

УДК 551.510.523

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННОГО ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА CADI

В.М. Выставной, Л.Н. Макарова, А.В. Широчков, Л.В. Егорова

*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, shirmak@aari.ru*

После критического рассмотрения возможностей существующих в настоящее время отечественных и зарубежных цифровых ионозондов, в ААНИИ для мониторинга ионосферы высоких широт был выбран канадский ионозонд CADI. Успешная эксплуатация ионозонда CADI на российских высокоширотных станциях в течение длительного времени показала целесообразность сделанного выбора. В данной статье подробно описываются технические, эксплуатационные и оперативные особенности ионозонда CADI.

Ключевые слова: мониторинг, ионосфера, зондирование, интерпретация ионограмм, антенна

ВВЕДЕНИЕ

Вертикальный ионозонд по-прежнему является наиболее универсальным техническим средством, дающим необходимую информацию о состоянии ионосферы. Последние годы ознаменовались значительным прогрессом в развитии технических и управляющих программных средств современных ионозондов. Однако, фундаментальные различия в природе, динамике и механизмах воздействия внешних факторов на параметры высокоширотной, среднеширотной и экваториальной ионосферы диктуют необходимость учитывать эти особенности в типах ионозондов, используемых в различных широтных зонах.

На протяжении нескольких десятилетий исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования наиболее интенсивно развивались в России (СССР) и в Канаде. Канадские ученые используют для ионосферных исследований ионозонд CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde), технические и операционные параметры которого учитывают кли-

матические и логистические особенности эксплуатации сложной цифровой техники в удаленных пунктах полярных областей [1]. В частности, имеются сведения о случаях автономной работы CADI на протяжении трех суток. По нашим оценкам, ионозонд CADI обладает оптимальной величиной отношения качество/цена по сравнению с другими типами аналоговых приборов, что и предопределило выбор ААНИИ в пользу ионозонда CADI как основного сетевого технического средства для осуществления мониторинга состояния высокоширотной ионосферы.

Проблема выбора цифрового ионозонда для сети станций авроральной зоны российской Арктики возникла в 2004 году после принятия решения о реанимации ионосферных наблюдений. Выбранный ААНИИ ионозонд CADI отвечает всем основным критериям сетевого ионозонда для мониторинга состояния ионосферы в высоких широтах.

Ниже будет показано, что CADI соответствует данным критериям.

CADI КАК ОПТИМАЛЬНЫЙ СЕТЕВОЙ ИОНОЗОНД ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Основным критерием сетевого ионозонда, работающего в высоких широтах, является его надежность и простота обслуживания. Эти качества CADI были подтверждены многолетней эксплуатацией ионозонда в труднодоступных

районах Канадской Арктики. В таблице 1 приводится список действующих высокоширотных канадских станций, находящихся в эксплуатации больше 10 лет. Это обстоятельство послужило важным аргументом в пользу выбора CADI как оптимального сетевого ионозонда для работы в российской Арктике, где до сих пор условия эксплуатации сложной наблюдательской технике являются затруднительными.

Таблица 1. Станции в Канаде, где проводятся наблюдения по вертикальному зондированию в настоящее время с использованием ионозонда CADI

Название станции	Широта (°E)	Долгота (°N)	Аппаратура	Доступность данных
Юрека	79.99	274.1	CADI	2-месяца задержки
Резольют	74.75	265	CADI	реальное время
Поинт Инлет	72.69	282.04	CADI	реальное время
Кембридж Бэй	69.12	254.97	CADI	реальное время
Хэл Бич	68.78	278.74	CADI	реальное время
Икалют	63.73	291.46	CADI	реальное время

Другие критерии, которым должен отвечать сетевой высокоширотный ионозонд:

- иметь возможность работы в автономном режиме несколько суток;
- потреблять малую мощность и быть простым в обслуживании;
- быть совместимым в работе с разными типами PC;
- иметь возможность подключения к системе данных в режиме on-line;
- иметь широкие операционные возможности (несколько режимов зондирования).

