из норм электробезопасности для обслуживающего персонала. Расстояние между боковыми и внутренними стойками выбирается исходя из территориальных возможностей места расположения излучающей антенны.

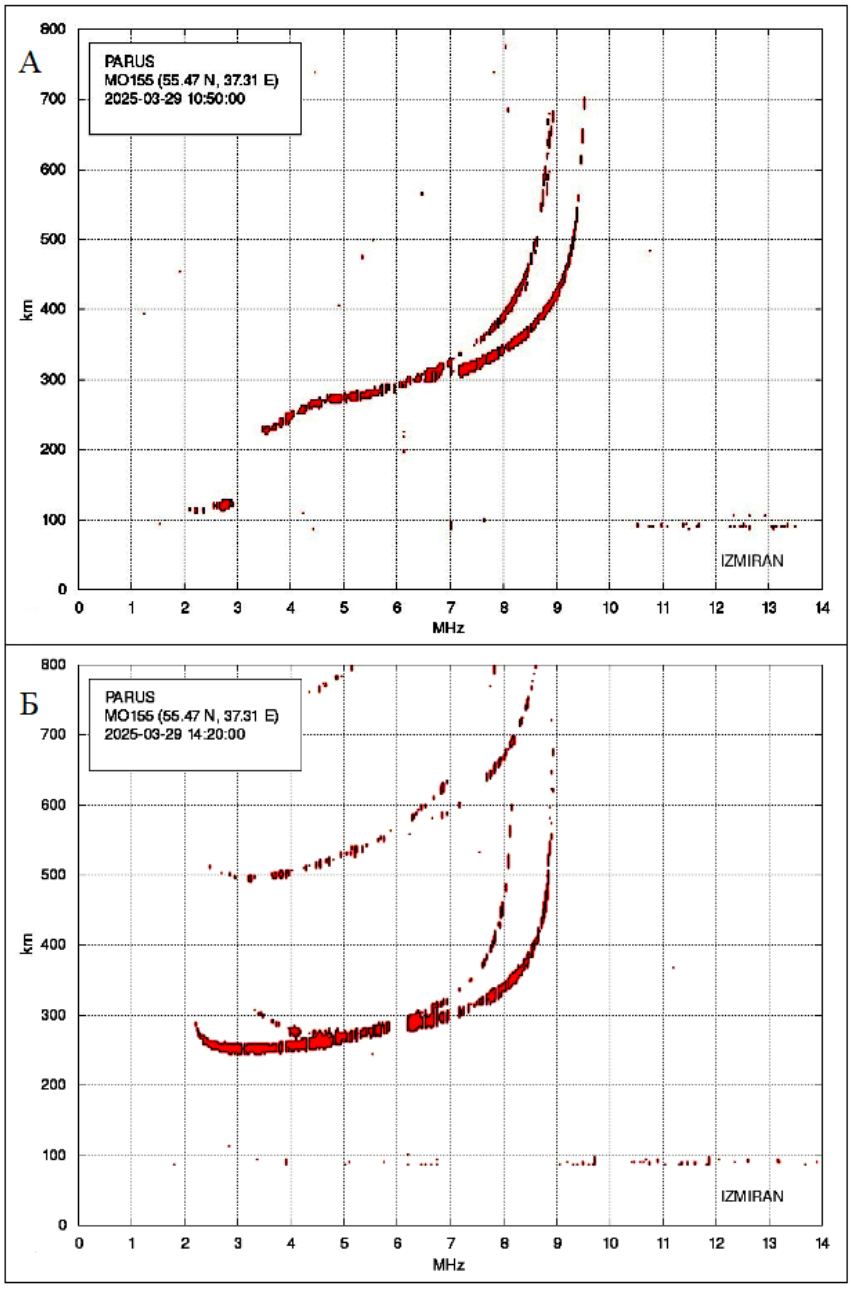

Рис. 7. Ионограмма ВЗ, ионозонд «Парус», передающая антенна типа двойная «Дельта» высотой 12 м, расстояние между промежуточными боковыми стойками 30м, расстояние между боковыми стойками 60 м: А – время 10:50; Б – время 14:20

Для сравнения приведем ионограмму сетевого ионозонда «Парус-А» с излучающей антенной типа «Ромб», высота центральной мачты 24 метра, расстояние между боковыми стойками 100 м, приемная скрещенная антенна типа «Дельта», расстояние между боковыми стойками 70 м, минимальная частота приема около 1.5 МГц.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

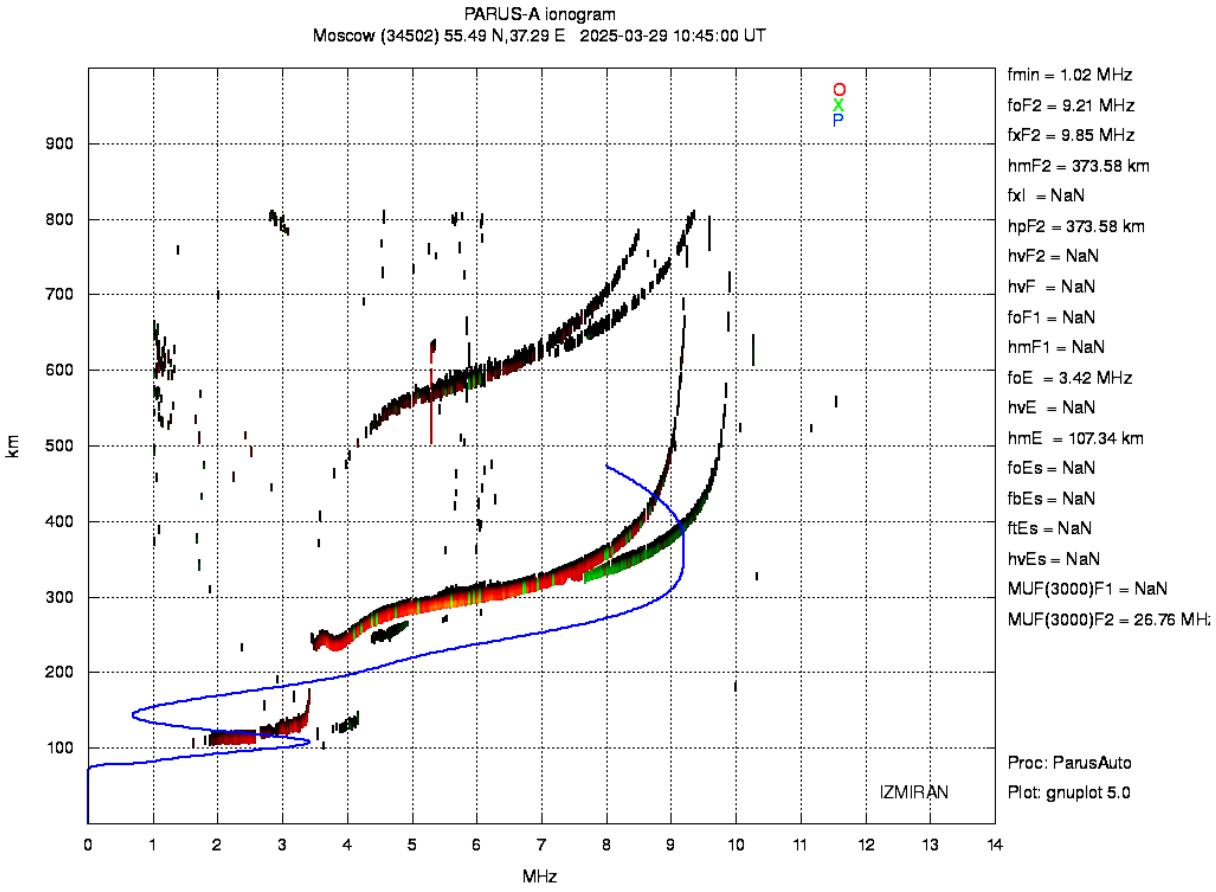

Рис. 8. Ионограмма ВЗ, ионозонд «Парус-А», штатные антенны, станция «Москва»

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали возможность разработки компактной совмещенной антенны для проведения вертикальных и наклонных зондирований между двумя станциями. Размещение дополнительных элементов антенно-фидерных устройств внутри существующих габаритов позволяет получать ионограмму с более низких частот. При создании соответствующей системы коммутации компонентов возможно проведение наклонного зондирования между несколькими станциями, не только расположенными на одной широте, как, к примеру Калининград-Москва-Сура по направлению главного лепестка диаграммы направленности антенны станции Москва, но, как показали эксперименты, возможен прием сигналов боковых лепестков диаграммы направленности антенны станции Москва станцией Ростов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

ЛИТЕРАТУРА

– *Браницкий А.В., Ким В.Ю., Полиматиди В.П.* Быстрые вариации профилей электронной концентрации в ионосфере, обнаруженные с помощью быстродействующего ионозонда ИЗМИРАН // Геомагнетизм и аэрономия, том 60, №1, 2020. С. 1-17.

– *Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В.* Ионозонд "Парус-А": функциональные возможности и перспективы развития // Гелиогеофизические исследования, №4, 2013. С. 68-74. EDN: RCWNVT.

- *Ким В.Ю., Полиматиди В.П.* Способ получения ионограмм // Патент RU 2552530 C2. Зарегистрирован 01.08.2013 г. EDN: UKVKFO.
- *Козлов А.Н., Гарбацевич В.А.* Ромбические антенны ионозонда – результаты компьютерного моделирования // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, № 10(28), 2008. С. 243-249.
- *Колесник С.А., Романов И.В., Пикалов М.В., Тужилкин Д.А.* Исследовательский ионозонд «ТОМИОН» // Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности. Тезисы XV научно-технической конференции. Москва: ИЗМИРАН, 2024. С. 60-63. EDN: HJINYY.
- *Корляков Д.С., Литвинов С.В.* Антенная система ионозонда для совмещенного зондирования ионосферы // Антенны, №1, 2023. С. 50-62. EDN: YHHEBZ.
- *Литвинов С.В., Паньшин Е.А., Скрипачев В.О., Стариковский А.И.* Влияние взаимного расположения антенн ионозондов «Парус-А» на результаты наклонного зондирования // Антенны, №4, 2024. С. 27-35. EDN: LDDZXS.
- Программа моделирования антенн MMANA-GAL basic 3.0.0.30 [Электронный ресурс]. URL: http://www.radio.ru/mmana/ (дата обращения: 15.12.2025).
- *Сахтеров В.И., Писарев Р.В., Лобзин В.В., Копейкин В.В., Резников А.Е., Железняков В.И., Щвец Д.П.* Коротковолновая широкополосная радиостанция «АНГАРА-5М» // Радиотехника и электроника, том 47, №9, 2002. С. 1149-1152. EDN: ZHXCPR.
- *Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В., Черкашин Ю.Н., Крашенинников И.В., Комраков Г.П., Валов В.А.* О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // Изв. вузов. Радиофизика, №51, 2008. С. 1011-1025.

THE USE OF A COMPACT ZENITH RADIATION ANTENNA FOR VERTICAL AND OBLIQUE SOUNDING OF THE IONOSPHERE

Averin A.A., Kim V.Yu., Sahterov V.I.

The Roshydromet ionospheric network, equipped with domestic Parus-A ionosondes, measures the state of the ionosphere in a 15-minute mode. Recently, there has been a tendency to take measurements in a 5-minute mode. Also, due to the reduction of the probing time to 1-6 seconds, it becomes possible to obtain additional measurements in inclined sensing modes. Experimental studies of antenna systems used in ionosondes of the Parus-A series and the radiating antenna of the LFM ionosonde used in Izmir for joint experiments with Nizhny Novgorod and Rostov-on-Don have been carried out. The possibility of using standard antenna-feeder devices of the Parus-A ionosondes after modernization for conducting inclined sounding of the ionosphere is shown.

KEYWORDS: IONOSPHERE, IONOSONDE, "PARUS-A", ANTENNAS, CROSSED DIPOLE, LARGE AND SMALL RHOMBIC ANTENNAS, DELTA ANTENNA, VERTICAL SOUNDING, INCLINED SOUNDING.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 13 – 22, 2026

Поступила в редакцию 01.09.2025 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 621.371

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ ПО ИОНОГРАММЕ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А. О. Щирый[1]

[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова, Москва, Россия*

Предложена модификация алгоритма автоматического вычисления максимальной наблюдаемой частоты по ионограмме наклонного зондирования ионосферы. Базовый алгоритм основан на критерии обнаружения резко выделяющихся значений выборки, причем критерий применяется “наоборот”, т.е. резко выделяющиеся отсчеты выборки (в данном случае, амплитудного спектра сигнала ионозонда) считаются полезным сигналом; далее для ионограммы с выделенным полезным сигналом, интерпретируемой как двумерный массив данных, происходит выделение границ областей, занятых сигналом – таким образом происходит вычисление наименьшей и максимальной наблюдаемых частот. Базовый алгоритм хорошо работает при определении глобальной максимальной наблюдаемой частоты, однако для определения максимальной наблюдаемой частоты конкретной моды требуется его модификация. Построчное суммирование амплитуд точек ионограммы и «нарезание» на области по полученной суммарной гистограмме позволяют выделить диапазон времен группового запаздывания (область интереса), в котором далее находится максимальная наблюдаемая частота согласно базовому алгоритму. Приведены оценки качества работы базового и модифицированного алгоритмов, полученные путем сравнения с «ручной» обработкой ионограмм человеком (экспертом).

Ключевые слова: распространение коротких радиоволн, ионосфера, наклонное зондирование ионосферы, ионограмма, максимальные наблюдаемая частота, выделение сигнала.

EDN: BJMYII

1. ВВЕДЕНИЕ

Короткие волны (КВ) могут распространяться на многие тысячи километров путем многократных последовательных отражений от ионосферы и земной поверхности. КВ радиолиниям большой протяженности (тысячи километров) присуща многолучевость распространения радиосигнала, когда в точку приема одновременно приходит несколько лучей (мод). Условия распространения КВ радиоволн зависят от множества суточных, сезонных, гео- и гелиофизических факторов, протяженности и географического положения радиолинии и др. Поэтому исследование эффектов распространения КВ представляет не только важную научную задачу, но и прикладную. Современным методом исследования распространения КВ является наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) непрерывными сигналами с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [Филипп и др., 1991; Авдюшин (ред.), 2008; Калинин и др., 2018; Щирый, 2007; Щирый, 2022].

Электронная почта авторов для переписки:

Щирый Андрей Олегович, e-mail: sao@izmiran.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/bjmyii

Результатом работы ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимость амплитуды сигнала от частоты и времени группового запаздывания [Филипп и др., 1991; Авдюшин (ред.), 2008] (рис. 1, горизонтальная ось – частота, вертикальная ось – время группового запаздывания). Максимальной наблюдаемой частотой (МНЧ) ионосферного распространения КВ радиосигнала называется верхняя граница частотного диапазона распространения. Аналогично, наименьшей наблюдаемой частотой (ННЧ) ионосферного распространения КВ радиосигнала называется нижняя граница частотного диапазона распространения.

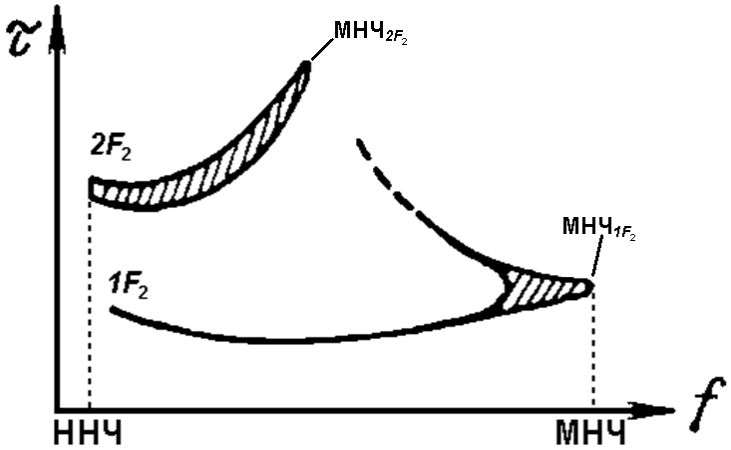

Рис. 1. Ионограмма НЗИ (схематично)

Оперативное автоматическое определение диапазона прохождения КВ радиосигнала в ионосфере (т.е. диапазона [ННЧ, МНЧ]) крайне важно для радиотехнических систем КВ диапазона. Например, адаптация загоризонтных радиолокационных станций КВ диапазона к геофизическим условиям происходит так: сначала находятся диапазоны прохождения (распространения) КВ сигнала, затем в этих диапазонах выбираются поддиапазоны с наименьшим уровнем помех [Алебастров и др., 1984; Акимов, Калинин, 2017; Fabrizio, 2013; Щирый, 2023]. Кроме того, исследование диапазона прохождения КВ радиосигнала в ионосфере имеет чисто научное значение [Урядов и др., 2021].

Также актуально автоматическое определение одной только МНЧ, поскольку многие ионосферные модели калибруются (подстраиваются под текущую геофизическую обстановку) по МНЧ [Филипп и др., 1991; Авдюшин (ред.), 2008]. Определение МНЧ имеет не только прикладное значение: кроме уже упомянутой калибровки ионосферных моделей, МНЧ как одна из важнейших макрохарактеристик ионосферы непосредственно используется для различных геофизических исследований в области солнечно-земных связей (например, [Бархатова и др., 2009]), для установления взаимосвязей с параметрами околоземного и межпланетного пространства (например, [Бархатова, 2011]).

Заметим, что в данной работе не будет говорится о максимально применимой частоте (МПЧ), поскольку в литературе наблюдается отсутствие единства её дефиниции (существуют самые различные варианты: и МПЧ как синоним МНЧ, и МПЧ как 0.85 от МНЧ, и как точка смыкания верхнего и нижнего лучей F_2 на ионограмме).

Вычисление МНЧ и ННЧ имеет большое практическое значение, поскольку являются первым этапом для нахождения оптимальных рабочих частот (ОРЧ); однако, в данной работе вопросы нахождения ОРЧ преднамеренно не затрагиваются, так как конкретные алгоритмы нахождения ОРЧ специфичны для различных видов РТС.

Задачи анализа вариаций МНЧ, а также задачи прогноза МНЧ конечно же ставились и решались ранее [Ким, 2023; Бархатов и др., 2006; Вертоградов Г.Г. и др., 2007; Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г 2020; Агарышев А.И., 1985; Агарышев А.И. и др., 2010; Ильин и др., 2018; Барабашов и др., 2019; Егошин, 2003], однако практически во всех этих работах МНЧ получались не автоматически, а путем ручной обработки ионограмм НЗИ. Если же решалась задача автоматического получения МНЧ [Егошин, 2003], то не ставились задачи построения временных рядов МНЧ. Вообще, задача автоматического определения МНЧ по ионограмме НЗИ является частным случаем более общих задач

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

выделения компонент полезного сигнала на ионограмме и выделения треков мод распространения полезного сигнала. Дадим краткий обзор некоторых работ по решению этих двух указанных задач.

Известен способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам [Цыбуля, 2019] и алгоритм обработки и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования [Пономарчук и др., 2013; Пономарчук, Золотухина, 2024], основанные на использовании трафаретных масок, когда для выделения сигнальных компонент на ионограммах применяются маски, полученные путем синтеза искусственных ионограмм на основе математических моделей распространения декаметровых радиоволн в ионосферной плазме, и подгоняемые под исследуемую экспериментальную ионограмму какими-либо методами. К недостаткам алгоритма относится то, что применяемые математические модели зачастую не обеспечивают приемлемую точность, особенно в условиях геомагнитных и солнечных возмущений, особенно в верхних широтах. Кроме того, при таком подходе невозможно выделение сигнальных компонент аномальных мод распространения.

Известен гистограммный метод выделения треков мод на ионограммах вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) [Зыков и др., 2008], ограничением которого является то, что принятые в нем гипотезы и допущения применимы только к ионограммам ВЗИ, и даже для таких ионограмм обоснованность гипотез в случае аномальных условий распространения требует экспериментальной проверки.

Делаются попытки [Thanakulketsarat et al., 2021; Guo, Xiong, 2023; Lu et al., 2022; Xiao et al., 2020; Li et al., 2023; De la Jara, Olivares, 2021] применения нейронных сетей для выделения сигнала на ионограммах, но с не очень понятной точностью и, как правило, только для ионограмм ВЗИ, более легких для обработки и интерпретации чем ионограммы НЗИ.

Такое повышенное внимание обзору работ в области выделения полезного сигнала на ионограмме НЗИ здесь обусловлено тем, что представленный в данной работе алгоритм автоматического вычисления МНЧ по ионограмме, включает в себя в качестве первого этапа некоторый алгоритм автоматического выделения спектральных компонент полезного сигнала.

2. БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ

Для решения задачи автоматического выделения спектральных компонентов сигнала на ионограмме НЗИ был применен метод обнаружения резко выделяющихся значений выборки [Щирый, 2007]. Такие методы хорошо разработаны в теории обработки результатов измерений [Новицкий, Зограф, 1991] (там резко выделяющиеся значения выборки обнаруживают для исключения из рассмотрения). Ранее эти методы применялись нами для обнаружения сосредоточенных помех [Щирый, 2023]. Однако, для решаемой здесь задачи, метод должен применяться “наоборот”, т.е. резко выделяющиеся отсчеты выборки (в данном случае, амплитудного спектра сигнала разностной частоты ЛЧМ ионозонда) должны считаться “полезным” сигналом. В указанной работе [Новицкий, Зограф, 1991] предложена классификация симметричных законов распределения, основанная на использовании оценок эксцесса и энтропии распределения; показана эффективность энтропийных оценок при исследовании случайных погрешностей измерительных устройств. При таком подходе спектр сигнала рассматривается в рамках модели смеси двух распределений с существенно различающимися дисперсиями и в этом случае суммарное распределение имеет вид распределения с “утяжеленными концами”.

