

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.029

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ В РАЙОНЕ МАГНИТНО-ИОНОСФЕРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ВОЕЙКОВО ПОСРЕДСТВОМ ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА CADI

М.В. Рыбаков

*Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург, Россия*

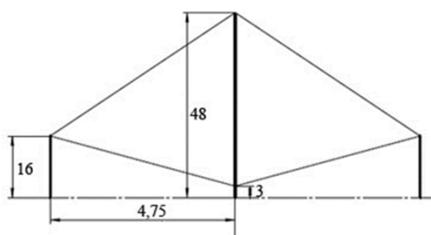
### Аннотация

Рассматривается работа по объединению цифрового ионозонда CADI и теоретической модели UAM в один системный инструмент в магнито-ионосферной обсерватории в Воейково (Санкт-Петербург). Приведены характеристики ионозонда CADI и антенн. Описано программное обеспечение для полуавтоматической обработки данных, получаемых методом вертикального зондирования. Показано использование полученных данных в работах об ионосферных эффектах, стимулированных челябинским метеоритом, в работе о влиянии вариаций электрического поля на состояние ионосферы над обсерваторией Воейково, в работе по сопоставлению рассчитанных по модели UAM и измеренных параметров ионосферы и в работе по оценке влияния перемещения Северного магнитного полюса на ионосферу авроральной и субавроральной зон. Описываются сопоставление реальных данных с прогнозными значениями эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-Plas, а также с рассчитанными по теоретической модели UAM.

Отмечается как важный результат работ с применением данных CADI и с использованием теоретических моделей то, что решена задача объединения современного цифрового ионозонда CADI и самой современной теоретической модели UAM в один системный инструмент, с помощью которого можно выполнять весь цикл исследования, от наблюдения до моделирования и отображения результатов.

### Содержание

В магнито-ионосферной обсерватории в Воейково в 2013 г. был выполнен переход от аналогового ионозонда АИС к цифровому ионозонду CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde). Ионозонд согласован с антенной системой (малыми ромбами) (рис.1), и настроен для получения ионограмм с диапазоном высот 90-510 км без разделения аппаратным способом I и Q компонент.

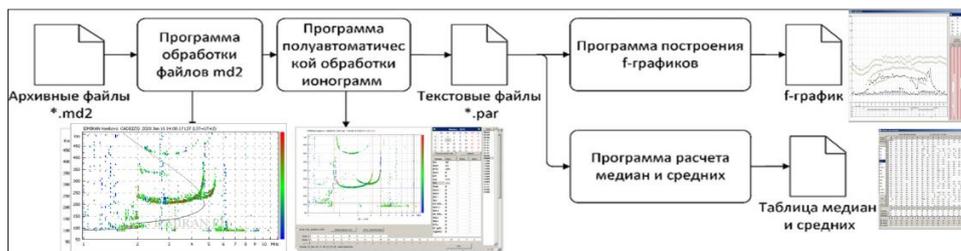


**Рисунок 1.** Передающий и приёмный ромбы перпендикулярны друг другу в вертикальной плоскости. На рисунке малый ромб (метры).

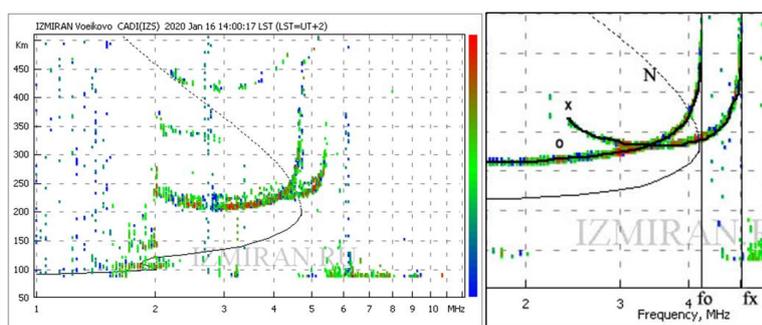
Мощность передатчика CADI 600 Вт, диапазон высот 90-1020 км, диапазон частот 1-20 МГц, разрешение по высоте 6 км. Программное обеспечение (ПО) производителя достаточно для управления ионозондом в режиме зондирования, но для обработки данных ПО устарело (версия 2007 г.). Оно было предназначено для тестирования ионозонда в разных режимах. Поэтому была разработана система программ для обработки данных (рис. 2). После завершения каждого сеанса работы ионозонда данные сохраняются в файле архивного формата. Этот файл обрабатывается программой с отображением ионограммы. Часовые ионограммы выкладываются на сайте ИЗМИРАН. Программа полуавтоматической обработки предназначена для сохранения параметров ионосферы в отдельном файле. По сохраненным параметрам строятся f-графики и рассчитываются медианы и средние по рекомендациям Руководства URSL.