Эти критерии обеспечиваются следующими техническими характеристиками ионозонда CADI:

- импульсная мощность – 600 Вт;
- диапазон частот – 1-20 МГц;
- сканирование частот – различное (линейное, логарифмическое и т.д.);
- диапазон высот– 90-1024 км;
- высотное разрешение – 1км;
- импульсное кодирование – 13 Бит код Баркера;
- хранение, получаемой информации – CD;
- потребляемая ионозондом мощность – сеть 110-220 В, 50-60 Гц, 100 ВА;
- компьютер – IBM компьютер;
- имеется возможность работы в автономном режиме до 3 суток;

- возможность синхронного приема сигнала на 4 приемника;
- возможности подключения к системе передачи данных в режиме on-line;
- сравнительная стоимость: невысокая цена и хорошее качество ионограмм.

Важнейшим условием успешной эксплуатации любого ионозонда является наличие высокоэффективной и легко возводимой антенно-фидерной системы. Сотрудники ААНИИ выбрали оптимальный уже доказал свою эффективность при длительной эксплуатации.

На рисунке 1 показана антенная система ионозонда CADI, установленная на станции Диксон.

На рисунке 2 показан внешний вид комплекта ионозонда CADI на станции Салехард. На рисунке изображен блок приемника, блок управления и персональный компьютер, управляющий работой ионозонда. Следует особо подчеркнуть, что ионозонд CADI совместим с любым типом IBM компьютера, что является большим преимуществом этого типа ионозонда.

На следующем рисунке 3 показан экран компьютера, на котором можно видеть текущую ионограмму и ионограмму за предыдущий срок. Такая схема работы позволяет оператору вернее оценить геофизическую ситуацию в ионосфере и более корректно считывать ионосферные пара-

метры, необходимые для составления телеграммы кодом ИОНКА.

Авроральная ионосфера характеризуется большой изменчивостью и разнообразием структурных особенностей распределения электронной концентрации на всех высотах. В качестве примера ниже приводятся ионограммы, которые получены на отечественных высокоширотных станциях. На рисунке 4 показаны ионограммы, которые были получены на станции Диксон летом 2011 года (левая часть рисунка) и на станции Ловозеро зимой 2013 года (правая часть рисунка). Из рисунка можно видеть большие различия летних и зимних ионограмм. Летние ионограммы характеризуются регулярным типом отражений от ионосферы, тогда как для зимних ионограмм типично наличие диффузных отражений, которые затрудняют обработку ионограмм.

Другим примером диффузных ионограмм, полученных в зимний период является ионосферные отражения, представленные на рис. 5. Кроме того, ионограмма станции Ловозеро демонстрирует наличие плоского спорадического слоя E_s с большой критической частотой. Другой структурной особенностью авроральной ионосферы является низкая высота максимума ионизации слоя F_2 (примерно 200 км). Рисунок 6 показывает, что эта особенность авроральной ионосферы может наблюдаться одновременно на нескольких станциях. Примером таких отражений являются ионограммы на станциях Салехард и Ловозеро, полученных 06.01.2013 в 10.57 UT.

Накопленный нами экспериментальный материал позволяет выявить и другие особенности авроральной ионосферы, наблюдаемые одновременно на нескольких станциях.