В качестве меры «засоренности» концов распределения может служить несмещенная оценка коэффициента эксцесса E: удлинение концов распределения увеличивает ее значение. Для обнаружения “полезного” сигнала, спектр с полосой F разбивался на K не перекрывающихся элементов. Для каждого k-го элемента сигнала находились несмещенные оценки среднеквадратичного отклонения σ_k. Признаком отсчета, принадлежащего “полезному” сигналу, является его большое удаление от центра распределения. Тогда этот отсчет можно рассматривать как промах для совокупности отсчетов спектра фонового шума. Если для величины σ_k выполняется оценка:

$$|\sigma_k - \bar{\sigma}| \le s \cdot (1.55 + 0.8\sqrt{E+2} \cdot lg(K/10)), \quad (1)$$

где $\overline{\sigma} = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\sigma_i$, s – СКО для значений σ_k, то нет оснований считать это значение значительно отличающимся от среднего (то есть от «фона» ионограммы). Если неравенство (1) для некоторого элемента не выполняется и $\sigma_k > \overline{\sigma}$, то предполагается, что этот элемент сигнала относится к “полезному” сигналу. Пример применения этого алгоритма выделения сигнальных компонент на ионограмме показан на рисунке 2 (сверху – исходная ионограмма, снизу – только выделенные компоненты полезного сигнала). Этот алгоритм автоматического выделения спектральных компонент полезного сигнала был разработан нами ранее для задачи автоматического измерения АЧХ КВ радиолинии [Щирый, 2007], поэтому здесь показана только основная идея алгоритма и итоговая формула (1) без промежуточных рассуждений.

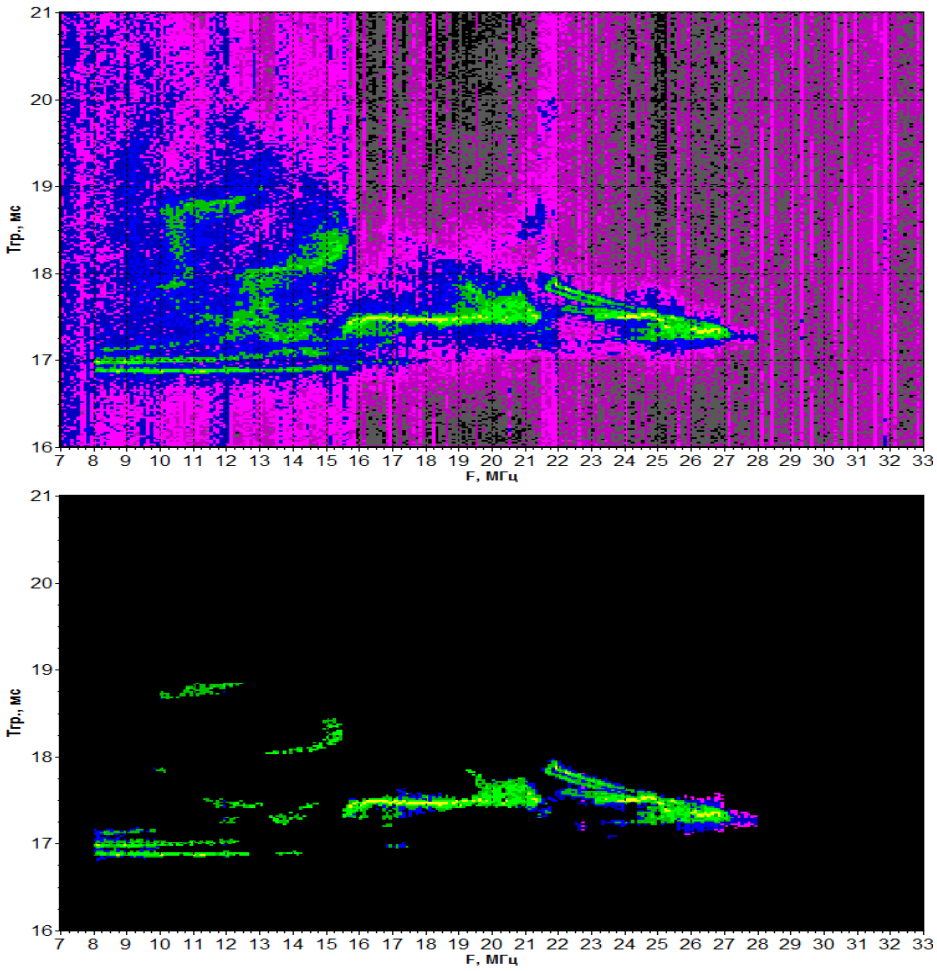

Рис. 2. Ионограмма до и после выделения сигнала

Далее с целью определения диапазона распространения для ионограммы с выделенным сигналом, интерпретируемой как двумерный массив данных или монохромный растр, происходит выделение границ областей, занятых сигналом. Для этого вычисляются суммы столбцов по горизонтали и вертикали (рис. 3). Суммирование по горизонтали позволяет определить диапазон времен группового запаздывания радиосигнала (не используется в базовом алгоритме, но используется в модифицированном алгоритме далее). Суммирование по вертикали позволяет определить частотный диапазон распространения радиосигнала. Нахождение границ производится путем просмотра полученных массивов и определения граничных элементов. Для устранения влияния оставшихся помех и одиночных выбросов, решение о выборе границы принимается не по ненулевому значению, а при превышении значением определенного заданного порога.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Таким образом автоматически вычисляются ННЧ и МНЧ по ионограмме НЗИ. Последовательность ионограмм, обработанная таким образом, позволяет получить временные ряды ННЧ и МНЧ.

Поскольку измерение МНЧ имеет несколько большую научную и практическую значимость (нежели ННЧ), чаще всего данный алгоритм применяется нами для построения временных рядов только МНЧ. Для оценки качества работы алгоритма автоматического определения МНЧ было проведено сравнение результатов с данными, полученными путем «ручного» определения МНЧ по ионограммам человеком (экспертом). Было обработано около 1000 ионограмм НЗИ различных радиолиний (Кипр – Йошкар-Ола, Кипр – Диксон, Кипр – Москва, Финляндия – Москва) различных лет и сезонов года. Коэффициент корреляции (Пирсона) по всей выборке составил величину 0.998, что говорит о высокой точности и надежности алгоритма. На рисунке 4 представлен пример временных рядов МНЧ для 5 соседних суток на радиолинии Кипр – Москва.

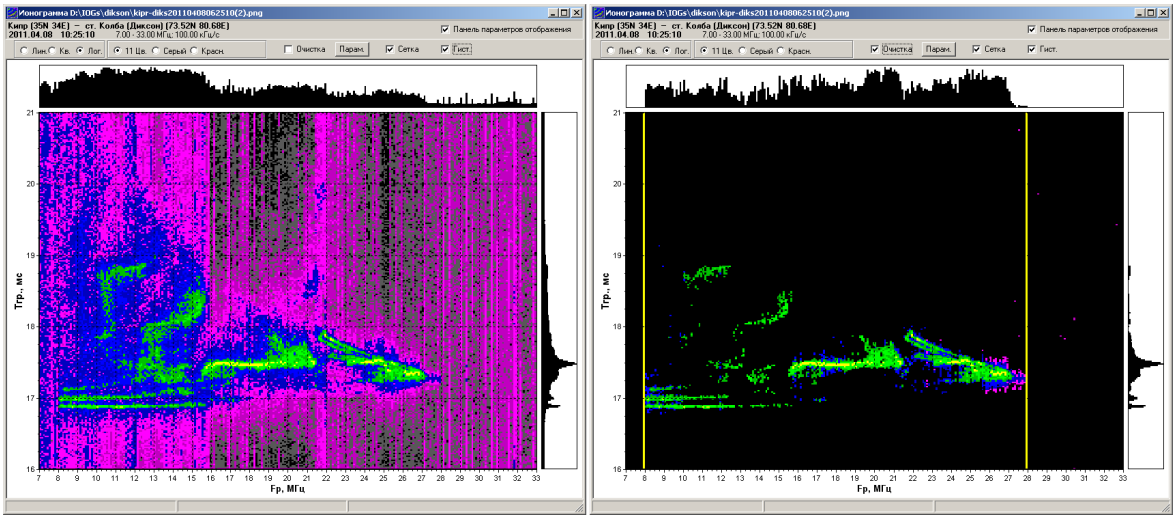

Рис. 3. Нахождение ННЧ и МНЧ по ионограмме НЗИ

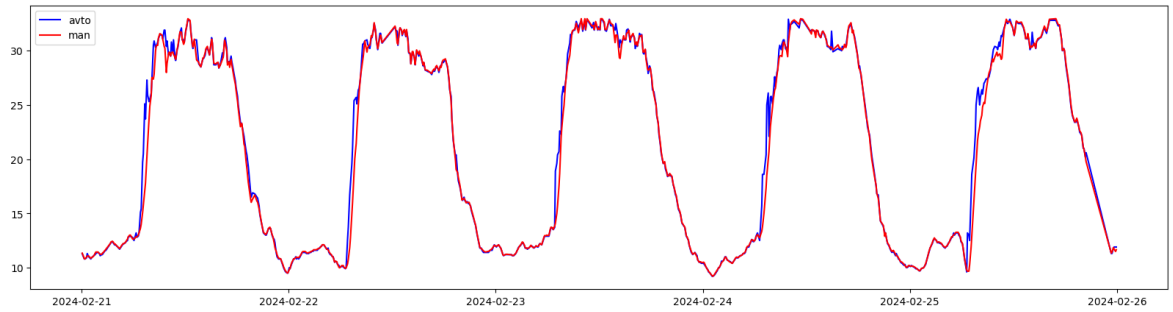

Рис. 4. Сопоставление автоматического и ручного выделения МНЧ

3. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

Зачастую неявно предполагается, что глобальная МНЧ является МНЧ слоя F_2, что действительно верно в большинстве случаев, но всё же не всегда: на рисунках 5 и 6 показаны примеры, когда это не так – при наличии протяженного трека слоя E и при наличии аномального «хвоста» трека слоя $2F_2$, соответственно. Очевидно, что в подобных случаях принятие глобальной МНЧ за МНЧ слоя F_2 приведет к ошибкам. Заметим, что задача поиска МНЧ именно слоя F_2 весьма актуальна поскольку по этой МНЧ калибруются многие модели ионосферы.

Описанный здесь выше алгоритм (называемый базовым, т.е. до модификации) хорошо работает при определении глобальной МНЧ, однако для определения МНЧ конкретных мод требуется его модификация. Предложенная нами модификация состоит в следующем. Упомянутое выше построчное суммирование амплитуд точек ионограммы позволяет выделить локальные максимумы на полученных гистограммах (см. вертикальные гистограммы справа от каждой ионограммы на рисунках 3, 5, 6);

окрестности каждого такого максимума являются диапазонами (по времени группового запаздывания) локализации точек треков соответствующих мод радиосигнала; величина окрестностей является гиперпараметром, задаваемым изначально, либо подбираемым в ходе отдельного этапа оптимизации. Таким образом, построчное суммирование амплитуд точек ионограммы и «нарезание» на области по полученной суммарной гистограмме позволяют выделить диапазон времен группового запаздывания (область интереса), в котором будет находится МНЧ согласно базовому алгоритму. Ограничение областью интереса позволяет находить МНЧ конкретной моды.

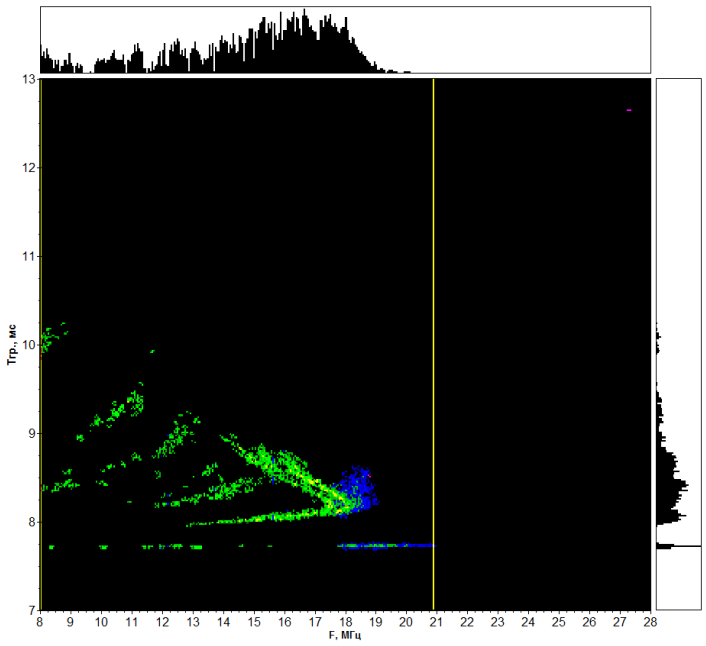

Рис. 5. Глобальная МНЧ при наличии протяженного трека слоя E

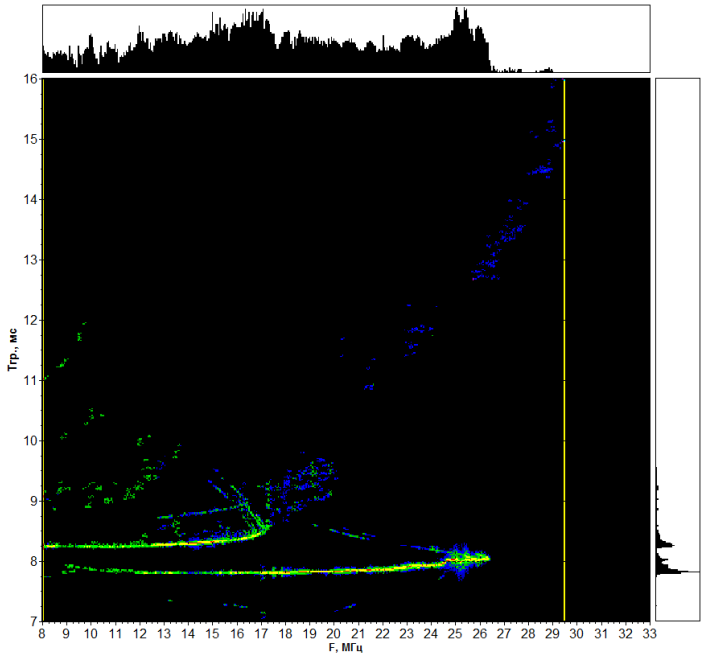

Рис. 6. Глобальная МНЧ при наличии аномального «хвоста» от $2F_2$ на ионограммах Кипр-Москва

Пример работы модифицированного алгоритма для той же ионограммы что на рисунке 6, показан на рисунке 7.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Оценка качества работы модифицированного алгоритма проводилась по той же методике, что и для алгоритма базового, т.е. путем сравнения временных рядов МНЧ (автоматически полученного и выделенного человеком-экспертом), с той лишь разницей что здесь речь шла об МНЧ F_2, а не МНЧ глобальной. На выборке около 200 ионограмм, из которых указанные случаи несовпадения глобальной МНЧ и МНЧ F_2 были представлены на примерно 25% ионограмм, получено следующее значения корреляции Пирсона: 0.995, что также подтверждает высокую точность модифицированного алгоритма. Проведенная с целью сравнения на той же выборке оценка для базового алгоритма дает значение корреляции Пирсона: 0.79, что ещё раз иллюстрирует худшую применимость немодифицированного алгоритма к ионограммам с несовпадением глобальной МНЧ и МНЧ F_2.

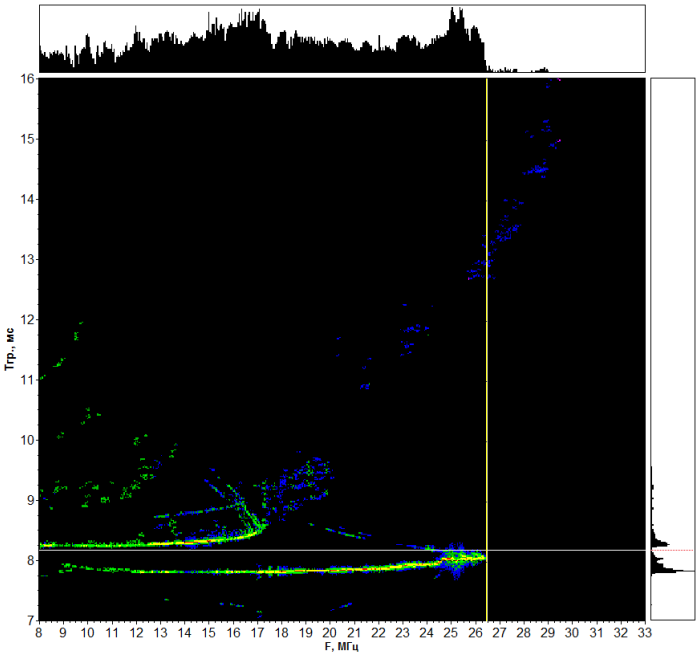

Рис. 7. Автоматическое нахождение МНЧ F_2 модифицированным алгоритмом для ионограммы с рисунка 6

Разумеется, модифицированный алгоритм может быть применен для автоматического вычисления МНЧ любых других мод, треки которых присутствуют на ионограмме. Рассмотрение результатов здесь приведено для МНЧ моды F_2 в качестве примера, тем более что видимо это наиболее востребованный случай для многих научных и практических задач.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен модифицированный алгоритм автоматического вычисления МНЧ конкретной моды по ионограмме наклонного зондирования ионосферы. Нет никаких препятствия для применения алгоритма и к ионограммам вертикального зондирования без какой-либо его доработки, благодаря общности задачи определения МНЧ по ионограмме НЗИ и задачи определения критической частоты по ионограмме ВЗИ – с точки зрения обработки данных как «картинки» или двумернорго массива, это задачи идентичные, хотя физический смысл МНЧ и критической частоты, безусловно, различен; алгоритм определения глобальной МНЧ по ионограмме НЗИ (называемый здесь базовым), может быть применен для определения критической частоты слоя F_2 по ионограмме ВЗИ, а модифицированный алгоритм нахождения МНЧ (представленный в данной статье) может быть применен для нахождения критической частоты и других ионосферных слоев (при условии селекции по высотам).

Заметим также что алгоритм применим к ионограммам НЗИ и ВЗИ, независимо от вида зондирующего сигнала (импульсный или ЛЧМ), при условии представления ионограммы в виде двумерной «картинки» (двумерного массива авмплитуд).

Задачей дальнейших исследований в части совершенствования алгоритма является автоматический подбор «гиперпараметров» (по аналогии с подбором гиперпараметров в подходах

машинного обучения), важнейший из которых – размер окрестности вокруг локального максимума гистограммы.