Программа полуавтоматической обработки ионограмм позволяет отобразить данные исходного файла в виде ионограммы, обработать ионограмму в полуавтоматическом режиме, сохранить параметры ионосферы в отдельном файле. Обработка состоит в определении параметров слоёв ионосферы, оценочных и описательных характеристик. В текущей версии программа содержит список из 21-го высотно-частотных параметра слоёв E, Es, F1 и F2. При наведении курсора на ионограмму, в зависимости от выбранного параметра, рассчитывается частота или высота указанной точки. Для фиксирования особенностей ионосферы список параметров оставлен открытым. Буквенные обозначения сведены в три списка – оценочные (10 шт.),

описательные (22 шт.) и типы Es (15 шт.). Обработка, особенно в сложных случаях, зависит от опыта оператора, и задача её автоматизации ещё полностью нигде не решена. Программа может быть дополнена блоками автоматической обработки. При автоматизации обработанные оператором данные являются основой и критерием для проверки работы программных алгоритмов. Программа построения f-графиков позволяет на основе сохранённых параметров одного дня построить f-графики. Программа расчёта медиан и средних на данных за месяц рассчитывает рекомендованные URSI ежечасные медианы и средние значения параметров. Построение профиля электронной концентрации является нетривиальной задачей, особенно в возмущённых условиях. Один из вариантов решения этой задачи есть в наиболее известной модели IRI, где имеется блок построения профиля электронной концентрации на основе параметров ионосферы – максимумов электронной концентрации слоёв и высот максимумов. Этот блок применён автором для автоматического построения на ионограмме профиля (рис. 3) по данным, полученным программой полуавтоматической обработки ионограмм.

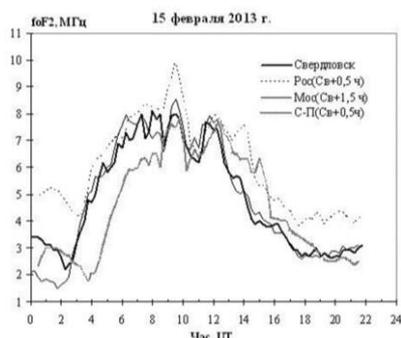


**Рисунок 2.** Система программного обеспечения для обработки данных CADI.



**Рисунок 3.** Профиль  $n_e$  – чёрная сплошная линия N до максимума F2 и далее – пунктирная линия (с применением блока по модели IRI-2012).

Данные CADI, полученные с помощью разработанных программ использовались для работ об ионосферных эффектах, стимулированных челябинским метеоритом (рис. 4).