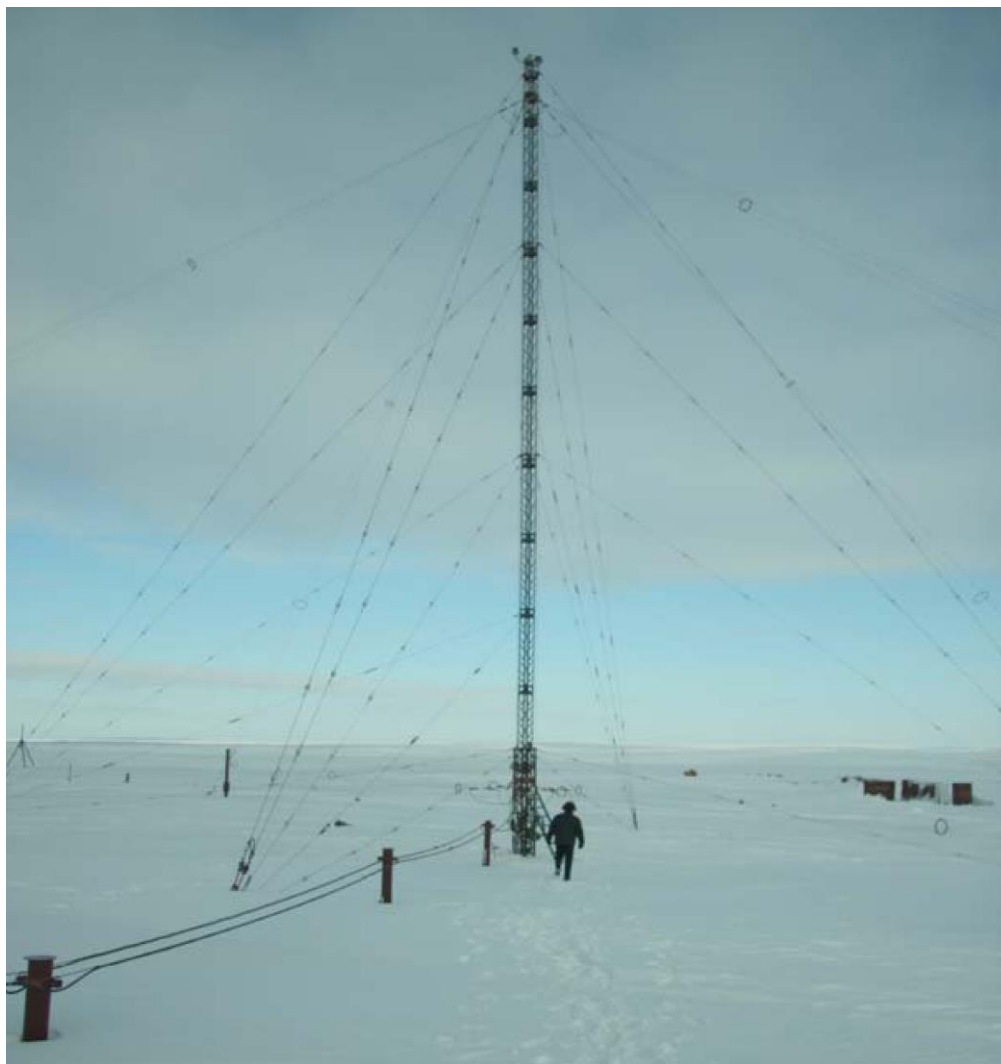


Рис. 1. Антенная система ионозонда CADI, станция Диксон



Рис. 2. Рабочее расположение элементов ионозонда CADI на ионосферной станции «Салехард»