Задачей дальнейших исследований в части приложения полученного алгоритма является построение предиктивных моделей временных рядов МНЧ конкретных мод.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

ЛИТЕРАТУРА

- *De la Jara C., Olivares C.* Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // Radio Science, vol. 56, №8, 2021. P. 1-15.
- *Fabrizio G.* High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education, 2013.
- *Guo L., Xiong J.* Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science, vol. 58, №3, 2023. P. e2022RS007566. DOI: https://doi.org/10.1029/2022RS007566.
- *Li H., Zhang C., Yin B., Jia X., Xu J., Xue J., Ma M.* A Method for Separating the O/X Mode Signals in Vertical Ionograms Based on Improved U-Shaped Encoder-Decoder Network // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 61, 2023. P. 1-13.
- *Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W.* Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics, vol. 37, №5, 2022. P. 1834-1839. DOI: 10.6038/pg2022GG0073.
- *Thanakulketsarat T., Sopon T., Phakphisut W., Hozumi K., Wongtrairat W.* Ionograms scaling by using the convolutional neural network // 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2021. P. 245-248.
- *Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L.* Deep-learning for ionogram automatic scaling // Advances in Space Research, vol. 66, №4, 2020. P. 942-950. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009.
- *Агарышев А.И.* Метод расчета максимальных наблюдаемых частот при двухскачковом распространении декаметровых радиоволн // Радиотехника, №4, 1985. С. 67-70.
- *Агарышев А.И., Агарышев В.А., Куцый Н.Н.* Расчёт максимальных наблюдаемых частот и напряжённостей поля при распространении декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере // Вестник ИрГТУ, №1(41), 2010. С. 249-253.
- *Акимов В.Ф., Калинин Ю.К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов // под ред. С.Ф. Боева. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
- *Алебастров В.А., Гойхман Э.Ш., Заморин И.М., Колосов А.А., Корадо В.А., Кузьминский Ф.А., Кукис Б.С.* Основы загоризонтной радиолокации // Под ред. А.А. Колосова. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
- *Барабашов Б.Г., Анишин М.М., Лаврентьев О.А., Радио Л.П.* Оценка эффективности использования ионосферной модели IRI для оперативного прогноза МПЧ // Техника радиосвязи, №3, 2019. С. 15-21.
- *Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Валов В.А., Урядов В.П.* Прогнозирование максимально наблюдаемой частоты ионосферного КВ-радиоканала методом искусственных нейронных сетей // Геомагнетизм и аэрономия, том 46, №1, 2006. С. 88-98.
- *Бархатова О.М.* Отражение динамики параметров межпланетной среды в максимальных наблюдаемых частотах на различных трассах наклонного зондирования ионосферы // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, том 54, №3, 2011. С. 161-176.
- *Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Григорьев Г.И.* Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере по анализу максимальных наблюдаемых частот на трассах наклонного зондирования // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, том 52, №10, 2009. С. 761-778.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- *Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г.* Оценка погрешности прогнозирования максимально наблюдаемой частоты в условиях минимальной солнечной активности // Техника радиосвязи, №4(47), 2020. С. 32-44.
- *Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Родионов Т.С., Урядов В.П.* Наклонное зондирование и прогнозирование максимально наблюдаемой частоты на трассах различной протяженности и ориентации // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, №3(139), 2007. С. 22-27.
- *Егошин А.Б.* Автоматизированная система адаптивной обработки сигналов со сверхбольшой базой для радиозондирования ионосферных радиолиний: автореферат дис. ... канд. техн. наук / МарГТУ. Йошкар-Ола, 2003.
- *Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н.* Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки, том 150, №3, 2008. С. 36-45.
- *Ильин Н.В., Бубнова Т.В., Грозов В.П., Пензин М.С., Пономарчук С.Н.* Оперативный прогноз МПЧ радиотрасс по текущим данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом // Солнечно-земная физика, том 4, №3, 2018. С. 103-113.
- *Калинин Ю.К., Алпатов В.В., Репин А.Ю., Щелкалин А.В.* Вопросы вертикального и наклонного зондирования ионосферы // Гелиогеофизические исследования, вып. 20, 2018. С. 87-123.
- *Ким В.Ю.* Методика оценки критической частоты ионосферы на односкачковой трассе наклонного зондирования // Гелиогеофизические исследования, №40, 2023. С. 81-92. DOI: 10.5425/2304-7380_2023_40_81.
- *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. 304 с.
- *Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Михайлов С.Я.* Обработка и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования для диагностики ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда // Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева, №5(51), 2013. С. 163-166.
- *Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А.* Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре-декабре 2023 г. // Солнечно-земная физика, №4, 2024. С. 91-105. DOI: https://doi.org/10.12737/szf-104202410.
- Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами // Под ред. С.И. Авдюшина. Труды института прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова. М.: ИПГ, 2008.
- *Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В.* Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущённости в октябре 2016 года // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, том 64, №2, 2021. С. 83-94.
- *Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П.* Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 286 с.
- *Цыбуля К.Г.* Патент РФ № 2697433 C1. Способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам. Дата публикации: 14.08.2019.
- *Щирый А.О.* Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники, №10, 2022. DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4.
- *Щирый А.О.* Две методики измерения помех декаметрового диапазона // Научное приборостроение, том 33, №4, 2023. С. 72-83.
- *Щирый А.О.* Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: автореферат дис. канд. техн. наук / Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007.

IMPROVED ALGORITHM FOR AUTOMATIC CALCULATION OF THE MAXIMUM OBSERVED FREQUENCY BY THE IONOGRAM OF OBLIQUE SOUNDING OF THE IONOSPHERE

Schiriy A. O.

A modification of the algorithm for automatically calculating the maximum observed frequency based on the ionogram of oblique ionospheric sounding is given. The basic algorithm is based on the criterion for detecting sharply different sample values, and the criterion is applied “the other way around”, i.e. sharply different samples of the sample (in this case, the amplitude spectrum of the ionosonde signal) are considered a useful signal. Next, for an ionogram with a selected useful signal, interpreted as a two-dimensional data array, the boundaries of the regions occupied by the signal are highlighted, thus calculating the lowest and maximum observed frequencies. The basic algorithm works well in determining the global maximum observed frequency, however, modification is required to determine the maximum observed frequency of a specified particular mode. Line-by-line summation of the amplitudes of the ionogram points and "slicing" into regions according to the resulting total histogram make it possible to identify the range of group delay times (area of interest), in which the maximum observed frequency is further located according to the basic algorithm. Estimates of the quality of the basic and modified algorithms are given, obtained by comparing them with the "manual" processing of ionograms by a human-expert.

KEYWORDS: SHORT RADIO WAVES PROPAGATION, IONOSPHERE, IONOSPHERIC OBLIQUE SOUNDING, IONOGRAM, MAXIMUM OBSERVED FREQUENCY, SIGNAL DETECTION.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 23 – 31, 2026

Поступила в редакцию 09.09.2025 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.388.2

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ ВЫСОТЫ СЛОЯ E

А. Д. Данилов[1], А. В. Константинова[1], Н. А. Бербенева[2]

[1]*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия*
[2]*Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Выполнен анализ долговременных изменений (трендов) высоты ионосферного слоя *E*, *h'E*, на основании наблюдений на ст. Juliusruh до 2024 г. Анализируются два зимних месяца и околополуденные часы 10:00-14:00 LT. Для исключения эффектов солнечной активности используются три индекса СА – *F*30, *MgII* и *Ly*-α. Получено что невозможно надежно определить тренд *h'E* для всего рассматриваемого интервала лет. Выделяются два периода: до 2005 г. и после 2014 г., когда тренд *h'E* хорошо выражен (статистически значим) и отрицателен. Получено хорошее согласие величин тренда при использовании всех трех индексов СА. Не обнаружено выраженной зависимости тренда от местного времени. Получены средние величины тренда: −0.4 км в год для периода до 2005 г. и -0.6 км в год для периода после 2014 г. Проведено сравнение полученных трендов *h'E* с трендами критической частоты слоя *E*, полученными ранее.

Ключевые слова: ионосфера, слой E, критическая частота, тренды.

EDN: VKYSDA

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема определения трендов параметров ионосферных слоев хорошо известна и активно обсуждается в научной литературе. В последние годы она привлекает особенно большое внимание. Сошлемся на обзорные работы Lastovicka [2023], Cnossen et al. [2024] и Elias et al [2024]. Наиболее часто исследуются указанные тренды в области *F*. Анализируются изменения со временем различных параметров: критической частоты слоя *F*2, *foF*2, его высоты *hmF*2, его приведенной толщины TS и полного содержания электронов TEC (см. Данилов и Константинова [2024] и Elias et al [2024]).

Наибольшее внимание уделяется анализу изменений со временем величин *foF*2 и *hmF*2 по данным вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы. Результаты такого анализа для ряда станций Северного и Южного полушарий можно найти в работах авторов [Данилов и др. 2024а, б].

Гораздо меньше внимания уделяется долговременным трендам параметров слоя *E*. Это связано, прежде всего, с гораздо меньшей надежностью измерения методом вертикального зондирования параметров (критической частоты *foE* и высоты *h'E*) слоя *E*, чем соответствующих параметров слоя *F*2. В недавних работах авторов [Данилов и др. 2025а, б; 2026; Danilov et al. 2025] была предпринята попытка определения трендов *foE* по данным ВЗ на трех станциях: Moscow, Sverdlovsk и Juliusruh.

В данной работе делается попытка найти тренды высоты *h'E* по наблюдениям на ст. Juliusruh и сравнить их с полученными ранее трендами *foE*.

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/vkysda

Для выделения долговременных трендов *h'E* мы используем тот же метод, что мы использовали многократно для анализа трендов *foF*2, *hmF*2 и TEC [Данилов и др. 2024а, б; Данилов и др. 2025а]. Для каждой ситуации (момент LT, месяц, индекс СА) вычисляется зависимость месячных медиан *h'E* от данного индекса для эталонного периода. Изменение со временем разности Δ*h'E* между наблюдаемым *h'E*(наб) и модельным *h'E*(мод) значением высоты и дает искомый тренд, который по аналогии с работами по трендам слоя *F*2 и критической частоты слоя *E* мы будем обозначать *k*(*h'E*).

Во многих работах по поиску ионосферных трендов в наших публикациях мы анализировали только околополуденные часы (10:00-14:00 LT), поскольку известно, что эти тренды хорошо выражены днем, но часто отсутствуют ночью. При поисках трендов *h'E* мы анализируем те же моменты LT. Напомним, что методом ВЗ слой *E* наблюдается только в условиях освещения Солнцем. Анализируются два зимних месяца январь и февраль, поскольку по нашим данным тренды ионосферных параметров лучше всего проявляются именно зимой, но слабы, или отсутствуют, летом.

По современным представлениям лучшими для описания поведения параметров ионосферы являются индексы солнечной активности (СА) *F*30, *MgII* и *Ly*-α. Более подробное обсуждение этой проблемы можно найти в работах Данилова и Бербеневой [2023, 2024] и Данилова и др. [2025в]. Как и в работах по трендам *foE*, мы в данной работе для нахождения трендов *h'E* использовали эти три индекса. Сравнение результатов, полученных для каждого индекса, позволяет определить их надежность (статистическую значимость). Как обычно, чтобы характеризовать статистическую значимость каждой зависимости, мы используем индекс определенности R^2 по F-тесту Фишера.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Как всегда в нашем методе, основным анализируемым параметром является величина разности Δ*h'E* между реально наблюдаемой и модельной (по зависимости от СА в эталонный период 1957–1980 гг.) величинами *h'E*. Изменение со временем величины Δ*h'E* (сглаженной с окном в 11 лет) и дает искомый тренд *k*(*h'E*).

Примеры изменения Δ*h'E* с годами для января и февраля приведены на рисунках 1 и 2, соответственно.

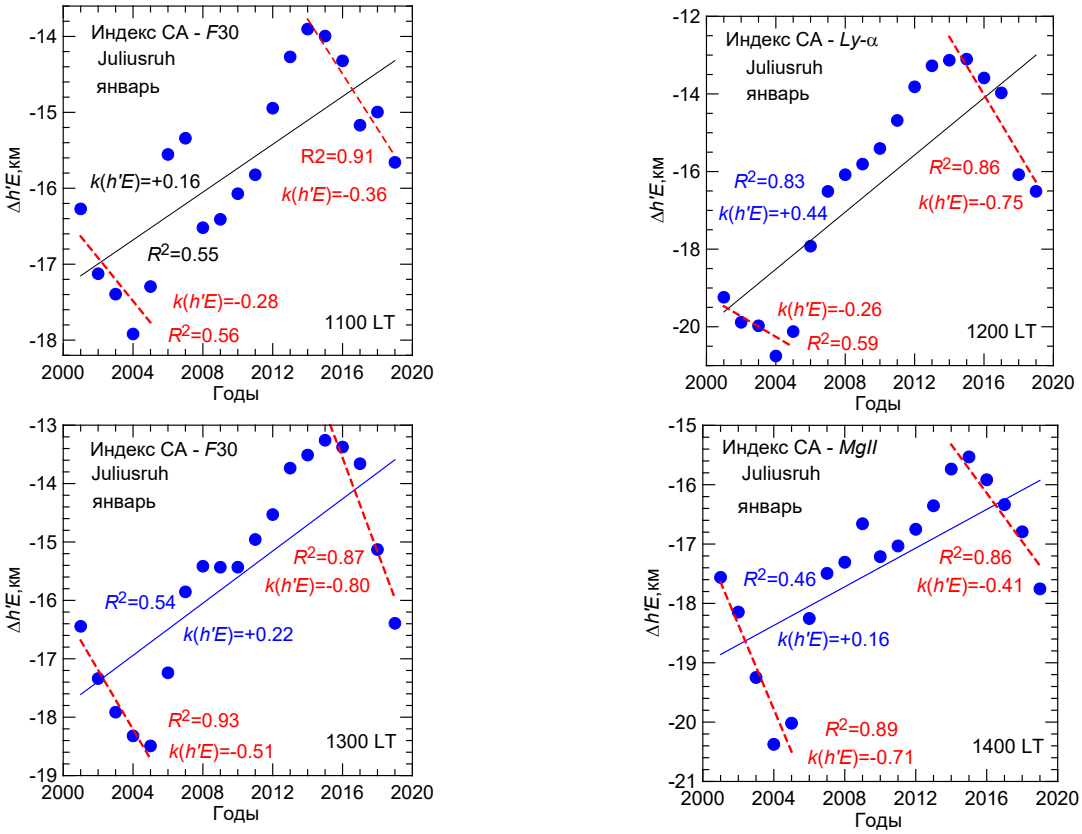

Рис. 1. Изменение Δ*h'E* с годами для января.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

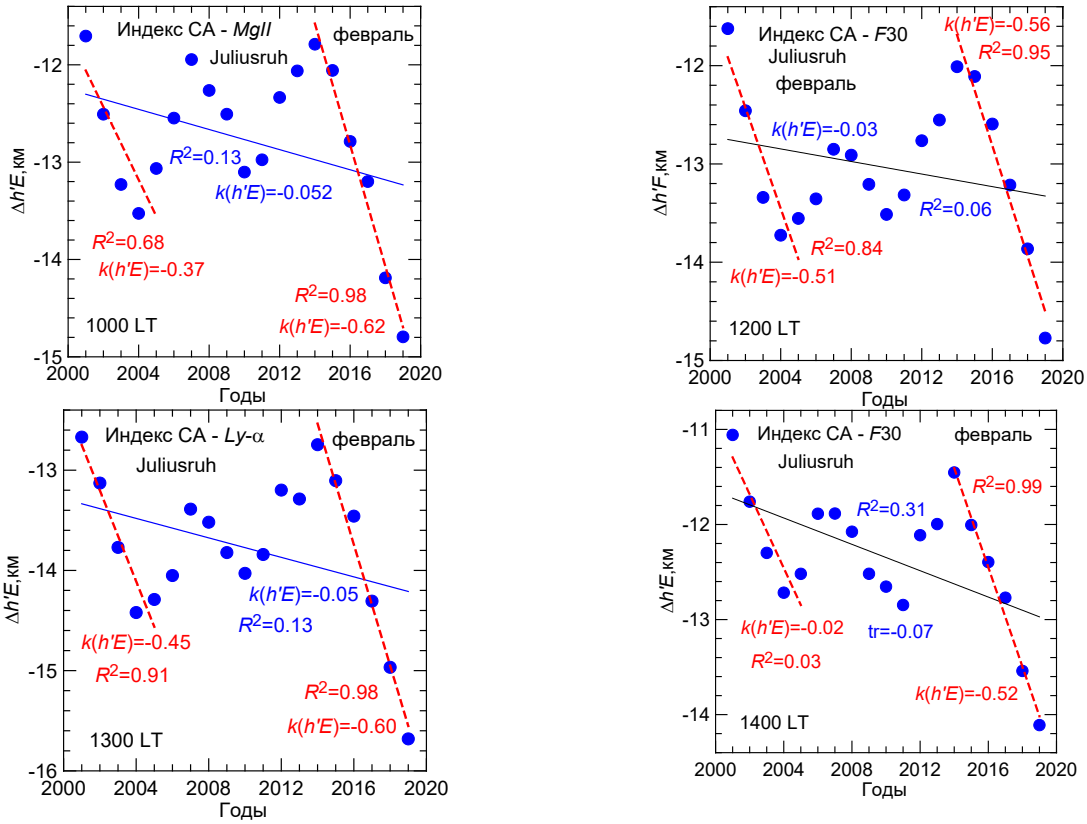

Рис. 2. Изменение $\Delta h'E$ с годами для февраля.

Как видно на рисунках 1 и 2, картина изменения $\Delta h'E$ с годами достаточно сложна и для всего рассматриваемого интервала лет достаточно хаотична. Для всех лет это изменение имеет даже разные знаки для разных месяцев – оно положительно в январе и отрицательно в феврале. При этом соответствующие тренды $h'E$ имеют очень небольшую статистическую значимость (небольшие величины R^2).

При том, что картина зависимости $\Delta h'E$ от лет при анализе всего временного интервала выражена плохо, для всех моментов LT видны две особенности – хорошо выраженное уменьшение $\Delta h'E$ с годами до 2005 г. и после 2014 г. Мы вернемся к обсуждению этих особенностей ниже. Пока отметим лишь, что полученная картина также очень близка при использовании разных индексов СА. Для подтверждения этого мы приводим в таблице 1 изменение получаемых трендов $h'E$ (т. е. величин наклона линейной аппроксимации изменения $\Delta h'E$ с годами) для двух указанных периодов: до 2005 г. и после 2014 г.

Таблица 1. Величины тренда $h'E$ в км/год для февраля

до 2005 г.					
LT	*MgII*	*F*30	*Ly*-α	Сред.	SD
10:00	−0.37	−0.36	−0.3	−0.34	0.04
11:00	−0.37	−0.34	−0.28	−0.33	0.05
12:00	−0.48	−0.51	−0.49	−0.49	0.02
13:00	−0.51	−0.6	−0.45	−0.52	0.08
14:00	−0.36	−0.39	−0.31	−0.35	0.04
после 2014 г.					
10:00	−0.62	−0.62	−0.61	−0.62	0.01
11:00	−0.65	−0.66	−0.67	−0.66	0.01
12:00	−0.57	−0.56	−0.56	−0.56	0.01
13:00	−0.64	−0.64	−0.6	−0.63	0.02
14:00	−0.53	−0.52	−0.51	−0.52	0.01

Как видно из этой таблицы, величины среднеквадратической ошибки SD при усреднении величин $k(h'E)$, получаемых с использованием каждого из трех индексов СА, очень малы, что говорит о хорошем согласии результатов. С учетом этого факта мы приводим в таблице 2 величины $k(h'E)$ для двух месяцев, полученные усреднением по всем индексам СА.

Таблица 2. Величины тренда $h'E$ в км/год для зимних месяцев

	январь		февраль	
LT	$k(h'E)$	SD	$k(h'E)$	SD
до 2005 г.				
10:00	−0.25	0.04	−0.34	0.04
11:00	−0.25	0.03	−0.33	0.05
12:00	−0.25	0.10	−0.49	0.02
13:00	−0.39	0.13	−0.52	0.08
14:00	−0.62	0.08	−0.35	0.04
после 2014 г.				
10:00	−0.58	0.17	−0.62	0.01
11:00	−0.52	0.14	−0.66	0.01
12:00	−0.63	0.45	−0.56	0.01
13:00	−0.85	0.13	−0.63	0.02
14:00	−0.46	0.09	−0.52	0.01

Как следует из таблицы 2, средние величины тренда для разных моментов LT внутри каждого интервала лет несколько различаются. Однако, мы не нашли никакой системы в этих различиях и считаем, что оно связано просто с разбросом исходных данных из-за трудностей измерения параметров слоя E, о которых говорилось выше. Если формально усреднить величины $k(h'E)$ по всем моментам LT, мы получим следующие результаты: −0.36 км в год (SD = 0.16 км в год) в январе и −0.41 км в год (SD = 0.09 км в год) в феврале для периода до 2005 г., а также −0.61 км в год (SD = 0.15 км в год) в январе и −0.60 км в год (SD = 0.06 км в год) в феврале для периода после 2014 г.

Видно, что усредненные по всем моментам LT величины тренда $h'E$ в обоих временных интервалах достаточно близки для обоих месяцев, а величины SD при усреднении по пяти моментам LT невелики. Все это повышает надежность полученных результатов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты предыдущего параграфа показывают, что картина изменения $k(h'E)$ с годами сложна. При рассмотрении всего анализируемого интервала лет не удается получить статистически значимых трендов $h'E$.

Однако хорошо видны два интервала лет (до 2005 г. и после 2014 г.), когда изменение $\Delta h'E$ хорошо выражено и позволяет получить тренды $h'E$, $k(h'E)$, с высокой статистической значимостью. В обоих случаях величины $k(h'E)$ получаются отрицательными и относительно слабо меняющиеся с местным временем (см. выше таблицу 2).

Подчеркнем, что очень важен тот факт, что эти результаты получены при отдельном использовании для устранения эффектов солнечной активности каждого из трех рассматриваемых индексов СА ($F30$, MgII и Ly–α), причем результаты хорошо согласуются между собой (см. пример в таблице 1). Это, на наш взгляд, значительно повышает надежность полученных результатов. Также важно и согласие результатов для обоих рассмотренных месяцев.

Необходимо отметить, что первая величина $\Delta h'E$ на рисунках (2000 г.) отрицательна и составляет 11-12 км. Это означает, что со времени «эталонного периода», когда, как мы считаем, антропогенных изменений в ионосфере не было, происходило уменьшение высоты слоя E, которое и привело к таким значениям D$h'E$ в начале анализируемого периода.

Таким образом, получается, что до 2005 г. высота слоя E систематически понижается с годами примерно со скоростью 0.4 км в год. Затем следует период, когда величина D$h'E$ почти не меняется, или даже несколько увеличивается. И лишь после 2014 г. снова начинается систематическое

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

уменьшение $\Delta h'E$ (т. е. понижение слоя E), которое дает отрицательный тренд $h'E$, равный примерно 0.6 км в год.

Анализ изменения высоты слоя E был выполнен в работах Bremer [2001; 2008] и было получено, что слой понижается со скоростью около 0.03 км в год. Это меньше, чем получено нами даже для периода до 2005 г. Однако, следует иметь в виду, что Bremer [2001; 2008] анализировал данные для периода 1957–2005 гг., когда тренды были малы или даже их еще не было совсем, поэтому в среднем он получил меньшие тренды.

Мы не можем ответить на вопрос о том, почему у нас наблюдается именно такая картина долговременных изменений высоты слоя E. Для ответа на этот вопрос нужно использовать сложные современные модели термосферно-ионосферного взаимодействия, которых в нашем распоряжении нет. Наша цель состоит в том, чтобы, используя метод, который мы неоднократно использовали ранее для анализа трендов ионосферных параметров, выявить и четко сформулировать указанные особенности этих изменений, надеясь, что специалисты по моделированию найдут им объяснение.