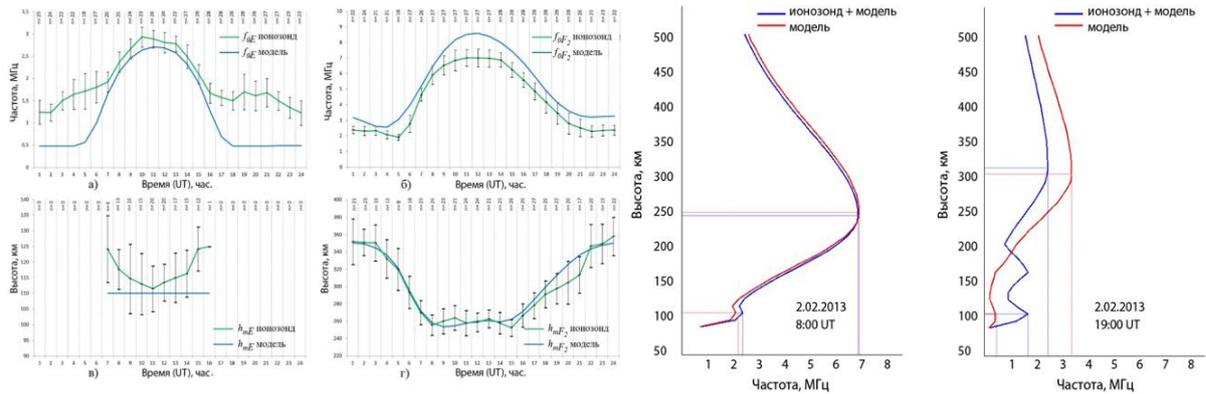


**Рисунок 4.** Ионосферные эффекты, стимулированные челябинским метеоритом [Гвишвили и др., 2013].

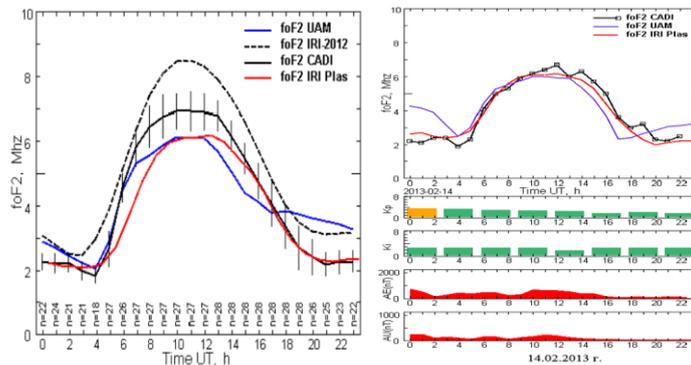
Данные CADI использовались для оценки применимости модели IRI-2012 для автоматизированной обработки ионограмм вертикального зондирования (рис. 5).

В работе о влиянии вариаций электрического поля на состояние ионосферы над обсерваторией Воейково [Рыбаков и др., 2014] были сопоставлены реальные данные с прогнозными значениями эмпирических моделей IRI-2012 и IRI-Plas, а также с рассчитанными по теоретической модели UAM. Значения foF2 находились в диапазоне между значениями по IRI-2012 и IRI-Plas, а также хорошо согласовывались с рассчитанными значениями, за исключением данных измерений, проведенных в вечерние часы (рис.6). Это отличие объясняется большей зависимостью электронной концентрации в максимуме F2-слоя ионосферы от

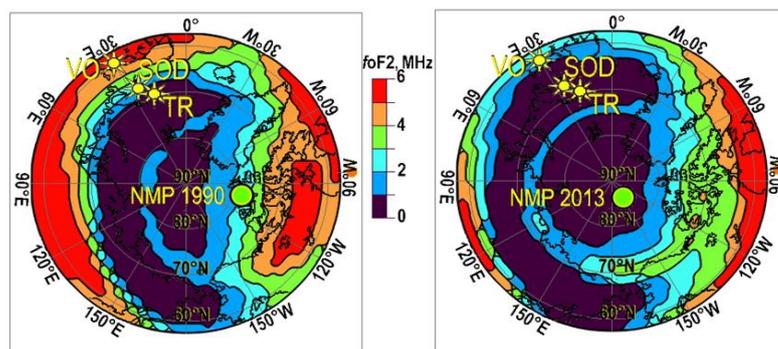
электрических полей и скоростей термосферных ветров в данное время суток. Отмечено, что ионосфера над станцией Воейково ведет себя скорее как типичная субавроральная ионосфера, нежели как среднеширотная.



**Рисунок 5.** Показаны среднемесячные значения и стандартные отклонения ( $\sigma$ ) для параметров foE (а), foF2(б), hmE (в), hmF2 (г), для каждого часа суток, для модели IRI-2012 и данных ионозонда. [Николаева и др., 2014]. Справа показаны результаты сопоставления вертикального распределения частот, рассчитанного по модели IRI-2012 с коррекцией по данным вертикального зондирования (синяя кривая) и без коррекции (красная кривая).