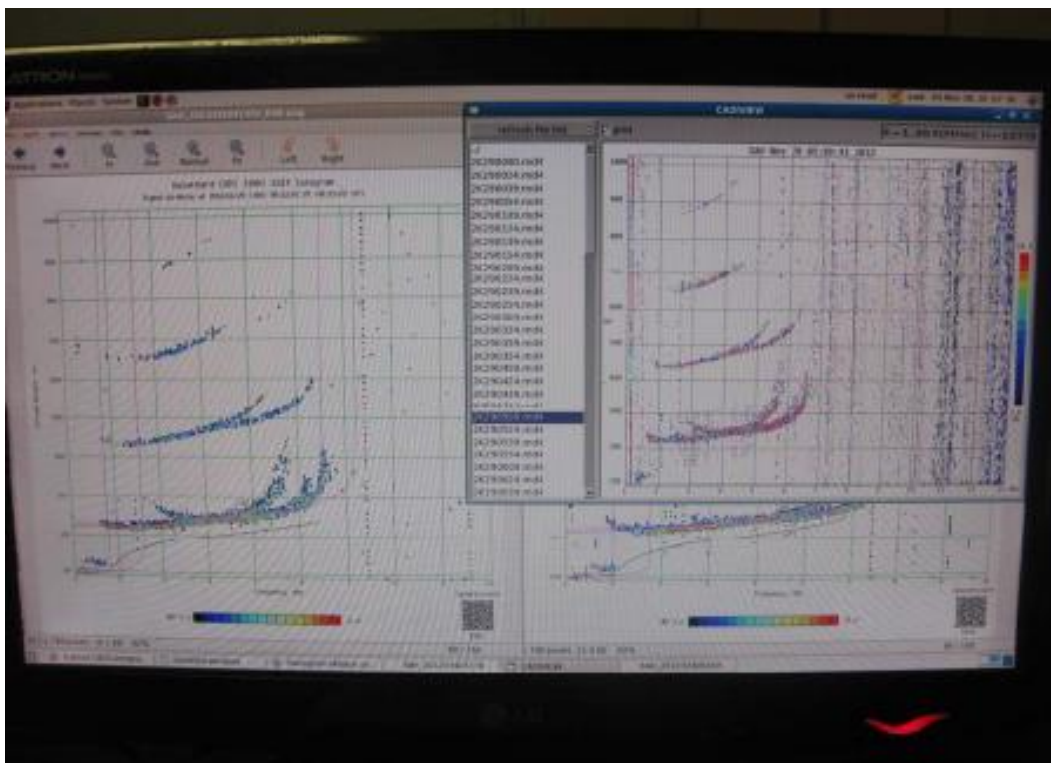


Рис. 3. Экран монитора ионозонда CADI

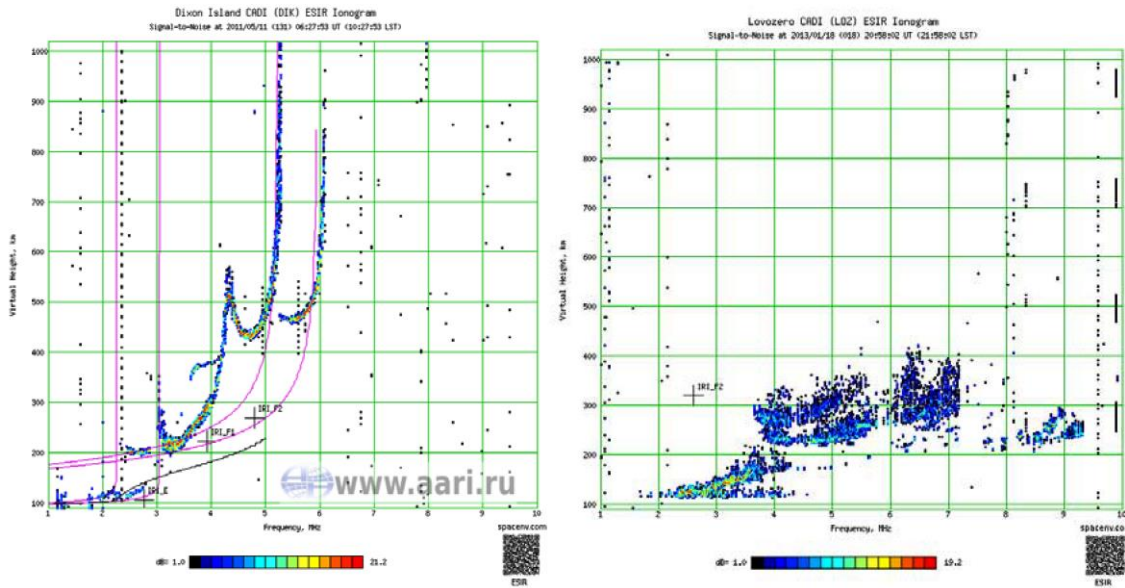


Рис. 4. Ионogramмы, полученные на станциях Диксон – лето 2011 года (слева) и Ловозеро – зима 2013 года (справа)