Представляет интерес вопрос о том, как связаны между собой тренды обоих параметров (критической частоты и высоты) слоя E. Анализ трендов высоты $h'E$ описан в предыдущем параграфе. Тренды критической частоты foE были подробно проанализированы в работах [Данилов и др. 2026; Danilov et al. 2025].

Чтобы сравнить изменения обоих параметров, свободные от влияния солнечной активности, следует сравнивать изменение двух величин $\Delta h'E$ и ΔfoE, в которых исключен эффект СА. Сравнивать изменение со временем непосредственно величин foE и $h'E$ бессмысленно, поскольку каждый из этих параметров изменяется с солнечной активностью достаточно сложным образом и амплитуда этого изменения гораздо больше, чем величина его тренда, а величины $\Delta h'E$ и ΔfoE как раз «очищены» от этого влияния. При этом очень важно сравнивать эти величины, полученные с помощью одного и того же индекса СА.

Поскольку в предыдущем параграфе мы обнаружили, что изменение $\Delta h'E$ с годами плохи выражено для всего рассматриваемого интервала лет, но очень хорошо (с высокой статистической значимостью получаемых зависимостей) выражена для периодов до 2005 г. и после 2014 г., мы будем анализировать связь между изменениями $\Delta h'E$ и ΔfoE именно в этих интервалах лет.

Примеры сравнения изменения $\Delta h'E$ и ΔfoE с годами для обоих месяцев приведен на рисунке 3.

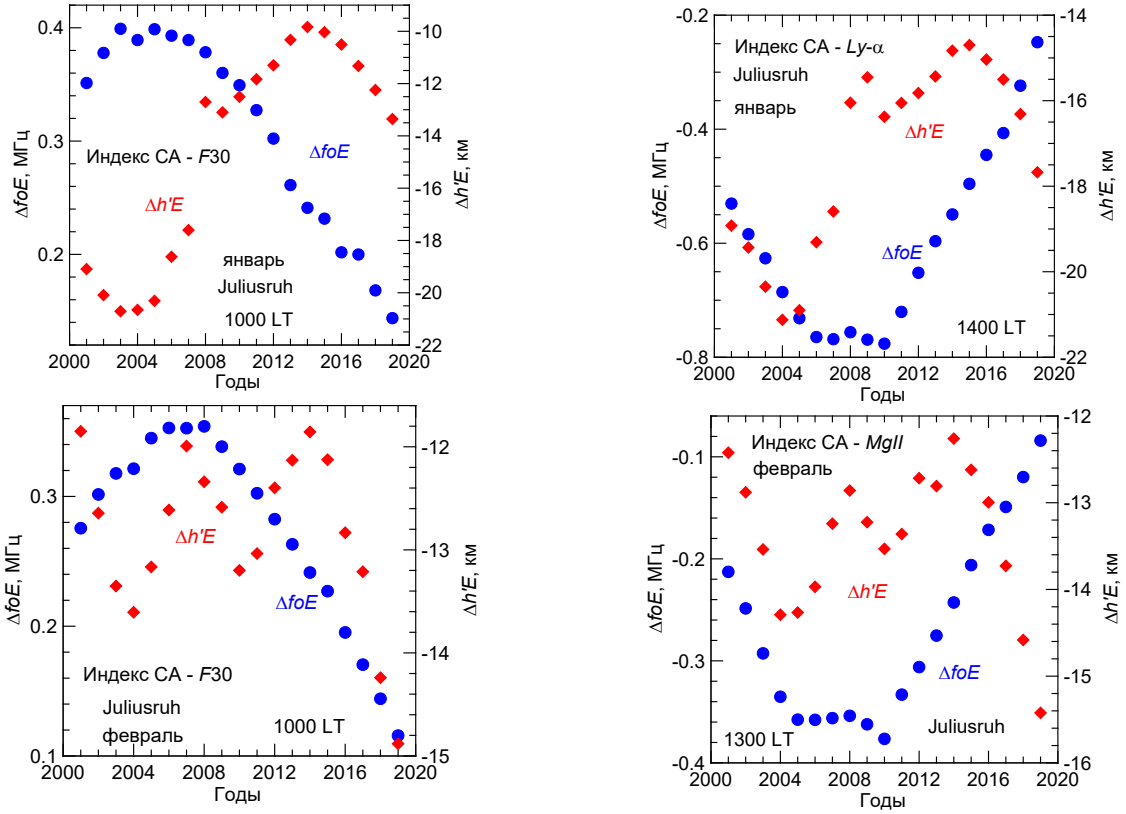

Рис. 3. Примеры изменения с годами $\Delta h'E$ и ΔfoE

Рисунок 3 показывает, что для всего анализируемого интервала лет не видно сколь-нибудь выраженной связи между $\Delta h'E$ и ΔfoE. Однако такая связь видна для интервалов до 2005 г. и после 2014 г., причем характер этой связи различен в дополуденные и послеполуденные часы LT.

В качестве характеристики, показывающей степень близости изменений $\Delta h'E$ и ΔfoE в каждом интервале, мы используем коэффициент корреляции R. Так же, как и раньше, мы проводим все расчеты и сравнения для трех индексов СА: $F30$, MgII и Ly-α.

Мы получили, что результаты указанного сравнения при использовании всех индексов очень близки. Для иллюстрации этого утверждения мы приводим таблицу 3, где даны величины R при использовании каждого индекса, результат усреднения по всем трем индексам и среднеквадратическое отклонение при таком усреднении.

Таблица 3. Величины R при использовании разных индексов СА

LT	MgII	$F30$	Ly-α	Средн.	SD
до 2005 г.					
10:00	−0.81	−0.82	−0.73	−0.79	0.05
11:00	−0.61	−0.20	−0.41	−0.41	0.21
12:00	0.96	+0.95	+0.97	+0.96	0.01
13:00	0.99	+0.99	+0.98	+0.99	0.01
14:00	0.93	+0.94	+0.88	+0.92	0.03
после 2014 г.					
10:00	+0.99	+0.99	+0.99	+0.99	0.00
11:00	+0.92	+0.94	+0.91	+0.92	0.02
12:00	−0.98	−0.98	−0.98	−0.98	0.00
13:00	−0.97	−0.97	−0.98	−0.97	0.01
14:00	−0.99	−0.99	−0.99	−0.99	0.00

Как видно в этой таблице, величины коэффициента рекомбинации R, получаемые при использовании разных индексов СА, очень близким между собой, или даже равны друг другу, о чем свидетельствуют очень маленькие величины среднеквадратичного отклонения SD, получаемого при усреднении по трем индексам. Особенно обращают на себя близкие к нулю, или нулевые, величины SD для периода после 2014 г. Мы предаем этому большое значение, поскольку, как уже говорилось выше, согласие величин, получаемых при использовании разных индексов СА, мы рассматриваем, как подтверждение правильности получаемых результатов.

В таблице 4 мы сравниваем усредненные по всем индексам СА величины коэффициента рекомбинации R для двух месяцев.

Таблица 4. Величины R для января и февраля

LT	январь	февраль	январь	февраль
	до 2005 г.		после 2014 г.	
10:00	−0.85	−0.79	+0.94	+0.99
11:00	−0.73	−0.41	+0.54	+0.92
12:00	+0.78	+0.96	−0.76	−0.98
13:00	+0.87	+0.99	−0.90	−0.97
14:00	+0.94	+0.92	−0.96	−0.99

Как следует из таблицы 4, связь изменения $\Delta h'E$ и ΔfoE с годами выглядит следующим образом. До 2005 г. до полудня эта связь отрицательна – тренды foE и $h'E$ имеют разные знаки. После полудня связь положительна – тренды и критической частоты, и высоты имеют одинаковый знак (оба параметра уменьшаются с годами). После 2014 г. наблюдается прямо противоположная картина – связь положительна до полудня и отрицательно после полудня.

Таким образом, в годы до 2005 г. в дополуденные часы высота слоя E уменьшается, а критическая частота растет. В эти годы в послеполуденные часы оба параметра слоя E синхронно

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

уменьшаются. В годы после 2014 г. до полудня и высота и критическая частота уменьшаются, а после полудня падение высоты происходит в противофазе с ростом *foE*.

Как мы уже отмечали, для выявления механизмов обнаруженной связи между трендами *foE* и *h'E* необходим анализ с помощью современных моделей. Выскажем лишь некоторые общие соображения.

Электронная концентрация *Ne* в области *E* прямо пропорциональна скорости ионизации нейтральных частиц коротковолновым излучением Солнца *q* и обратно пропорциональна эффективному коэффициенту рекомбинации α(эфф). Поэтому уменьшение критической частоты (а, следовательно, *Ne*) области *E* при уменьшении высоты *h'E* может происходить по двум причинам.

Во-первых, уменьшение высоты означает опускание слоя в область с более низкой температурой термосферного газа. Коэффициент рекомбинации определяется коэффициентами диссоциативной рекомбинации α(дисс) основных ионов NO^+ и O_2^+, причем эти коэффициенты обратно пропорциональны температуре. Когда температура ниже, скорость рекомбинации выше, а, следовательно, при той же величине *q* меньше равновесная электронная концентрация.

Во-вторых, опускание слоя *E* означает, что становится более толстым слой термосферного газа над ним, а это неизбежно означает усиление поглощения излучения, которое ответственно за образование слоя *E*, а, следовательно, уменьшение *q*.

В результате при опускании слоя в область более низкой температуры а(дисс) должен увеличиваться, а, следовательно, должна уменьшаться величина *Ne*. Опускание слоя, скорее всего, происходит за счет охлаждения и оседания термосферы, которое происходит в результате антропогенных процессов. Таким образом, в дополуденные часы после 2014 г. и послеполуденные часы до 2005 г., наблюдаемые изменения *foE* и *h'E* можно рассматривать как следствие этого охлаждения и оседания атмосферы.

Объяснить ситуацию в послеполуденные часы после 2014 г. и дополуденные часы до 2005 г. гораздо труднее. В обоих случаях происходит уменьшение *h'E* с годами, что согласуется с картиной охлаждения и оседания термосферы, но остается непонятным происходящий при этом рост *foE*. Можно утверждать только, что этот эффект не может быть связан с вариациями ионизующего излучения. Последнее определяется зенитным углом Солнца, который одинаков для 10:00 и 14:00 LT, а мы видим для этих моментов местного времени совершенно разную картину поведения *foE*.

Обсуждая результаты определения трендов критической частоты *foE* [Данилов и др. 2026], мы уже высказывали ранее предположение, что тренды критической частоты слоя *E* могут быть связаны с переносом в средние широты молекул окиси азота, которая играет большую роль в формировании слоя, из авроральной зоны, где они образуются в процессе корпускулярной ионизации. Суточные вариации меридионального ветра на высотах области *E* известны плохо. Если есть асимметрия в интенсивности этого переноса между дополуденными и послеполуденными часами, это может объяснить полученную разницу в поведении *foE* до и после полудня.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали в данной работе долговременные изменения (тренды) высоты слоя *E*, используя наблюдения методом ВЗ на ст. Juliusruh за 1958–1980 и 1996–2024 гг. Использовался метод определения трендов, применявшийся нами многократно для нахождения трендов параметров ионосферных слоев. Анализировались околополуденные часы (10:00-14:00), когда слой *E* наблюдается наиболее уверенно, двух зимних месяцев.

Основной результат выполненного анализа состоит в том, что не удается надежно определить тренды *h'E*, *k*(h'E) для всего рассмотренного интервала лет, однако хорошо выражены тренды в периоды до 2005 г. и после 2014 г.

При этом оказалось, что в эти периоды тренды *h'E* определяются надежно (достаточно высокие величины R^2) и величины *k*(*h'E*) отрицательны. Мы считаем существенным, что результаты, получаемые при использовании каждого из трех индексов СА (*F*30, *Mg*II и *Ly*-α) хорошо согласуются между собой. Также согласуются и результаты для двух месяцев. Не обнаружено заметных систематических вариаций получаемых величин *k*(*h'E*) с местным временем.

При формальном усреднении величины *k*(*h'E*) по всем моментам LT, получаются следующие результаты: -0.36 км в год (SD = 0.16 км в год) в январе и −0.41 км в год (SD = 0.09 км в год) в феврале для периода до 2005 г., а также −0.61 км в год (SD = 0.15 км в год) в январе и −0.60 км в год (SD = 0.06 км в год) в феврале для периода после 2014 г.

Следует иметь в виду, что поскольку мы используем сглаживание величин $\Delta h'E$ с 11-летним окном, точка 2019 г. на рисунках 1 и 2 «впитала» соответствующие величины до 2024 г. Иначе говоря, полученные результаты показывают, что в последнее десятилетие происходит систематическое уменьшение высоты *h'E*, т. е. систематическое опускание слоя *E*.

Подчеркнем важное обстоятельство. В этой работе мы не ставили целью объяснение трендов высоты слоя *E*. Для этого, по нашему мнению, нужны сложные современные модели, которых в нашем распоряжении нет. Используя результаты измерений высоты слоя *h'E* и метод определения трендов, который мы многократно проверяли на параметрах слоя *F*2, мы нарисовали картину изменения указанных трендов в рассматриваемый период лет, которую мы считаем достаточно надежной.

Мы сравнили долговременные изменения высоты и критической частоты (проанализированной нами в других публикациях) слоя *E* и обнаружили, что в годы до 2005 г. в дополуденные часы высота слоя *E* уменьшается, а критическая частота растет. В эти годы в послеполуденные часы оба параметра слоя *E* синхронно уменьшаются. В годы после 2014 г. до полудня и высота и критическая частота уменьшаются, а после полудня падение высоты происходит в противофазе с ростом *foE*.

Мы высказали лишь некоторые соображения о возможных физических механизмах, которые могут иметь отношение к полученной картине изменения трендов *h'E* и *foE*.

ЛИТЕРАТУРА

- *Данилов А.Д., Бербенева Н.А.* Статистический анализ зависимости критической частоты *foF*2 от различных индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия, том 63, №5, 2023. С. 619-629. https://doi.org/10.31857/S0016794023600588.
- *Данилов А.Д., Бербенева Н.А.* Зависимость *foF*2 от индексов солнечной активности по данным ионосферных станций Северного и Южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №2, 2024. С. 253-264. https://doi.org/10.31857/S0016794024020083.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Сравнение трендов различных параметров слоя *F*2 // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №5, 2024. С. 723-724. https://doi.org/10.31857/S0016794024050128.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Тренды критической частоты *foF*2 по данным станций Северного и Южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №3, 2024а. С. 386-399. https://doi.org/10.31857/S0016794024030059.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Долговременные тренды высоты максимума ионосферного слоя *F*2 // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №4, 2024б. С. 489-502. https://doi.org/10.31857/S0016794024040048.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Тренды критической частоты слоя *E* по данным ст. Москва // Гелиогеофизические исследования, вып. 52, 2026б. С. 46-55.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Индексы солнечной активности и слой *E* // Геомагнетизм и аэрономия, том 65, №6, 2025в. С. 866-878.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Григорьева С.А.* Эволюция трендов критической частоты слоя *E* по данным ст. Свердловск (Арти) // Гелиогеофизические исследования, вып. 48, 2025а. С. 32-43.
- *Данилов А. Д., Константинова А. В., Бербенева Н. А.* Тренды критической частоты слоя *E* по данным трех станций // Геомагнетизм и аэрономия, том 66, №1, 2026. С. 92-115.
- *Bremer J.* Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations // Adv. Space Res, vol. 28, №7, 2001. P. 997-1006. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)80029-6.
- *Bremer J.* Long-term trends in the ionospheric *E* and *F*1 regions // Ann. Geophys, vol. 26, №5, 2008. P. 1189-1197. https://doi.org/10.5194/angeo-26-1189-2008.
- *Danilov A. D., Berbeneva N.A., Konstantinova A.V.* Trends in the E-layer critical frequency based on Juliusruh station data // Adv. Space Res, 2025. DOI: 10.1016/j.asr.2025.08.058.
- *Cnossen I., Emmert J.T., Garcia R.R., Elias A.G., Mlynczak M.G., Zhang Sh.R.* A review of global long–term changes in the mesosphere, thermosphere and ionosphere: a starting point for inclusion in (semi–)empirical models // Adv. Space Res, vol. 74, №11, 2024. P. 5991-6011. https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.10.005.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

– *Elias A. Alberti T., Bravo M, et al.* Long-term trends in the ionospheric equivalent slab thickness: Some evidences by Working Team #1 within IAGA WGII-F // Paper presented at the 12th International Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 6-10 May 2024, Ourense, Galicia, Spain. 2024.
– *Laštovička J.* Progress in investigating long–term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere // Atmos. Chem. Phys, vol. 23, №10, 2023. P. 5783-5800. https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023.

LONG-TERM TRENDS IN THE HEIGHT OF THE *E* LAYER

Danilov A. D., Konstantinova A. V., Berbeneva N. A.

Analysis of long-term changes (trends) in the height of the ionospheric *E* layer is performed based on the observations at Juliusruh station to 2024. Two winter months and near-noon hours 10:00-14:00 are analyzed. Three SA proxies *F*30, *MgII* and *Ly*-α are used to eliminate solar activity (SA) effects. It is found that it is impossible to determine reliably trend in *h'E* for the entire considered interval of years. Two periods are seen: to 2005 and after 2014, when the trend in *h'E* is well pronounced (statistically significant) and negative. A good agreement of the trend values under using all three SA proxies is obtained. No pronounced dependence of the trend on local time is found. Average values of the trend are obtained: −0.4 km/year for the period to 2005 and -0.6 km/year for the period after 2014. A comparison of the obtained trends in *h'E* to the trends in the critical frequency of the *E* layer derived earlier is performed.

KEYWORDS: IONOSPHERE, LAYER E, CRITICAL FREQUENCY, LONG-TERM TRENDS.

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 32 –39, 2026

Поступила в редакцию 18.03.2026 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 550.38

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ С ПОМОЩЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНОГО K-ИНДЕКСА

А. Д. Кондратов[1,2], К. И. Холодков[1,2], В. А. Буров[1]

[1]Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия
[2]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Геомагнитные бури приводят к возникновению помех в системах коммуникаций и навигации, а также нарушают работу космической и наземной технической аппаратуры. Для своевременного реагирования на данные явления является целесообразным проведение краткосрочного и долгосрочного прогнозирование метрик, отражающих степень возмущенности геомагнитного поля – Dst-индекса, K-индекса и их производных. В данной работе рассматривается разработка моделей прогнозирования одной из таких метрик, планетарного K-индекса (K_p), с применением методов машинного обучения. Для данной задачи использовались ансамблевые алгоритмы машинного обучения – случайный лес и градиентный бустинг. Обучение и тестирование моделей было проведено на исторических показателях космической погоды, полученных со спутников ACE и DSCOVR. На основе результатов, представленных моделями, был проведен сравнительный анализ влияния используемых показателей космической погоды на точность выдаваемых прогнозов. Исходя из данного анализа, была разработана программа прогнозирования значений K_p в режиме реального времени.

Ключевые слова: космическая погода, планетарный K-индекс, геомагнитные бури, случайный лес, градиентный бустинг, машинное обучение.

EDN: HGLMHL

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитная активность способна оказывать существенное негативное воздействие как на человека, так и на комплексную техническую аппаратуру. Геомагнитные бури являются одним из ключевых факторов возникновения аномалий в работе спутников [Choi et al., 2011], вызывают помехи в высокочастотной связи, используемой при заполярных авиаперелетах [Fiori et al., 2022], а также осложняют функционирование наземного транспорта, использующего навигационные системы для выбора оптимальных маршрутов [Pilipenko et al., 2023].

Для отражения мощности геомагнитной активности используются измеряемые показатели, такие как индекс повременного магнитного возмущения (Dst), планетарный K-индекс (K_p) и их производные. Для своевременного реагирования на геомагнитную активность центрами наблюдения за космической погодой проводится краткосрочное и долгосрочное прогнозирование данных показателей. В контексте данной статьи рассматриваются особенности прогнозирования K_p.

Электронная почта авторов для переписки:

Холодков Кирилл Игоревич, e-mail:
k.kholodkov@space-weather.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/hglmhl

K_p является 3-х часовым показателем, вычисляемым на основе усредненных значений K-индексов, собранных с различных геомагнитных обсерваторий. K_p измеряется от 0 (крайне низкое возмущение) до 9 (крайне высокое возмущение), где значения от 5 и выше характеризуют наличие значимой геомагнитной активности [Bartels, 1949]. Для прогнозирования значений K_p широко используются модели, использующие алгоритмы машинного обучения. В частности, во многих научных исследованиях продемонстрировало эффективный результат использование рекуррентных нейронных сетей, таких как сети долгой краткосрочной памяти (LSTM) [Tan et al., 2018; Chakraborty & Morley, 2020]. Несмотря на это, все больший интерес также привлекает использование ансамблевых алгоритмов машинного обучения, например, для проведения прогнозов земной погоды (в тропосфере) [Risanti, 2024; Joyarieb et al., 2025].

Для прогнозирования значений K_p важную роль также играет выбор подходящего поставщика показателей космической погоды. Для данной задачи в основном используются показатели солнечного ветра и магнитного поля, поставляемые со спутников Advanced Composition Explorer (ACE) и Deep Space Climate Observatory (DSCOVR). Несмотря на частое использование показателей от данных поставщиков, мало исследований рассматривают разницу в точности получаемых прогнозов при использовании данных от того или иного поставщика.