**Рисунок 6.** Измеренные значения критических частот (foF2 CADI), эмпирические данные (foF2 IRI-Plas), рассчитанные значения (foF2 UAM), а также значения индексов  $K_p$ ,  $K_i$ , AE, AU для некоторых дней февраля 2013 г. [Рыбаков и др., 2014].



**Рисунок 7.** Значения критических частот слоя F2, рассчитанные по модели UAM для 5.02.2013 г. ( $K_p \leq 4$ ). Положение Северного магнитного полюса по IGRF – IGRF – зелёный кружок, в 1990 г. (NMP 1990) – левая колонка, и в 2013 г. (NMP 2013) – правая колонка. Отметки VO – обсерватория Воейково, SOD – Sodankylä и TR – Tromsø. Меридиан Солнца указан оранжевым кружком около отметок долгот. 18:00 UT.

В работе [Рыбаков и др., 2016] сопоставлялись измеренные параметры ионосферы для обсерватории Воейково и рассчитанные по модели UAM и, в частности, был сделан вывод о применимости модели версии UAM TM для получения параметров субавроральной ионосферы при отсутствии данных вертикального зондирования. В работе [Rybakov et al., 2019] оценивалось влияние перемещения Северного магнитного

полюса на ионосферу авроральной и субавроральной зон. Результаты показали, что вся структура критических частот слоя F2 северного полушария ( $f_oF2$ ) зависит от дрейфа СМП (рис. 7). Суточные графики  $f_oF2$  были рассчитаны для положений трех обсерваторий. Формы этих графиков наблюдений  $f_oF2$  в 2013 году и графиков для модели IRI-Plas лучше согласуются с графиками, рассчитанными по модели UAM TM для СМП в 2013 году, чем для СМП в 1990 году. Для авроральной зоны значения  $f_oF2$  для СМП в 2013 году получились ниже наблюдаемых, а для субавроральной зоны, при хорошем согласии утром и днем, значения модели  $f_oF2$  ниже вечером и выше ночью. Сделан общий вывод о том, что значительный дрейф СМП за период 1990 – 2013 годов оказал сильное влияние на профили электронных концентрации в северном полушарии. Эффект был особенно очевиден при расчетах для субавроральной зоны вечером и ночью, а в авроральной зоне – днем.

Таким образом, можно сделать **вывод**, что результаты работ с применением данных CADI и с использованием теоретических моделей, показывают, что решена задача объединения современного цифрового ионозонда CADI и самой современной теоретической модели UAM в один системный инструмент, с помощью которого можно выполнять весь цикл исследования, от наблюдения до моделирования и отображения результатов.

## Литература

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Алпатов В.В., Григорьева С.А., Журавлев С.В., Кузнецов В.Д., Кусонски О.А., Лапшин В.Б., Рыбаков М.В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом // *Астрономический Вестник*. 2013. Т. 47. № 4. С. 304–311.
- Николаева В.Д., Рыбаков М.В., Котиков А.Л., Кошелевский В.К. Оценка применимости модели IRI-2012 для автоматизированной обработки ионограмм вертикального зондирования // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. Т. 1. № 89. С. 82–86.
- Рыбаков М.В., Карпов М.И., Намгаладзе А.А. О влиянии вариаций электрического поля на состояние ионосферы над обсерваторией Воейково // *Вестник МГТУ*. 2014. Т. 17. № 2. С. 411–418.
- Рыбаков М.В., Намгаладзе А.А., Карпов М.И. Сопоставление рассчитанных по модели UAM и измеренных параметров ионосферы для обсерватории Воейково // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 4. № 56. С. 1–6.
- Rybakov M.V., Namgaladze A.A., Shapovalova Yu.A., Koshelevsky V.K., Knyazeva M.A. Evaluation of the impact of the North magnetic pole movement on the calculations for the auroral and subauroral ionosphere // *Physics of Auroral Phenomena, Annual Proceedings of the XLII Apatity Seminar, 2019, abstracts book*. Apatity: Polar Geophysical Institute, 2019. С. 51–52.