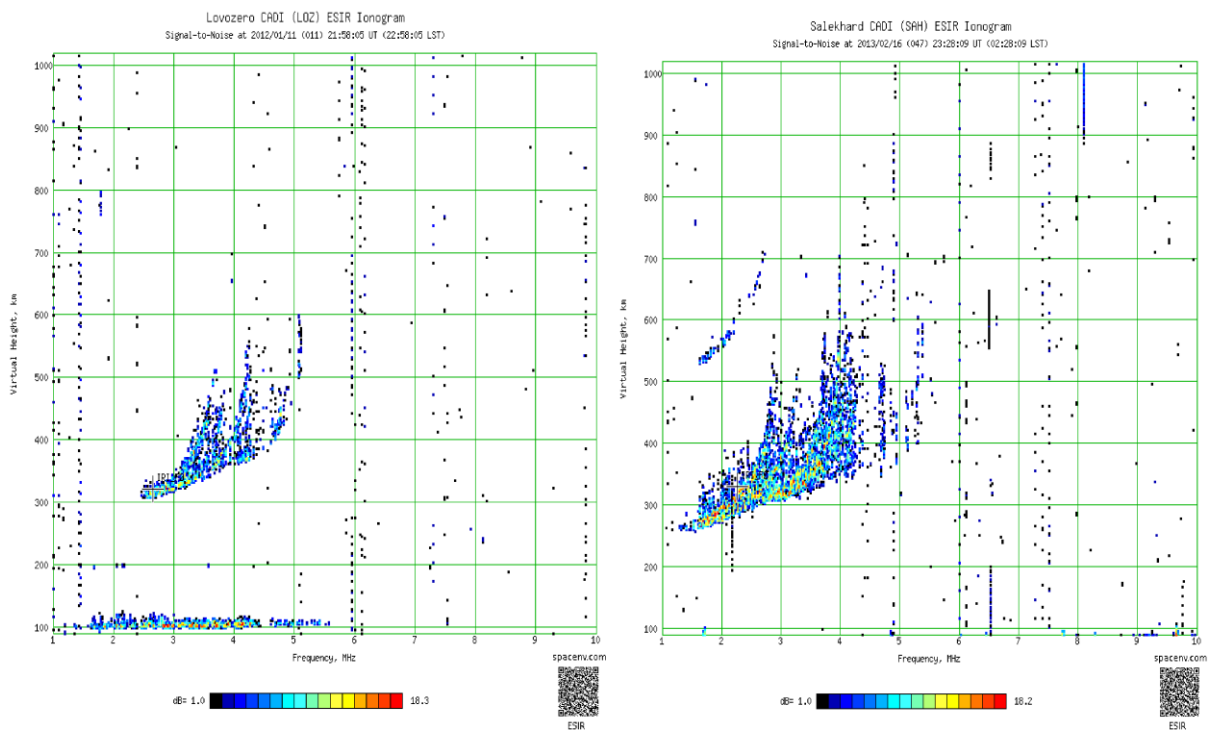


Рис. 5. Диффузные ионogramмы, полученные на станциях Ловозеро 11.01.2012 (слева) и Салехард 16.02.2013 (справа)