В соответствии с этим, в данной статье будет рассмотрена реализация моделей прогнозирования на основе ансамблевых алгоритмов машинного обучения – случайного леса и градиентного бустинга. Помимо этого, будет проведена сравнительная оценка того, как использование аналогичных показателей космической погоды от разных поставщиков влияет на точность выдаваемых прогнозов. На основе полученных результатов будет представлена реализация программного обеспечения, способного прогнозировать значения K_p в режиме реального времени.

2. ВЫБОР И ПОДГОТОВКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Для обучения и тестирования моделей машинного обучения в качестве входного набора данных была выбрана следующая группа показателей, связанных с солнечным ветром и магнитным полем Земли: скорость потока протонов, плотность потока протонов, температура потока протонов, z-компонента магнитного поля, x-компонента магнитного поля и y-компонента магнитного поля. Выбор данных показателей обусловлен тем, что их значения значительно коррелируют со значениями K_p.

Первый набор данных был собран с онлайн архива Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), содержащего данные спутника DSCOVR. Второй набор аналогичных показателей был взят из онлайн архива Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA), содержащего данные спутника ACE. В качестве выходного параметра моделей были взяты исторические значения K_p из онлайн архива Потсдамского центр имени Гельмгольца.

Все обозначенные показатели были взяты за период с 1 августа 2016 года по 30 июня 2024 года, затрагивающий 24-й и 25-й циклы солнечной активности. Данный временной диапазон обусловлен тем, что спутник DSCOVR начал поставлять данные на постоянной основе только начиная с 2016 года. Кроме того, данный период содержит значительное количество зарегистрированной мощной геомагнитной активности, что создает достаточную основу для возможности эффективного прогнозирования сильных геомагнитных бурь.

Поскольку показателям космической погоды свойственны временные зависимости, то для лучшего отображения постепенных изменений в показаниях K_p отдельно добавлено значение K_p за прошлый 3-часовой промежуток в наборы входных параметров. Также для предоставления моделям более обширной информации о среде в набор входных параметров был внедрена дополнительная группа показателей, измеренных на основе обозначенных показателей солнечного ветра и магнитного поля Земли:

- Полный вектор магнитного поля Земли, вычисляемый по формуле:

$$b = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}. \quad (1)$$

- Обрез южного негативного z-вектора магнитного поля Земли;
- Скорость южного z-вектора магнитного поля Земли, вычисляемая по формуле:

$$speed_{bz} = b_z * proton_speed. \quad (2)$$

– Давление протонов, вычисляемое по формуле:

$$pressure = proton_density * proton_speed^2. \quad (3)$$

– Производная z-вектора магнитного поля Земли.

Поскольку K_p измеряется каждые 3 часа, входные наборы данных были усреднены в трехчасовых интервалах. Кроме того, для заполнения пропусков в данных в диапазоне до 10 минут была применена линейная интерполяция. Наборы данных были разделены на две группы для обучения и тестирования: данные для обучения был взят за период с 1 августа 2016 года по 1 декабря 2019 года, тогда как данные для тестирования были взяты за период с 1 декабря 2019 года по 30 июня 2024 года.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Для выполнения прогнозов значений K_p были реализованы две модели машинного обучения с использованием ансамблевых алгоритмов машинного обучения. В основу первой модели был заложен алгоритм случайного леса, тогда как для второй модели был выбран алгоритм градиентного бустинга.

Выбор ансамблевых алгоритмов обусловлен их высокой эффективностью при моделировании сложных нелинейных зависимостей в данных. Процессы, определяющие космическую погоду и геомагнитные возмущения, характеризуются значительной изменчивостью, наличием шума, а также сложными нелинейными взаимосвязями между параметрами солнечного ветра и откликом геомагнитного поля.

Разработка моделей проводилась на основе языка программирования Python с применением библиотек sklearn и lightgbm. В основе алгоритма случайного леса был заложен класс RandomForestRegressor из библиотеки sklearn, в котором для нас интерес представляли следующие 3 гиперпараметра:

– n_estimators – количество деревьев в лесу;
– criterion – метод оценки качества разбиения при построении деревьев решений в модели случайного леса;
– min_samples_leaf – минимальное количество измерений, которое должно находиться в листе дерева.

Мы провели несколько вариантов прогнозирования при различных значениях данных гиперпараметров для нахождения наиболее оптимального способа настройки модели случайного леса. Для характеристики точности прогнозов модели использовались следующие оценочные метрики: коэффициент детерминации (R^2), средняя абсолютная ошибка (MAE) и корень средней квадратичной ошибки (RMSE). Набор графиков демонстрирует различия в значениях метрики RMSE при различных значениях гиперпараметров модели случайного леса (рис. 1).

Для модели, работающей с первым набором данных от спутника DSCOVR, наилучший результат (RMSE=0.687, MAE=0.522, R^2=0.693) продемонстрировало использование следующих значений гиперпараметров: количества деревьев n_estimators = 200, минимального числа объектов min_samples_leaf = 15, критерия разбиения criterion = squared_error (среднеквадратичная ошибка).

В свою очередь для модели, работающей со вторым набором данных от спутника ACE, наилучший результат (RMSE=0.688, MAE=0.524, R^2=0.692) продемонстрировало использование следующих значений гиперпараметров: n_estimators = 600, min_samples_leaf = 10, criterion = squared_error (среднеквадратичная ошибка).

Аналогичные измерения были проведены и для модели, использующей алгоритм градиентного бустинга. Для реализации данной модели использовался класс LGBMRegressor из библиотеки lightgbm. В модели для нас наибольший интерес представляли следующие гиперпараметры:

– num_leaves – количество листьев в дереве;
– num_iterations – количество итераций градиентного бустинга.

Для характеристики точности прогнозов модели использовались аналогичные оценочные метрики: R^2, MAE и RMSE. Ниже представлена визуализация различий в значениях метрики RMSE при разных значениях гиперпараметров модели градиентного бустинга (рис. 2).

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

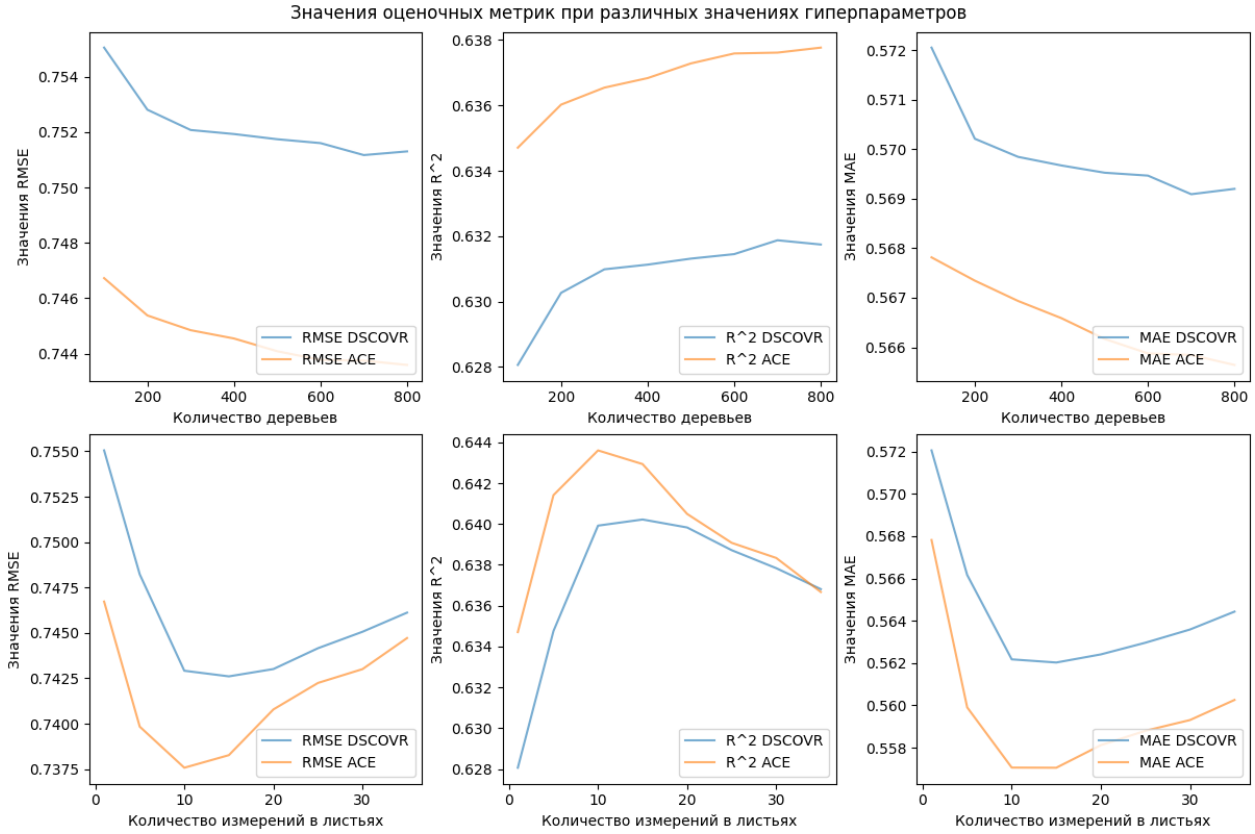

Рис. 1. Показания оценочной метрики RMSE для прогнозов модели случайного леса при различных значениях гиперпараметров n_estimators (верхний ряд) и min_samples_leaf (нижний ряд)

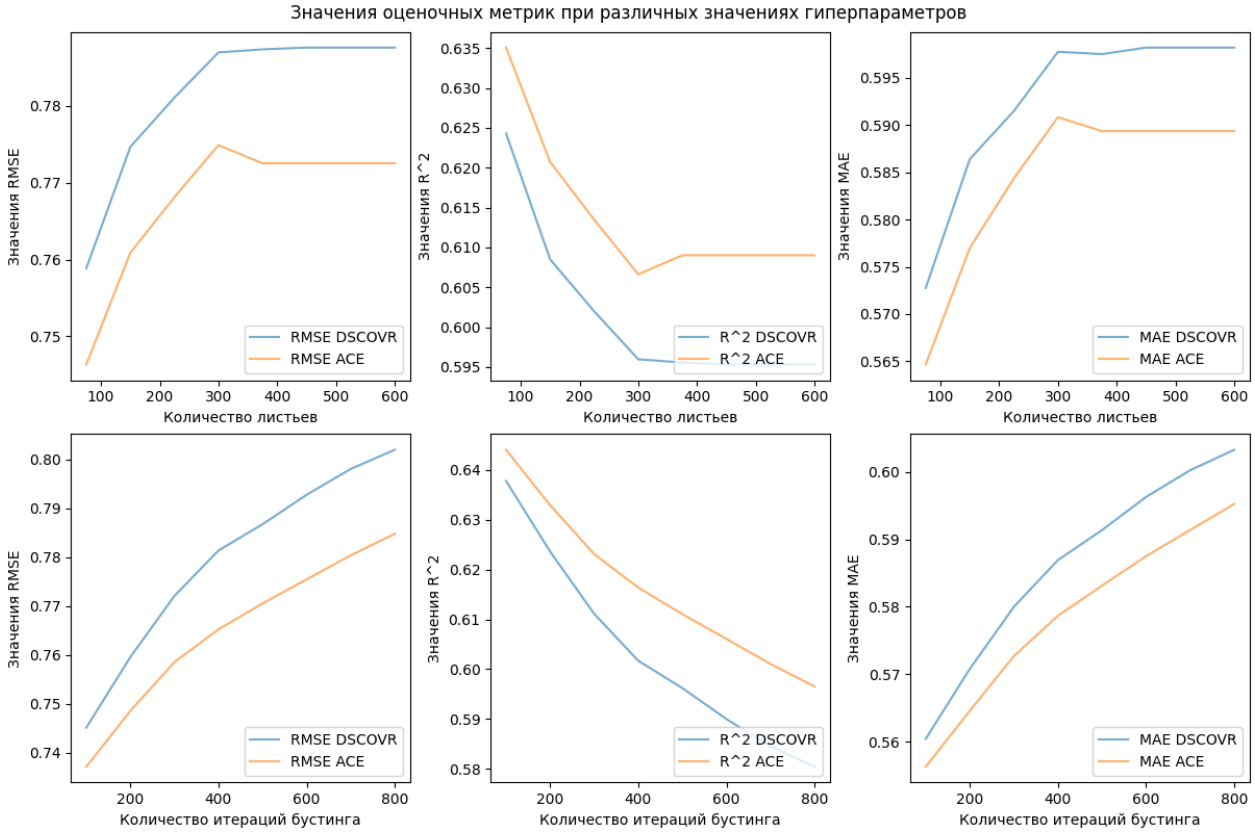

Рис. 2. Показания оценочной метрики RMSE прогнозов модели градиентного бустинга при различных значениях гиперпараметров num_leaves (верхний ряд) и num_iterations (нижний ряд)

Наилучший результат (RMSE=0.855, MAE=0.699, R^2=0.525) для модели, работающей с первым набором данных от спутника DSCOVR, продемонстрировало использование следующих значений гиперпараметров: количества листьев num_leaves = 30, количества итераций num_iterations = 100.

Для модели, работающей со вторым набором данных от спутника ACE, наилучший результат (RMSE=0.871, MAE=0.704, R^2=0.507) продемонстрировало использование аналогичных значений гиперпараметров.

4. ОЦЕНКА ПРОГНОЗОВ МОДЕЛЕЙ

После настройки моделей было проведено их итоговое обучение и тестирование. Для оценки точности прогнозов использовались упомянутые ранее оценочные метрики R^2, MAE и RMSE. Их значения представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Оценка результатов прогнозирования для моделей машинного обучения

Используемый источник показателей космической погоды	Модель машинного обучения	
	Random Forest	Gradient Boosting
ACE	RMSE: 0.688 MAE: 0.524 R^2: 0.692	RMSE: 0.871 MAE: 0.704 R^2: 0.507
DSCOVR	RMSE: 0.687 MAE: 0.522 R^2: 0.693	RMSE: 0.855 MAE: 0.699 R^2: 0.525

В целях демонстрации эффективности работы моделей в условиях низкой и повышенной геомагнитной активности мы визуализировали настоящие значения K_p и прогнозируемые значения K_p на соответствующих временных участках. В качестве участка с низкой геомагнитной активностью был выбран период с 1 по 20 февраля 2024 года (рис. 3), тогда как в качестве участка с повышенной геомагнитной активностью был выбран период с 1 по 12 мая 2024 года (рис. 4).

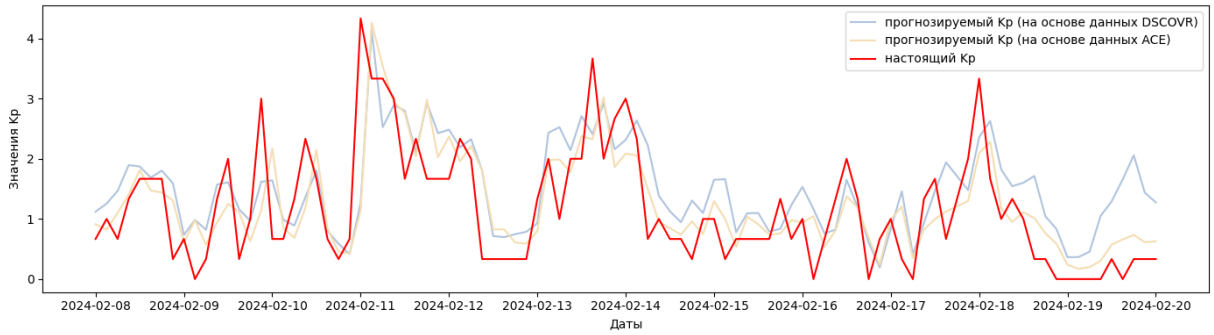

Рис. 3. Значения прогнозируемого K_p на участке с низкой геомагнитной активностью за февраль 2024 года для модели, использующей алгоритм случайного леса

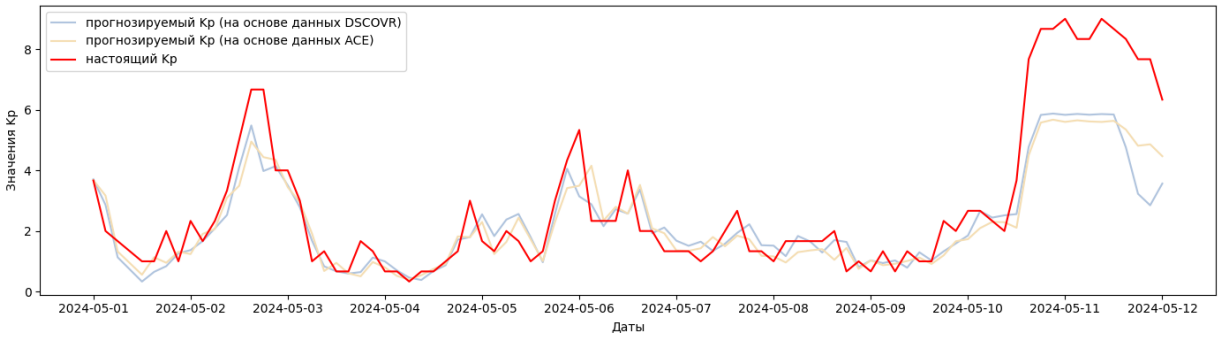

Рис. 4. Значения прогнозируемого K_p на участке с повышенной геомагнитной активностью за май 2024 года для модели, использующей алгоритм случайного леса

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

На аналогичных временных участках также представлена визуализация значений настоящего K_p и K_p, прогнозируемого моделью, использующей алгоритм градиентного бустинга (рис. 5-6). Модели несколько занижают пиковые значения Kp при сильных бурях (Kp ≥ 6), однако в большинстве случаев корректно определяют наличие штормового уровня (Kp ≥ 5).

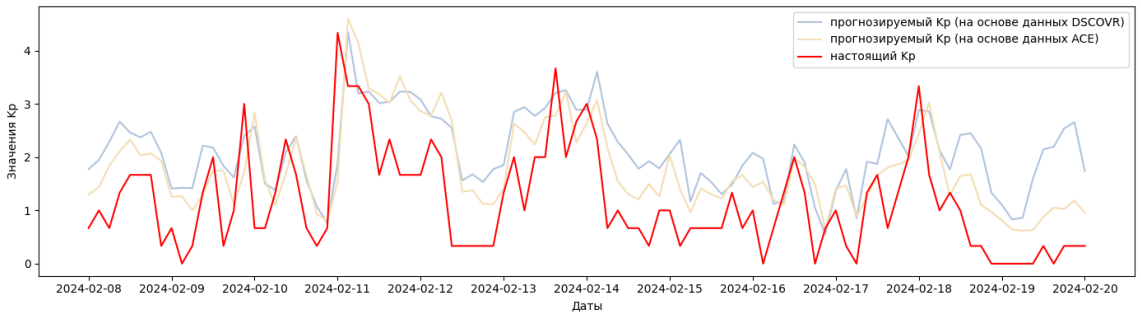

Рис. 5. Значения прогнозируемого K_p на участке с низкой геомагнитной активностью за февраль 2024 года для модели, использующей алгоритм градиентного бустинга

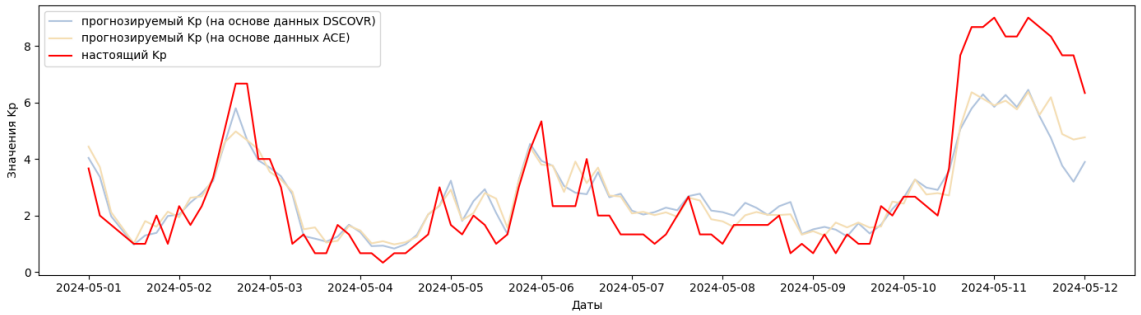

Рис. 6. Значения прогнозируемого K_p на участке с повышенной геомагнитной активностью за май 2024 года для модели, использующей алгоритм градиентного бустинга

На основе данных графиков можно утверждать, что точность прогнозов моделей, обученных на данных от ACE и DSCOVR, является довольно близкой, однако спутник DSCOVR является более предпочтительным в качестве источника показателей из-за существенно меньшего количества пропусков в рядах показателей (табл. 2-3).

Таблица 2. Количество пропущенных показателей спутника ACE за период с 1 августа 2016 года по 30 июня 2024 года

Показатель спутника ACE	Количество пропущенных минутных данных
z-вектор магнитного поля	736960
x-вектор магнитного поля	736960
y-вектор магнитного поля	736960
Плотность протонов	820511
Скорость протонов	810333
Температура протонов	854329

Таблица 3. Количество пропущенных показателей спутника DSCOVR за период с 1 августа 2016 года по 30 июня 2024 года

Показатель спутника DSCOVR	Количество пропущенных минутных данных
z-вектор магнитного поля	428135
x-вектор магнитного поля	428135
y-вектор магнитного поля	428135
Плотность протонов	509660
Скорость протонов	460337
Температура протонов	463819

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Исходя из полученных результатов был разработан программный инструментарий для прогнозирования значений K_p в режиме реального времени. Разработка данного инструментария проводилась на языке программирования Python с использованием библиотек sklearn и lightgbm для реализации моделей прогнозирования.

В качестве входных данных для моделей были выбраны упомянутые ранее показатели, связанные с солнечным ветром и магнитным полем Земли. Кроме того, в набор входных данных были добавлены значения K_p за прошлые 3 часа и другие представленные ранее показатели, измеряемые на основе показателей солнечного ветра и магнитного поля Земли. В качестве источника данных был выбран онлайн архив NOAA, содержащий показатели, поставляемые со спутника DSCOVR.

Разработанная программа проводит обучение двух моделей: модели, использующей алгоритм случайного леса, и модели, использующей алгоритм градиентного бустинга. После чего программа каждые 5 минут обращается к локальной базе данных для получения актуальных показателей, связанных с солнечным ветром и магнитным полем Земли с начала текущего 3-часового периода. Исходя из данных показателей, программа производит прогнозирование значений K_p на конец следующего 3-часового периода. Таким образом, данная программа способна прогнозировать значения K_p от 3 до 6 часов вперед, учитывая то, на каком этапе текущего 3-часового периода проводился прогноз.

Данный программный инструментарий был введен в работу центра космической погоды при ФГБУ «ИПГ» с 1 декабря 2024 года и в настоящее время продолжает поставлять прогнозы в режиме реального времени.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, модели, использующие ансамблевые алгоритмы машинного обучения, продемонстрировали удовлетворительные результаты при проведении краткосрочного прогнозирования значений K_p. В соответствии с этим можно утверждать, что данные алгоритмы машинного обучения способны показывать сопоставимую точность широко используемым рекуррентным нейронным сетям (в частности LSTM) при работе с агрегированными табличными данными в данной сфере научных исследований.

При сопоставимой точности прогнозов, выполненных моделями на основе показателей от ACE и DSCOVR, предпочтительным источником показателей был обозначен DSCOVR ввиду меньшего количества пропущенных наблюдений. Использование показателей от данного источника позволяет обучить модель работе с более разнообразным набором наблюдений при наличии достаточной защиты от переобучения.

На основе полученных результатов был разработан программный инструментарий, способный прогнозировать значения K_p от 3 до 6 часов вперед в режиме реального времени. Данный инструментарий был внедрен в работу центра космической погоды при ФГБУ «ИПГ».

ЛИТЕРАТУРА

- *Bartels J.* The standardized index Ks, and the planetary index Kp// IATME Bull, №2b, 1949. P. 97-112.
- *Chakraborty S., Morley S.K.* Probabilistic prediction of geomagnetic storms and the Kp index // Journal of Space Weather and Space Climate, vol. 10, 2020. DOI: https://doi.org/10.1051/swsc/2020037.
- *Choi H.-S., Lee J., Cho K.-S.* Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships // Space Weather, vol. 9, is. 6, 2011. DOI: https://doi.org/10.1029/2010SW000597.
- *Fiori R.A.D., Kumar V.V., Boteler D.H., Terkildsen M.B.* Occurrence rate and duration of space weather impacts on high-frequency radio communication used by aviation // Space Weather and Space Climate, vol. 12, is. 21, 2022. DOI: https://doi.org/10.1051/swsc/2022017.
- *Joyarieb P., Silalahi V.C., Anggelica V., Ongso K.K.* Comprehensive Approach to Weather Prediction with the Random Forest Algorithm // Data Science Insights, vol. 3, 2025. P. 75-82. DOI: 10.63017/jdsi.v3i2.35.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

- *Pilipenko V.A., Chernikov A.A., Soloviev A.A., Yagova N.V., Saharov Y.A., Kudin D.V*. Influence of Space Weather on the Reliability of the Transport System Functioning at High Latitudes // Russian Journal of Earth Sciences, vol 23, №2. 2023. DOI: https://doi.org/10.2205/2023ES000824.
- *Risanti R.* Analysis of Weather Prediction Models Using Support Vector Machine, Gradient Boosting, Random Forest, and Decision Tree // PROSIDING SEMINAR NASIONAL FISIKA, vol. 7, 2024. P. 119-128. DOI: https://doi.org/10.21009/03.1201.FA18.
- *Tan Y., Hu Q., Wang Z., Zhong Q.* Geomagnetic index Kp forecasting with LSTM // Space Weather, vol. 16, is. 4, 2018. P. 406-416. DOI: https://doi.org/10.1002/2017SW001764.

SHORT-TERM FORECASTING OF GEOMAGNETIC STORMS USING PLANETARY K-INDEX (KP) PREDICTION

Kondratov A. D., Kholodkov K. I., Burov V. A.

This study presents short-term (3-6 hour) forecasting models for the planetary K-index based on Random Forest and Gradient Boosting (LightGBM) algorithms. Models were trained and tested on solar wind proton speed/density/temperature and IMF components (B_x, B_y, B_z) from ACE and DSCOVR satellites (August 2016 – June 2024), with official K_p values from GFZ Potsdam. Adding the previous 3-hour K_p and metrics derived from original solar wind data as features has markedly improved performance. The best model (Random Forest on DSCOVR data) reached $R^2 = 0.693$, MAE = 0.522, RMSE = 0.687. A realtime forecasting system was implemented in Python and successfully deployed at the Institute of Applied Geophysics in December 2024 that continues providing forecasts to this day. Ensemble algorithms offer a fast and effective alternative to recurrent neural networks, with DSCOVR data providing superior predictive capability over ACE.

KEYWORDS: SPACE WEATHER, PLANETARY K-INDEX, GEOMAGNETIC STORMS, RANDOM FOREST, GRADIENT BOOSTING, MACHINE LEARNING.

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 40 – 45, 2026

Поступила в редакцию 30.03.2026 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

ISSN 2304-7380

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ

С. И. Козлов[1,2], С. Ш. Николайшвили[3], В. В. Яким[1,2], С. В. Якубовский[2]

[1]Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Научно-исследовательский испытательный центр ЦНИИ ВКС Минобороны России, Москва, Россия
[3]Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

Рассматривается влияние ионосферы на функционирование радиолокационных средств дальнего обнаружения. Показывается, что для повышения эффективности функционирования РЛС необходимо использовать ионосферные модели. Существующие модели относительно адекватно описывают среднеширотную невозмущенную и, отчасти, возмущенную ионосферу, а также экваториальную ионосферу. В то же время полярная ионосфера описывается недостаточно эффективно.

Обоснованы некоторые из перспективных направлений учета влияния среды на функционирование РЛС ДО, в частности, подчеркивается необходимость непрерывного мониторинга полярной ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, радиолокация, распространение радиоволн, модель ионосферы.

EDN: EFKTFE

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время только две страны, Россия и США, имеют системы предупреждения о ракетном нападении (СПРН), состоящие из наземного и космического эшелонов [Шестихин и др., 2015; Lee & Olson, 2017; Аксенов и др., 2017; Аксенов и др., 2020а; Dunham and Wilson, 2020]. Наземный эшелон включает в себя высокопотенциальные радиолокационные средства дальнего обнаружения (РЛС ДО), функционирующие в широком диапазоне длин волн на различных широтах [Аксенов и др., 2017, Аксенов и др., 2020б]. В России группировка РЛС ДО включает более десяти пространственно-разнесенных надгоризонтных средств, расположенных по периферии национальной территории.

На распространение радиоволн всех диапазонов значительное влияние оказывают тропосфера и ионосфера Земли. Состояние ионосферы имеет непрерывно изменяющийся характер, который зависит от многих факторов, в первую очередь от солнечной и магнитной активностей. Воздействие этих факторов зависит от географической и магнитной широт, которые в настоящее время разбиваются на экваториальные, среднеширотные и полярные.

Попытки учета ионосферы принимались на РЛС СПРН всех поколений как в России, так и в США, в различные годы их создания [Аксенов и др., 2020а]. Так, например, в одной из отечественных РЛС, работающей в полярных широтах, эта задача решалась за счет режекторной фильтрации областей

Электронная почта авторов для переписки:

Козлов Станислав Иванович, e-mail: s_kozlov@inbox.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/efktfe

с повышенным уровнем естественных пассивных помех, вызванных полярным сиянием. Для другой был реализован аппаратно-программный канал ионосферно-фазовых измерений (ИФИ), позволяющий качественно улучшить траекторные измерения в реальном масштабе времени. Калибровка канала ИФИ потребовала значительного объема статистических данных, относящихся к сезонно-суточному изменению состояния ионосферы, влияющему на функционирование РЛС.

Цель работы – анализ перспективных направлений повышения эффективности функционирования радиолокационных средств благодаря более корректному учету среды распространении радиоволн.

2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как показывают отечественные и зарубежные исследования, учет влияния ионосферы может осуществляться аппаратурно-программными средствами и программными методами с использованием ионосферных моделей. Реализация аппаратурного-программного подхода предполагает оснащение места дислокации РЛС аппаратурой типа: приемник GPS, магнетометр, метеостанция и др. Программный подход требует правильного выбора ионосферной модели в зависимости от широтно-долготного расположения и ориентации зоны ответственности радиолокационного средства.

Существующие отечественные и зарубежные модели с большой долей адекватности описывают среднеширотную невозмущенную и, отчасти, возмущенную ионосферу. Для экваториальной ионосферы также можно подобрать модель (например, BLGIM в паре с NeQuickG в виде фоновой модели [Yasyukevich et al., 2023]). Полярная ионосфера не может быть описана указанными ионосферными моделями в силу отсутствия достаточного объема эмпирических данных, используемых при их разработке. Данные обстоятельства относятся ко всем диапазонам длин волн.

В ряде исследований [Аксенов и др., 2020б] показано, что широко используемая в задаче коррекции траекторных измерений модель NeQuick применима в спокойной и слабо возмущенной среднеширотной ионосфере, но недостаточно эффективна в условиях полярных широт и при сильных возмущениях. Другая проблема заключается в том, как часто пересчитывать модель с учетом непрерывного характера изменения среды даже в спокойных и слабо возмущенных условиях. В данный момент это делается через 15-30 минут, что представляется явно недостаточным.

В РЛС ДО последнего поколения реализован комплекс мер и средств, призванных улучшить их функционирование:

- метеостанции – для учета коррекции тропосферной составляющей траекторных измерений;
- модель NeQuick, о которой упоминалось выше – для учета коррекции ионосферной составляющей траекторных измерений;
- приемники радио навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, магнетометр – для коррекции результатов модели NeQuick.

Реализация этих мер и средств улучшает траекторные измерения для РЛС, действующих на средних широтах, но не дает положительного результата для станций, функционирующих в полярных широтах в связи с отсутствием описания и моделей полярной ионосферы в целом.

Заметим, что модель NeQuick [Di Giovanni & Radicella, 1990] и её различные модификации (см. напр. [Leitinger et al., 1999; Leitinger et al., 2005; Coïsson et al., 2006; Nava et al., 2008; ESSA…]) разработаны на эмпирических данных, и обновляются в часовом интервале через входные параметры, что накладывает некоторые ограничения на условия её использования. В [Алпатов и др., 2020] показано, что в интересах радиолокационных средств возможно использовать вероятностно-статистические модели Института динамики геосфер РАН [Козлов и др., 2014].

ИСЗ, относящиеся к навигационным системам ГЛОНАСС и GPS, позволяют уточнять модельные данные по параметру полного электронного содержания (ПЭС). Однако на полярных орбитах (с большим наклонением орбит) эти аппараты практически отсутствуют, что не позволяет корректно уточнять модельные оценки. Предлагаются различные методы аппроксимации данных ПЭС на полярные широты на расстояния порядка 300 км от места расположения приемника GPS и ГЛОНАСС, но без знаний о полярной ионосфере они малоэффективны.

В настоящее время описание состояния ионосферы базируется на иностранных моделях [Yasyukevich et al., 2023] и на отечественной модели SIMP1 и SIMP2 Института прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова РОСГИДРОМЕТа [Деминов и др., 2019; Цыбуля, 2021]. Входные параметры моделей приведены в таблице 1 [Yasyukevich et al., 2023; Деминов и др., 2019,

Цыбуля, 2021]. В случае, если некоторые параметры недоступны, например, *F*10.7 и *Ap*, то используются их глобальные значения.

Таблица 1. Входные параметры ионосферных моделей

Модель	Входные параметры
Klobuchar	Broadcast coefficients
NeQuickG	Broadcast coefficients, CCIR
BDGIM	Broadcast coefficients
GLONASS	F10.7, Ap
IRI-2016	IG12, URSI, topside - IRI-corr
IRI-2012	IG12, URSI, topside - IRI-corr
IRI-Plus	IG12, URSI
NeQuick2	*F*10.7, CCIR
GEMTEC	*F*10.7
SIMP	Ионосферный индекс *T*; *F*10.7; *Kp*

Такой подход, очевидно, приводит к неточностям моделирования. Математически описания моделей различаются между собой. На рисунке 1 показаны модельные распределения ПЭС [Yasyukevich et al., 2023].

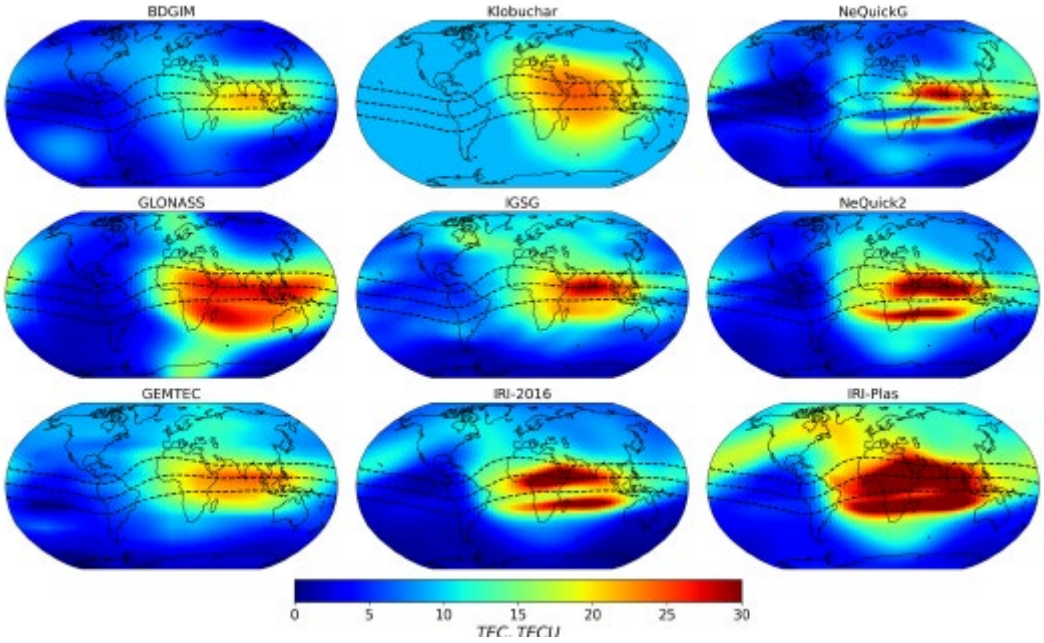

Рис. 1. Модельное распределение ПЭС для ионосферных моделей на момент времени UT 10:00, 1 января 2020 г. Над каждой частью рисунка приведены названия моделей

Этот рисунок демонстрирует большие различия модельных расчетов ПЭС, что естественно приводит к значительным неточностям при решении конечной задачи (оценка позиционирования для навигационных систем, оценка дальностей от радиолокационных средств до космических аппаратов).

Кроме того, обратим внимание, что при создании зарубежных моделей на основании большого объема эмпирических данных используются, главным образом, аппроксимационные и интерполяционные зависимости, что не позволяет понять учитываемые физические процессы, протекающие в ионосфере на различных широтах и высотах, их связи с солнечной и магнитной активностями. Такая ситуация приводит к трудностям при выборе той или иной модели, а также к необходимости подгонять многие параметры с целью получения согласия с экспериментом. Использование отечественных моделей, нацеленных на полярную ионосферу, могло бы устранить этот принципиальный недостаток, так как разработчики РЛС ДО всегда могут обратиться к авторам модели за пояснениями, уточнениями и дополнениями. Однако в настоящее время отечественные модели,

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

приемлемые для практического использования в РЛС ДО, функционирующих в полярных широтах, отсутствуют.

3. ОСНОВНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ УЧЕТА СРЕДЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

В общем случае перспективных направлений учета влияния среды распространения радиоволн на РЛС достаточно много. Ниже перечислены и кратко обоснованы некоторые из них.

1. Наиболее очевидным является увеличение в зонах ответственности РЛС и особенно для РЛС, функционирующих на полярных широтах, ИСЗ типа GPS или ГЛОНАСС, использование которых позволяет находить ПЭС. Конечно, этот путь весьма затратный по стоимости.
2. Необходимо уменьшать интервалы учета среды распространения радиоволн, указанных в первой части. В качестве обоснования этого вывода приведем анализ первичных отметок ионосферных неоднородностей для одной из среднеширотных РЛС. В таблицах 2 и 3 приведено количество наблюдаемых неоднородностей в восьмисекундных интервалах работы станции в спокойной ионосфере в дневное время, сгруппированных в периоды по 80 секунд и их анализ. Видно, что даже на восьмисекундных интервалах ионосфера непрерывно меняется (табл. 2).

Таблица 2. Статистические данные наблюдений ионосферных неоднородностей

Периоды наблюдений (80сек)	Количество наблюдаемых неоднородностей в восьмисекундных интервалах для каждого периода									
1. (0-80 с)	15	12	14	8	5	6	10	11	9	25
2. (80-160с)	10	6	7	6	7	7	5	6	8	11
3. (160-240с)	8	12	11	15	17	16	16	24	30	25
4. (240-320с)	18	20	22	14	14	15	15	15	10	12
5. (320-400с)	11	13	14	20	11	10	6	9	13	7
6. (480-560с)	16	8	18	10	10	11	10	8	9	13
7. (560-640с)	19	21	21	21	26	19	14	16	19	24
8. (640-720с)	16	18	20	16	20	20	11	18	20	16
9. (720-800с)	22	18	18	13	13	12	15	16	18	23
10. (800-880с)	20	25	23	25	19	17	22	24	21	19

Таблица 3. Сравниваемые периоды и полученные результаты по критерию Манна-Уитни и уровню значимости 0.05

Сравниваемые периоды (из таблицы 2)	2-1	3-2	4-3	5-4	6-5	7-6	8-7	9-8	10-9
Результаты сравнения	1	1	0	1	0	1	0	0	1
Общее время работы РЛС (сек)	160	240	320	400	480	560	640	720	800

Примечание: 1 – сравниваемые периоды различаются. 0 – сравниваемые периоды не различаются. Последовательность «0 0» для периодов «8-7» и «9-8» указывает на то, что в соответствующий временной период с 560 с по 720 с ионосфера не менялась.

3. Из анализа данных таблицы 3 видно, что параметры ионосферы активно меняются на периоде в 80 сек, в то время как алгоритм коррекции модели NeQuick, напомним, использует 15-30 минутные периоды. Данные результаты подтверждают актуальность более частого пересчета модели для использования её в коррекции замеров по дальности, особенно в полярных широтах, и потребность в создании отечественных моделей, ориентированных на более короткие интервалы учета изменения состояния ионосферы.

4. Целесообразно использование экспериментальных данных от четырех новых ИСЗ «Ионосфера-М» Росгидромета [Денисова и др., 2025] на полярных орбитах для калибровки моделей полярной ионосферы.
5. Оборудовать каждую РЛС ДО отечественными станциями возвратно-наклонного зондирования в КВ-диапазоне (ВНЗ), так как для станций ВНЗ существуют хорошо отработанные методы определения траекторных ошибок, которые коррелируют с ошибками в дециметровом и метровом диапазонах длин волн. К сожалению, эффективное использование ВНЗ в интересах РЛС ограничено в основном только спокойными условиями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что данная проблема далека от своего решения, во всяком случае для отечественных РЛС.

По нашему мнению, целесообразно провести НИОКР по разработке отечественной модели полярной ионосферы.

Кроме того, необходимо организовать непрерывный мониторинг полярной ионосферы для понимания физики происходящих процессов (например, влияние КАСПа на распространение дециметровых и метровых радиоволн; оценка общей возмущенности полярной ионосферы и учет её в ионосферных моделях; оценка тонкой структуры (неоднородности) ионосферы; исследование полярного овала во времени).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы, пользуясь случаем, благодарят Н.Г. Котонаеву (Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова) за полезное обсуждение работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Госзадания FMWN-2025-0006.

ЛИТЕРАТУРА

– *Аксенов О.Ю., Анцупов О.И., Вартаньян Ю.А., Вениаминов С.С., Осипов О.В., Третьяков Ю.Н., Убоженко Д.Ю., Филин Е.Н.* Ракетно-космическое вооружение // Создание и развитие систем ракетно-космической обороны. Том 1. В монографии «Системы ракетной обороны». В 4 томах. / Под ред. доктора технических наук О.Ю. Аксенова. – М.: АО «ИД «Аргументы недели», том 1, 2020а. 304 с.

– *Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Якубовский С.В.* Возможности сплошного радиолокационного поля СПРН по наблюдению космических объектов // Экологический вестник научных центров ЧЭС, №4, вып. 2, 2017.С. 12-19.

– *Аксенов О.Ю., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Трекин В.В., Перунов Ю.М.* Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств // Солнечно-земная физика, том 6, №1, 2020б. С. 86-96.

– *Алпатов В.В., Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Яким В.В., Якубовский С.В.* Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. II. Отечественные модели // Солнечно-земная физика, том 6, №3, 2020. С. 73-81.

– *Деминов М.Г., Михайлов А.В., Михайлов В.В., Шубин В.Н., Цыбуля К.Г.* Ионосферное моделирование и прогнозирование // Системный мониторинг ионосферы. Сб. науч. трудов. Ред. Н.Г. Котонаева. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019. С. 286-343.

– *Денисова В.И., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г., Цыбуля К.Г.* Новые возможности системы геофизического мониторинга Росгидромета, связанные с запуском аппаратов космического комплекса «Ионозонд», в интересах информационного обеспечения Вооружённых сил РФ // Материалы VIII

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»/ Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 2025. С. 36-41.

- *Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З.* Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэрономия, том 54, №6, 2014. С. 767-779.
- *Цыбуля К.Г.* Простой алгоритм ассимиляции полного электронного содержания в ионосферную модель SIMP-STANDARD // Гелиогеофизические исследования, №29, 2021. С. 50-56.
- *Шестихин В.И., Салтанов П.Я., Якубовский С.В*. Опытно-теоретический метод испытаний системы предупреждения о ракетном нападении // М.: Военная мысль, №6, 2015. С. 37-41.
- *Coïsson P., Radicella S.M., Leitinger R., Nava B.* Topside electron density in IRI and NeQuick: features and limitations // Advances in Space Research, 37, 2006. P. 937-942.
- *Di Giovanni G., Radicella S.M.* An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Advances in Space Research, 10(11), 1990. P. 27-30.
- *Dunham S.T., Wilson R.S.* The missile threat: a taxonomy for moving beyond ballistic // The Aerospace Corporation, 2020. 27 p.
- ESSA navipedia. NeQuick Ionospheric Model. Subirana J.S., Juan Zornoza J.M., Hernández-Pajares M., 2011, updated 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model (дата обращения: 15.12.2025).
- *Lee J., Olson J.* Weapons of Mass Destruction // THE STRATEGIC AND PRACTICAL REALITIES OF AMERICAN BALLISTIC MISSILE DEFENSE SYSTEMS. 24th October 2017. 16p.
- *Leitinger R., Radicella S., Nava B., Hochegger G., Hafner J.* Nequick - CQSTprof - NeUoG- plas, a family of 3D electron density models // COST25 1 Madeira Workshop Proceedings, 1999. P. 75-89.
- *Leitinger R., Zhang M.L., Radicella S.M.* An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick // Annals of Geophysics, 48 (3), 2005. P. 525-534.
- *Nava B., Coïsson P., Radicella S.M.* A New Version of the NeQuick Ionosphere Electron Density Model // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys, 70, 2008. P. 1856-1862. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015.
- *Yasyukevich Yu.V., Zatolokin D., Padokhin A. et al.* Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains // Sensors, 23(10), 2023. 23 p. DOI: 10.3390/s23104773.

ANALYSIS OF PROMISING AREAS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF RADAR FACILITIES

Kozlov S. I., Nikolaishvili S. S., Yakim V. V., Yakubovskiy S. V.

The influence of the ionosphere on the functioning of long-range radar systems is considered. It is shown that ionospheric models must be used to increase the efficiency of radar operation. Existing models relatively adequately describe the mid-latitude undisturbed and, to some extent, disturbed ionosphere, as well as the equatorial ionosphere. At the same time, the polar ionosphere is not described effectively enough. Some of the promising areas of consideration of the environmental impact on the functioning of radar stations are substantiated, in particular, the need for continuous monitoring of the polar ionosphere is emphasized.

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADAR, RADIO WAVES PROPAGATION, IONOSPHERE MODEL.

ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 52, 46 – 55, 2026

ISSN 2304-7380

Поступила в редакцию 25.03.2025 г.
Опубликована 02.09.2026 г.

УДК 550.388.2

ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ E ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ МОСКВА

А. Д. Данилов[1], А. В. Константинова[1], Н. А. Бербенева[2]

[1]*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия*
[2]*Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Выполнен анализ долговременных трендов критической частоты слоя *E*, *foE*, по наблюдениям методом вертикального зондирования на ст. Moscow. Применен метод определения трендов, неоднократно использованный авторами для анализа трендов параметров ионосферного слоя *F*2. Метод основан на анализе изменения со временем разницы Δ*foE* между наблюдаемым и эталонным значением месячной медианы критической частоты. Рассмотрены два равноденственных месяца март и октябрь и зимний месяц январь. Обнаружены три типа изменения со временем величины Δ*foE*: рост в течение всех анализируемых лет, который дает положительный тренд *foE*, падение в течение всех анализируемых лет, которое дает отрицательный тренд *foE*, и промежуточный тип со сменой знака изменения Δ*foE* в середине рассматриваемого интервала лет. Показано, что картина суточных изменений тренда *foE* одинакова для двух равноденственных месяцев, но отличается от таковой для января.

Ключевые слова: ионосферный слой E, критическая частота, долговременные тренды.

EDN: HBUELM

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема определения трендов параметров ионосферных слоев хорошо известна и активно обсуждается в научной литературе. В последние годы она привлекает особенно большое внимание. Сошлемся на обзорные работы Laštovička [2023], Cnossen et al. [2024] и Elias et al [2024]. Наиболее часто исследуются указанные тренды в области *F*. Анализируются изменения со временем различных параметров: критической частоты слоя *F*2, *foF*2, его высоты *hmF*2, его приведенной толщины TS и полного содержания электронов TEC (см. Данилов и Константинова [2024] и Elias et al [2024]).

Наибольшее внимание уделяется анализу временных вариаций величин *foF*2 и *hmF*2 по данным вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы. Результаты такого анализа для ряда станций Северного и Южного полушарий можно найти в работах авторов [Данилов и др., 2024а, б].

Гораздо меньше внимания уделяется долговременным трендам параметров слоя *E*. Первые указания на наличие положительного тренда критической частоты слоя *E* обнаружили Гивишвили и Лещенко [1993] по данным ст. Москва. Позднее анализ трендов *foE* проводился рядом авторов. Наиболее полное исследование трендов как критической частоты, так и высоты слоя *E* было проведено Bremer [2001] на основании данных 71 станции ВЗ. Анализирую изменение *foE* со временем, Bremer

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

https://elibrary.ru/hbuelm

[2001] получил, что наблюдается хорошо выраженный и статистически значимый тренд *foE*, равный +0.013 МГц в год. Аналогичный анализ был выполнен в работе [Bremer, 2001] также для высоты слоя *E*, *hmE*. Оказалось, что слой *E* опускается (отрицательный тренд равен 0.029 км/год). Эти результаты были подтверждены в более поздней работе Bremer [2008].

Авторы анализировали критические частоты *foE* по наблюдениям на нескольких станциях ВЗ и получили ряд выводов о суточных и сезонных вариациях этих трендов [Данилов и Константинова, 2018а, б; Danilov & Konstantinova, 2019]. В указанных работах анализировались данные до 2015 г., и для избавления от эффектов СА использовался индекс *F*10.7.

По современным представлениям индекс *F*10.7 не является лучшим для описания поведения параметров ионосферы – для этой цели правильнее использовать индексы *F*30, *MgII* и *Ly*-a. Более подробное обсуждение этой проблемы можно найти в работах Данилова и Бербеневой [2023, 2024].

Мы возвращаемся к проблеме долговременных трендов *foE*, анализируя данные наблюдений на ряде ионосферной станции до настоящего момента и используя для устранения эффектов СА в соответствии с современными представлениями указанные индексы *F*30, *Mg*II и *Ly*-a.

Выделение трендов критической частоты слоя *E*, *foE*, гораздо сложнее, чем анализ трендов *foF*2. Это связано с меньшей надежностью определения *foE*, чем *foF*2 в методе ВЗ, а также с гораздо более сложной картиной суточных вариаций трендов *foE*, *k*(*foE*), чем трендов *foF*2, *k*(*foF*2). Для того, чтобы иметь возможность более подробно и полно описать результаты анализа для каждой станции, мы посвящаем этому анализу отдельные статьи. Результаты выделения трендов *foE* по данным ст. Sverdlovsk описаны в работе Данилова и др. [2025]. В данной работе мы рассмотрим определение этих трендов по данным ст. Moscow.

Мы используем тот же метод выделения долговременных трендов ионосферных параметров, что мы использовали многократно для анализа трендов *foF*2, *hmF*2 и ТЕС [Данилов и др., 2024а, б; Данилов и др., 2025а]. Для каждой ситуации (момент LT, месяц, индекс СА) вычисляется зависимость месячных медиан *foE* от данного индекса для эталонного периода. Изменение со временем разности Δ*foE* между наблюдаемым *foE*(наб) и модельным *foE*(мод) значением критической частоты и дает искомый тренд, который по аналогии с работами по трендам слоя *F*2 мы будем обозначать *k*(*foE*).

В работах по поиску трендов критической частоты и высоты слоя *F*2 в наших публикациях мы анализировали только околополуденные часы (11:00-14:00 LT), поскольку известно, что тренды параметров слоя *F*2 выражены днем, но отсутствуют ночью. При поисках трендов *foE* мы анализируем все моменты LT, в которые слой *E* наблюдается в данном месяце. Напомним, что методом ВЗ этот слой наблюдется только в условиях освещения Солнцем.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Как уже говорилось выше, первым этапом работы было построение зависимостей *foE* для данной ситуации (месяц, момент LT) от каждого из трех индексов СА для эталонного периода 1957-1980 гг. Следует отметить, что, поскольку в методе ВЗ определение критической частоты слоя *E* менее надежно, чем определение *foF*2, для многих результатов по *foE* наблюдается более сильный разброс данных, чем для результатов по *foF*2. Это касается как исходных графиков для эталонного периода, так и графиков для изменения со временем величины Δ*foE*.

Как характеристику получаемых зависимостей мы, как и ранее, использовали коэффициент определенности согласно F-тесту Фишера R^2. Именно эта характеристика и будет приводиться ниже на графиках и в таблицах.

Мы проанализировали наблюдения *foE* на ст. Moscow для зимнего месяца января и двух равноденственных месяцев марта и октября, которые близки по условиям солнечной освещенности. Провести анализ для летних месяцев не удалось, поскольку летом слое *E* при вертикальном зондировании наблюдается плохо. Согласно банку данных ИЗМИРАН (см. раздел Благодарности), например в июне, в некоторые часы LT месячная медиана *foE* основывается только на нескольких (менее 10, а иногда 4-5) значениях, что не позволяет использовать ее для анализа трендов.

Поскольку слой *E* виден на ионограммах ВЗ только в освещенный солнцем период суток, результаты определения тренда *foE* охватывают разные периоды LT в разные месяцы: 08:00-16:00 в январе и 06:00-17:00 в равноденственные месяцы.

2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ЯНВАРЯ

В январе были получены два типа (падение и рост) изменения со временем величины Δ*foE*, которые дают, соответственно, отрицательный и положительный тренд *foE*. Величины *k*(*foE*) для каждой конкретной ситуации оказались близки при использовании каждого из трех индексов СА (*F*30, *Ly*-α *Mg*II). Примеры обоих типов изменения Δ*foE* со временем для всех трех индексов СА приведены на рисунках 1 и 2. Все величины *k*(*foE*) на рисунках и в таблицах приводятся в единицах МГц в год. На рисунках приводятся также величины коэффициента определенности R^2 по F-тесту Фишера, которые характеризуют статистическую значимость *S* получаемых зависимостей.

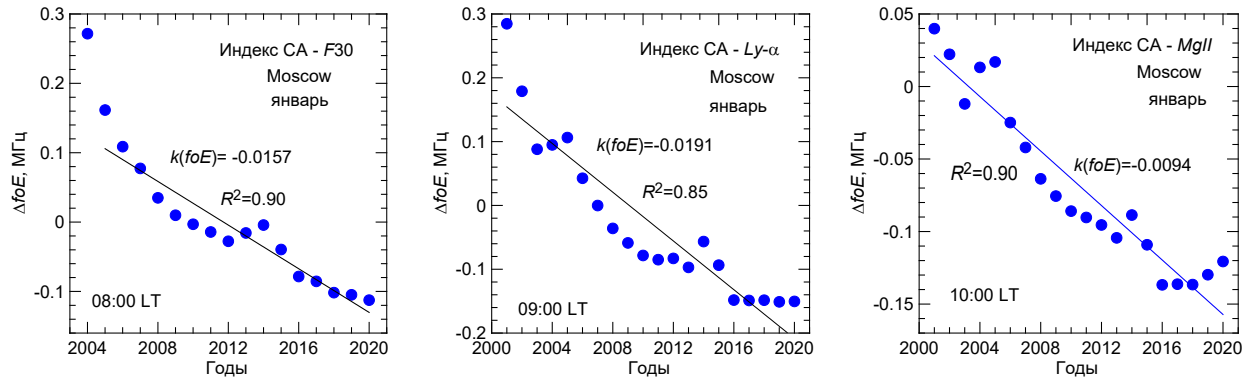

Рис. 1. Примеры уменьшения Δ*foE* со временем для января

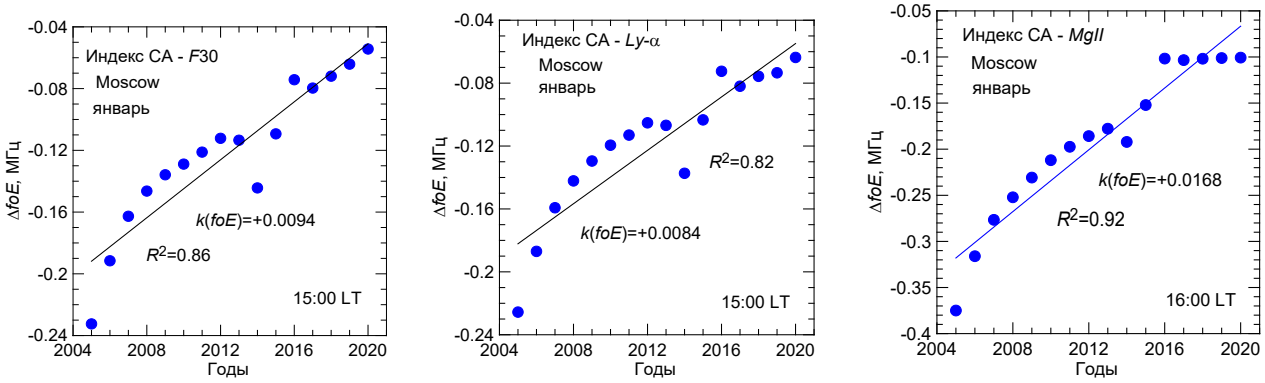

Рис. 2. Примеры роста Δ*foE* со временем для января

Суммарная сводка результатов определения трендов *foE* для января при использовании всех трех индексов СА приводится в таблице 1. Для удобства сравнения величин *k*(*foE*) мы не приводим величин R^2, поскольку они для всех ситуаций (момент LT, индекс СА) достаточно велики и обеспечивают высокую статистическую значимость получаемых результатов.

Как видно из этой таблицы, величины *k*(*foE*), получаемые при использовании разных индексов СА, действительно близки между собой. Это отражается в низких значениях стандартного отклонения SD при усреднении величин, получаемых с разными индексами. В ряде ситуаций (главным образом для предзакатных часов) были проблемы с январскими данными по *foE* для первых лет века, поэтому на рисунке 2 отсчет лет начинается с 2005 г.

Хорошо видено систематическое изменение *k*(*foE*) в течение светового дня. В утренние часы максимален отрицательный тренд. Он постепенно уменьшается по магнитуде и между 13:00 и 14:00 LT сменяется на положительный. Последний растет по магнитуде с ростом LT. Суточный ход величины *k*(*foE*) в январе будет обсуждаться в конце данного подраздела.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Таблица 1. Величины *k*(*foE*) в МГц/год в январе

LT	*F*30	*Ly-α*	*Mg*II	Среднее	SD
8:00	-0.0155	-0.0155	-0.0223	-0.0178	0.0039
9:00	-0.0217	-0.0191	-0.0197	-0.0202	0.0014
10:00	-0.01	-0.0085	-0.0094	-0.0093	0.0008
11:00	-0.0067	-0.0077	-0.008	-0.0075	0.0007
12:00	-0.0042	-0.0054	-0.0049	-0.0048	0.0006
13:00	-0.0015	-0.0026	-0.0029	-0.0023	0.0007
14:00	0.0024	0.0039	0.0021	0.0028	0.001
15:00	0.0094	0.0084	0.0084	0.0087	0.0006
16:00	0.018	0.0173	0.0168	0.0174	0.0006
17:00	0.0056	0.0046	0.0024	0.0042	0.0016

2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ МАРТА

Для марта основными являются те же два типа изменения Δ*foE* (падение и рост в течение всех лет), что и для января. Но наблюдается еще и переходной тип с небольшим падением Δ*foE* в первые годы (до 2010-2011 гг.) и значительным ростом Δ*foE* в последующие годы. Примеры с использованием всех трех индексов СА приводятся на рисунках 3, 4 и 5 для уменьшения Δ*foE*, переходной ситуации и роста Δ*foE*, соответственно.

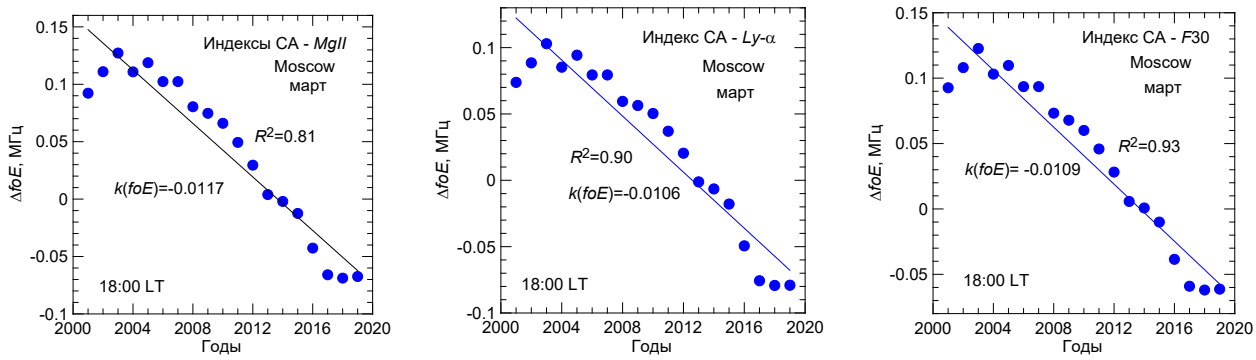

Рис. 3. Примеры уменьшения Δ*foE* со временем для марта

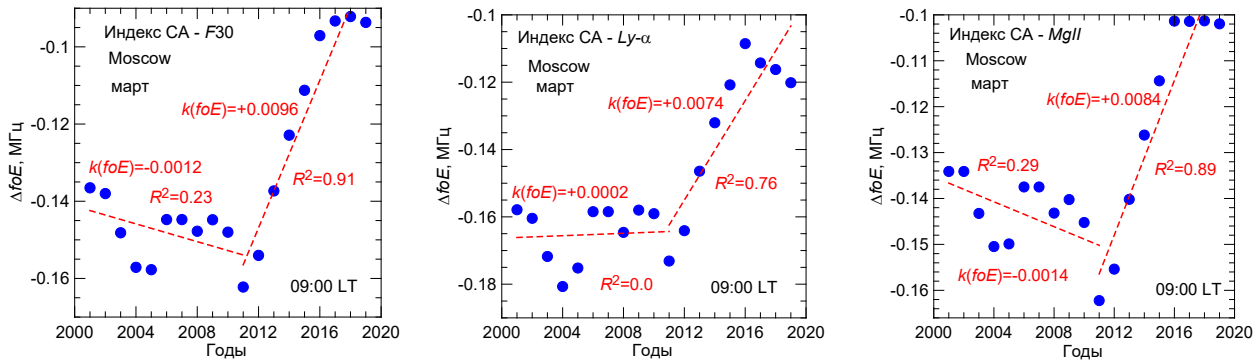

Рис. 4. Примеры переходной ситуации для марта

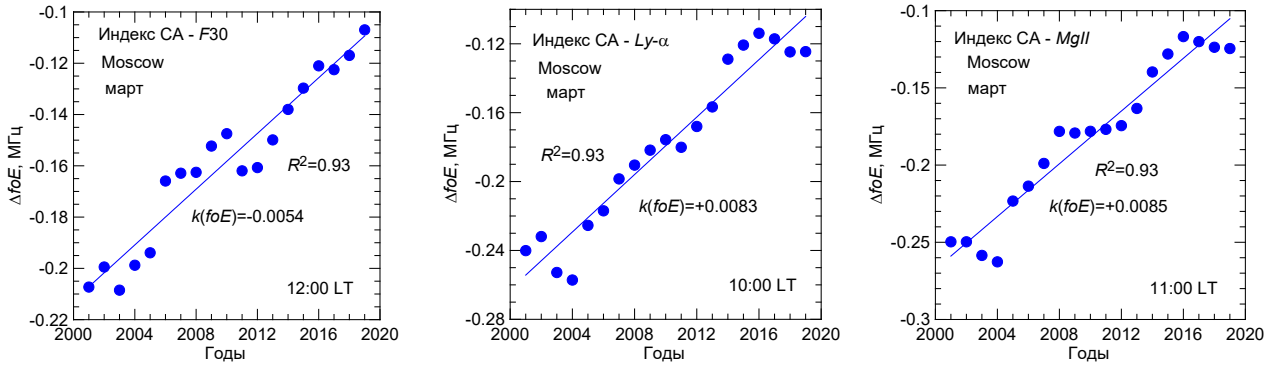

Рис. 5. Примеры роста Δ*foE* со временем для марта

Результаты определения *k*(*foE*) для марта для всех индексов СА и моментов LT приведены в таблице 2.

Таблица 2. Величины *k*(*foE*) в МГц/год и R^2 для марта

	*F*30		*Ly*-α		*Mg*II		Средн	SD
LT	*k*(*foE*)	R^2	*k*(*foE*)	R^2	*k*(*foE*)	R^2		
8:00	–0.0017	0.47	-0.0015	0.43	–0.0026	0.66	–0.0019	0.0006
9:00	–0.0012	0.23	+0.0002	0.00	–0.0014	0.29		
	+0.0096	0.91	+0.0074	0.74	+0.0084	0.89	+0.0085	0.0011
10:00	+0.0084	0.94	+0.0083	0.93	+0.0073	0.93	+0.0080	0.0006
11:00	+0.0096	0.95	+0.0096	0.92	+0.0085	0.93	+0.0092	0.0006
12:00	+0.0054	0.93	+0.0054	0.89	+0.0041	0.83	+0.0050	0.0008
13:00	+0.0036	0.77	+0.0035	0.87	+0.0024	0.61	+0.0032	0.0007
14:00	+0.0034	0.89	+0.0034	0.91	+0.0021	0.62	+0.0030	0.0008
15:00	+0.0037	0.90	+0.0037	0.88	+0.0024	0.68	+0.0033	0.0008
16:00	–0.0007	0.07	–0.0003	0.01	–0.0004	0.03		
	+0.0034	0.83	+0.0005	0.03	+0.0019	0.58	+0.0034	0.0016
17:00	–0.0028	0.75	–0.0026	0.75	–0.0038	0.78	–0.0031	0.0006
18:00	-0.0109	0.93	-0.0106	0.90	-0.0118	0.81	–0.0111	0.0006

Таблица 2 показывает, что величины *k*(*foE*), получаемые при использовании разных индексов СА, близки между собой. Это подтверждается и относительно небольшими величинами среднеквадратичного отклонения SD при усреднении *k*(*foE*) по всем трем индексам СА. Величины R^2 для всех моментов LT кроме переходных периодов (см. ниже) достаточно высоки – 0.8-0.9, что обеспечивает высокую значимость получаемых трендов.

Из таблицы 2 следует, что в марте в течение большей части дня (10:00-15:00 LT) наблюдается положительный тренд *foE*. Усредненные по индексам СА величины лежат в интервале 0.003–0.009 МГц в год. Рано утром (08:00 LT) и в конце светового дня после 16:00 LT наблюдается отрицательный тренд. В 09:00 и 16:00 LT происходит переход от утреннего падения Δ*foE* к дневному росту и от дневного роста к вечернему падению, соответственно. Смена знака зависимости Δ*foE* от времени происходит в эти моменты LT около 2010 г. (рис. 4). В более ранние года наблюдается слабое уменьшение Δ*foE* со временем, а в более поздние годы наблюдается достаточно стабильный рост Δ*foE*, обеспечивающий положительный тренд *foE* для этих лет.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ ОКТЯБРЯ

Картина для октября близка к таковой для марта. Наблюдаются те же три типа изменения Δ*foE* со временем – падение, переходный период и рост. Примеры всех трех типов приводятся на рисунках 6, 7 и 8.

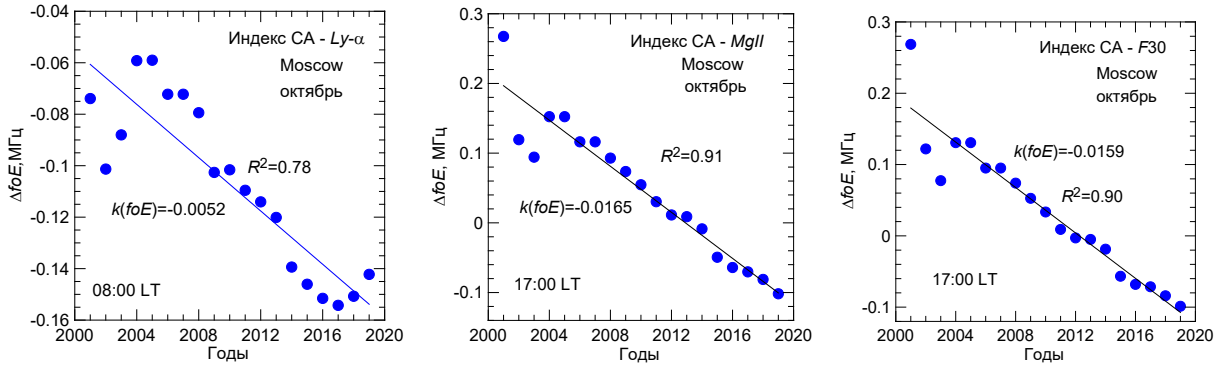

Рис. 6. Примеры уменьшения Δ*foE* со временем для октября

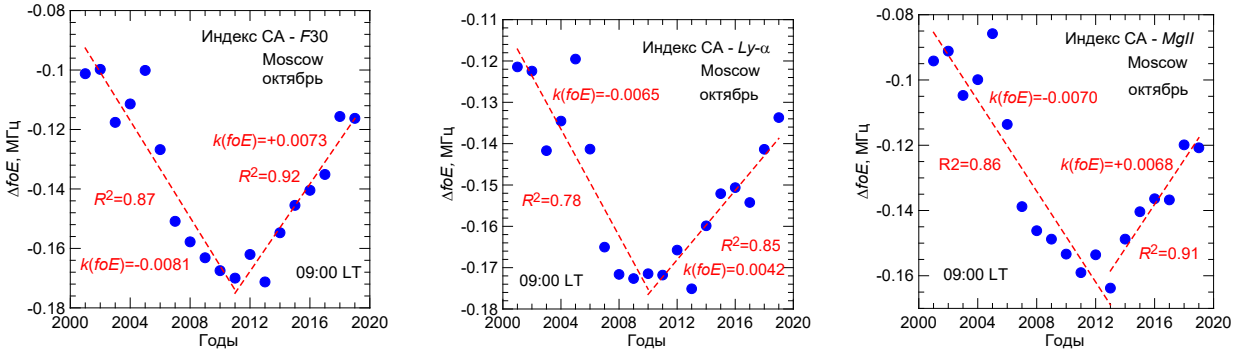

Рис. 7. Примеры переходной ситуации для октября

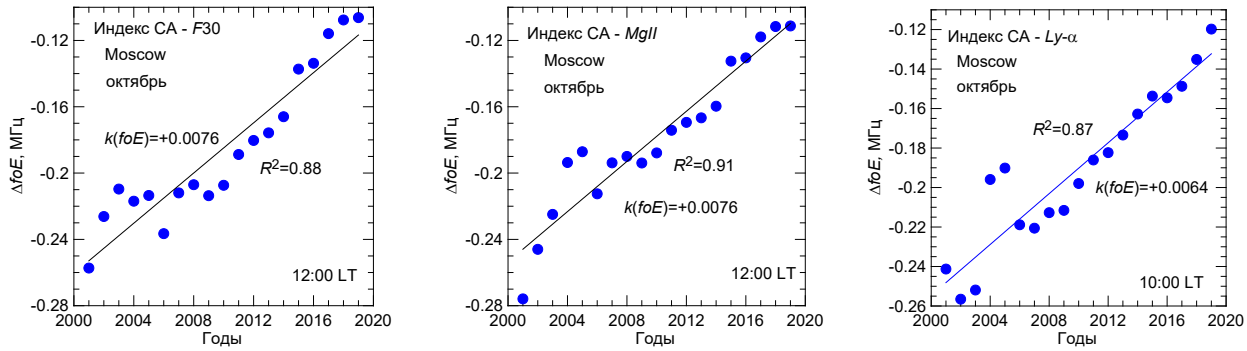

Рис. 8. Примеры роста Δ*foE* со временем для октября

Результаты определения *k*(*foE*) для марта для всех индексов СА и моментов LT приведены в таблице 3.

Как следует из рисунков 6-8 и таблицы 3, результаты для октября близки к таковым для марта. Так же, как и для марта, для октября величины *k*(*foE*), получаемые с использованием различных индексов СА для каждого момента LT, близки между собой. Этот факт подтверждается и достаточно низкими величинами SD при получении средних значений *k*(*foE*).

Так же, как и для марта, для октября получены три вида изменения Δ*foE* со временем: падение, рост и промежуточный тип. Также, как и в марте, в октябре в течение большей части светового дня (10:00-15:00) наблюдается рост Δ*foE* с годами. Но, в отличие от марта, в октябре виден только один переход – от отрицательного тренда утром к положительному тренду днем в 09:00 LT. Вечерний

переход от положительного дневного тренда к отрицательному вечернему не виден – он приходится на период между 15:00 и 16:00 LT.

Таблица 3. Величины $k(foE)$ в МГц/год и R^2 для октября

LT	*F*30		*Ly*α		*Mg*II		Средн	SD
	$k(foE)$	R^2	$k(foE)$	R^2	$k(foE)$	R^2		
08:00	–0.0066	0.88	–0.0052	0.78	–0.0059	0.77	–0.0059	0.0007
09:00	–0.0081	0.87	–0.0065	0.78	–0.0070	0.86	–0.0072	0.0008
	+0.0073	0.92	+0.0042	0.85	+0.0034	0.51		
10:00	+0.0048	0.66	+0.0064	0.87	+0.0055	0.78	+0.0056	0.0008
11:00	+0.0087	0.95	+0.0089	0.91	+0.0072	0.84	+0.0083	0.0009
12:00	+0.0076	0.88	+0.0091	0.96	+0.0076	0.91	+0.0081	0.0008
13:00	+0.0039	0.71	+0.0045	0.91	+0.0059	0.66	+0.0048	0.0010
14:00	+0.0043	0.79	+0.0044	0.91	+0.0048	0.65	+0.0045	0.0003
15:00	+0.0022	0.68	+0.0026	0.48	+0.0022	0.47	+0.0023	0.0002
16:00	–0.0051	0.72	–0.0037	0.80	–0.0047	0.79	–0.0045	0.0007
17:00	–0.0159	0.90	–0.0155	0.88	–0.0165	0.91	–0.0160	0.0005

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, мы получили, что по данным ст. Moscow наблюдаются два основных типа изменения величины Δ*foE* со временем – падение в течение всего анализируемого интервала лет и рост. При этом эти два типа по-разному ведут себя в зимнем месяце январе и в равноденственные месяцы.

В январе с начала светового дня до 13:00 LT наблюдается падение Δ*foE* (что соответствует отрицательному тренду *foE*), которое сменяется ростом Δ*foE* (положительный тренд *foE*), который наблюдается с 14:00 LT до конца светового дня.

В первый период хороша видна тенденция уменьшения магнитуды отрицательного тренда с ростом LT. Во второй период есть тенденция роста магнитуды положительного тренда. Исключение составляет момент 17:00 LT, когда данные уже значительно менее надежны из-за близости этого момента к заходу Солнца. Зависимость $k(foE)$ от местного времени для января и равноденственных месяцев приведена на рисунке 9.

Левый рисунок 9 показывает, что рост $k(foE)$ с LT в январе носит систематический характер, близкий к линейному.

В равноденственные месяцы происходит две смены знака изменения Δ*foE* со временем (см. таблицы 2 и 3). И для марта, и для октября в период около восхода Солнца наблюдается падение Δ*foE* в течение всего интервала лет (отрицательный тренд *foE*). Весь дневной период тренд *foE* положителен, причем видна тенденция (в октябре более четко, в марте менее четко) уменьшения магнитуды тренда с ростом LT.

Для обоих месяцев переход от положительного тренда к отрицательному наблюдается в одно и то же время – в 09:00 LT, что хорошо видно на рисунках 4 и 7. Переход от дневного положительного тренда к отрицательному вечернему также в оба месяца происходит почти в одно и то же время – около 16:00 LT. В марте переход попадает на сам момент 16:00 LT, тогда как в октябре переход происходит между 15:00 и 16:00 LT и падение Δ*foE* в течение всех лет в 15:00 LT сменяется ростом в 16:00 LT.

Зависимость $k(foE)$ от времени суток для равноденственных месяцев приведена на правом рисунке 9. Видно, что принципиальный характер вариаций $k(foE)$ с LT одинаков для обоих месяцев.

Усредненные по околополуденным часам (11:00-13:00 LT) величины $k(foE)$ близки: +0.0074 и +0.0071 МГц в год для марта и октября, соответственно. Поскольку из-за тесной связи с солнечным освещением слой *E* наблюдается методом ВЗ наиболее надежно именно около полудня, можно считать, что основной вывод анализа данных для марта и октября состоит в том, что наблюдается положительный тренд *foE* около 0.007 МГц в год.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Обобщение результатов определения $k(foE)$ для разных станций требует отдельной статьи. Сейчас отметим лишь следующее.

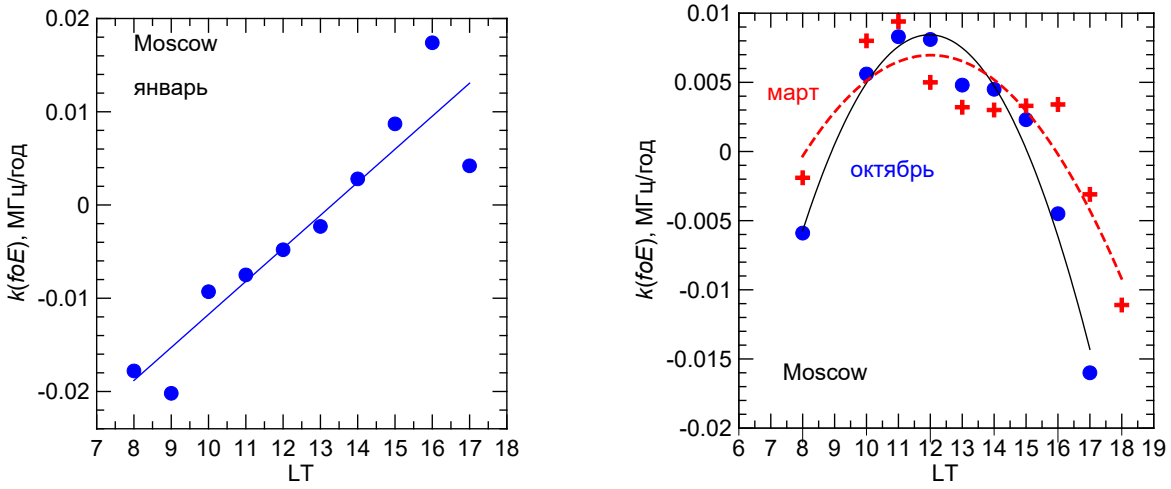

Рис. 9. Зависимость тренда *foE* от местного времени для января и равноденственных месяцев

Анализ данных для трех европейских станций (Slowgh, Juliusruh, и Rome) показал [Данилов и Константинова, 2018а, б; Danilov & Konstantinova, 2019], что наблюдается очень сложная картина изменения трендов *foE*, как с местным временем, так и с сезоном, причем эта картина одинакова для ст. Slough и Juliusruh, но отлична для ст. Rome.

Согласно нашей недавней публикации по данным ст. Sverdlovsk [Данилов и др., 2025б] наблюдаются те же три вида изменений ΔfoE с годами, что получены в данной работе. Так же, как и для ст. Moscow, в течение светового дня наблюдается переход от одного типа к другому.

Обсуждение возможных аэрономических процессов, определяющих тренды *foE*, можно будет провести только при наличии результатов определения этих трендов по современным данным для нескольких станций. Отметим только, что в наших работах 2018-2019 гг. было высказано предположение, что эти тренды связаны с динамическими процессами.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ измерений критической частоты слоя *E* по наблюдениям на ст. Moscow до 2024/2025 г. для зимнего месяца января и двух равноденственных месяцев марта и октября позволил получить картину изменения трендов *foE*, $k(foE)$, с местным временем и сезоном.

Обнаружено три типа изменения с годами величины ΔfoE – рост (что дает положительный тренд *foE*), падение (что дает отрицательный тренд *foE*) и смена знака посреди анализируемого интервала лет (2009–2011 гг.). Картина изменения этих типов от утренних мамонтов LT к вечерним одинакова для обоих равноденственных месяцев – отрицательный тренд в период восхода Солнца, переходный тип вариаций в 09:00 LT, положительный тренд в течение основной части светового дня и переход к отрицательному тренду в период захода Солнца.

По данным обоих равноденственных станций в околополуденные часы (11:00-13:00) наблюдается положительный тренд около 0.007 МГц в год.

Для зимнего месяца января получена другая картина изменения $k(foE)$ – в течение всего освещенного периода суток наблюдается рост $k(foE)$ от примерно -0.02 МГц в год в период восхода Солнца к примерно +0.015 МГц в год в период захода.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов взяты с сайта LISIRD (https://lasp.colorado.edu). Результаты измерений критической частоты *foE* на ст. Moscow были взяты с сайтов Australian Space Weather Forecasting Center (www.sws.bom,gov.au) и ИЗМИРАН (http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_(IZMIRAN)).

ЛИТЕРАТУРА

- *Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н.* Долговременные тренды свойств ионосферы и термосферы средних широт // Доклады. АН, Т. 333, №1, 1993. С. 86-89.
- *Данилов А.Д., Бербенева Н.А.* Статистический анализ зависимости критической частоты *foF*2 от различных индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия, том 63, №5, 2023. С. 610-629. DOI: 10.31857/S0016794023600588.
- *Данилов А.Д., Бербенева Н.А.* Зависимость *foF*2 от индексов солнечной активности по данным ионосферных станций северного и южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия, том. 64, №2, 2024. С. 253-262.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Долговременные тренды критической частоты слоя *E* // Геомагнетизм и аэрономия, том 58, №3, 2018а. С. 653-661.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Дальнейший анализ трендов *foE* на станции Juliusruh // Гелиогеофизические исследования, №19, 2018б. С. 41-46.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В.* Сравнение трендов различных параметров слоя *F*2 // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №5, 2024. С. 721-722.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Тренды критической частоты *foF*2 по данным станций Северного и Южного полушарий // Геомагнетизм и аэрономия, том. 64, №3, 2024а. С. 387-400. DOI: https://doi.org/10.31857/S0016794024030059.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А.* Долговременные тренды высоты максимума ионосферного слоя *F*2 // Геомагнетизм и аэрономия, том 64, №4, 2024б. С. 489-502.
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Рябухин И.А.* Тренды параметров слоя *F*2 по данным ст. Свердловск (Арти) // Геомагнетизм и аэрономия, том 65, №2, 2025а. С. 482-499
- *Данилов А.Д., Константинова А.В., Григорьева С.А.* Эволюция трендов критической частоты слоя *E* по данным ст. Свердловск (Арти) // Гелиогеофизические исследования. №48, 2025б. С. 32-43.
- *Bremer J.* Trends in the thermosphere derived from global ionosonde observations // Adv. Space Res., vol. 28, №7, 2001. P. 997-1006.
- *Bremer J.* Long-term trends in the ionospheric *E* and *F*1 regions // Ann. Geophysicae., vol. 26, №5, 2008. P. 1189-1197.
- *Cnossen I., Emmert J.T. Garcia R.R., Elias A.G., Mlynczak M.G., Zhang Sh.R.* A review of global long–term changes in the mesosphere, thermosphere and ionosphere: a starting point for inclusion in (semi–) empirical models // Adv. Space Res., vol. 74, №11, 2024. P. 5991-6011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.10.005.
- *Danilov A.D., Konstantinova A.V.* Diurnal and seasonal variations in long-term changes in the E-layer critical frequency // Adv. Space Res., vol. 63, 2019. P. 359-370.
- *Elias A. Alberti T., Bravo M. et al.* Long-term trends in the ionospheric equivalent slab thickness: Some evidences by Working Team #1 within IAGA WGII-F // Paper presented at the 12th International Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, 6-10 May 2024, Ourense, Galicia, Spain, 2024.
- *Laštovička J.* Progress in investigating long–term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere // Atmos. Chem. Phys., vol. 23, №10, 2023. P. 5783-5800. DOI: https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

TRENDS IN THE E-LAYER CRITICAL FREQUENCY BASED ON THE MOSCOW STATION DATA

Danilov A. D., Konstantinova A. V., Berbeneva N. A.

Analysis of the long-term trends in the *E*-layer critical frequency, *foE*, based on the vertical sounding observations at Moscow station is performed. The method of trend derivation used by the authors numerously to detect the trends in the parameters of the ionospheric *F*2 layer is used. The method is based on analysis of changes with time in the difference Δ*foE* between the observed and benchmark values of the monthly median of the critical frequency. Two equinoctial months March and October and the winter month January and considered. Three types of changes with time in the Δ*foE* are found: an increase during all analyzed years that provides a positive trend in *foE*, a decrease during all analyzed years that provides a negative trend, and an intermediate type with a change in the sign of the Δ*foE* changes in the middle of the considered period of years. It is shown that the picture of diurnal variations in the *foE* trend is similar for two equinoctial months but differs from that for January.

KEYWORDS: IONOSPHERIC LAYER E, CRITICAL FREQUENCY, LONG-TERM TRENDS.