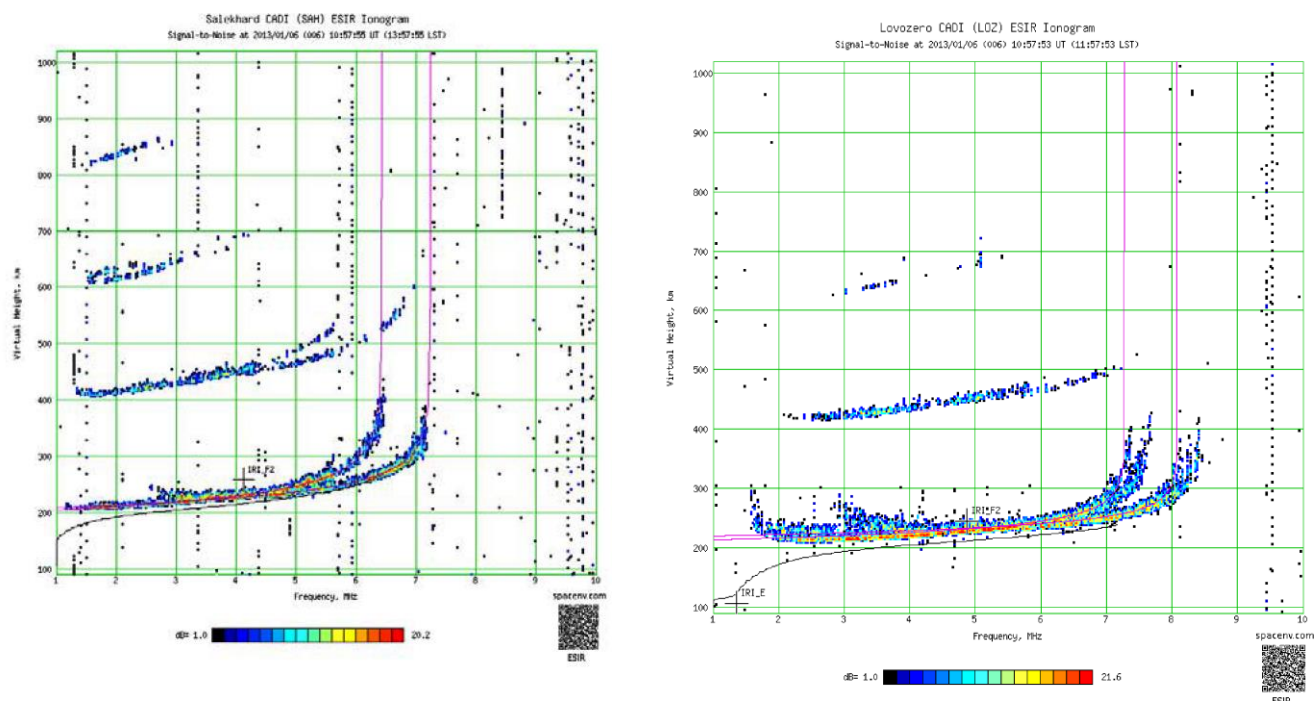


Рис. 6. Ионограммы станций Салехард (слева) и Ловозеро (справа) 06.01.2013 в 10.57 UT, показывающие низкую высоту максимума ионизации F2 слоя, типичные для зимнего периода авроральной ионосферы, полученные на арктической сети ААНИИ ионозондом CADI.

В таблице 2 представлен список действующих и проектируемых (обозначенных звездочкой) пунктов размещения ионозондов CADI в российском секторе Арктики.

Пользователям ионосферной информации, кроме ионограмм, получаемых в режиме on-line и хранимых на сервере геофизического центра

ААНИИ, предлагается табличные формы с текущими значениями параметрами ионосферы. Примером такой информации является табл. 3, где представлена суточная сводка ионосферных параметров, полученных на станции Ловозеро 30 июня 2013 года.

Таблица 2. Список действующих и проектируемых (обозначенных звездочкой) пунктов размещения ионозондов CADI в российском секторе Арктики.

№ п/п	Станция	CGM широта	CGM долгота	Географическая широта	Географическая долгота
1	о.Хейса*	74,9°	144,12°	80,6°	58,05°
2	Баренцбург*	74,8°	113,13°	78,1°	14,3°
3	Диксон	67,98°	155,73°	73,55	80,57
4	Певек*	65,4°	227,11°	70,8°	170,9°
5	Амдерма	64,6°	138,05°	69,8°	60,7°
6	Ловозеро	64,12°	114,9°	67,97°	35,08°
7	Салехард	61,62°	141,35°	66,53°	66,53°
8	Горьковская	55,82°	107,43°	59,57°	30,19°

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОГРАММ

Разработчики современных цифровых ионозондов декларируют, что их изделия оснащены системой автоматической обработки ионограмм [2]. Однако, детальное изучение авроральных ионограмм, полученных, например, ионозондом DPS4 и установленным в Тромсё, Норвегия, показал, что, некоторые ионограммы не поддаются интерпретации в автоматическом режиме. Ниже приводятся примеры ионограмм в Тромсё, которые демонстрируют полное отсутствие автоматической обработки данных (рис. 7). Очевидно

что, определенные структурные особенности авроральной ионосферы (диффузность, кратные отражения, высокая спорадическая ионизация в E слое и т.д.) не позволяют осуществлять автоматическую обработку ионограмм.

Операционная система ионозонда CADi не позволяет производить полную автоматическую обработку данных вследствие тех же причин. Неэффективность автоматической обработки в цифровых ионозондах в авроральных широтах может быть на данном этапе компенсирована автоматизированной обработкой ионограмм с использованием результатов, получаемых для формирования телеграмм «ИОНКА».

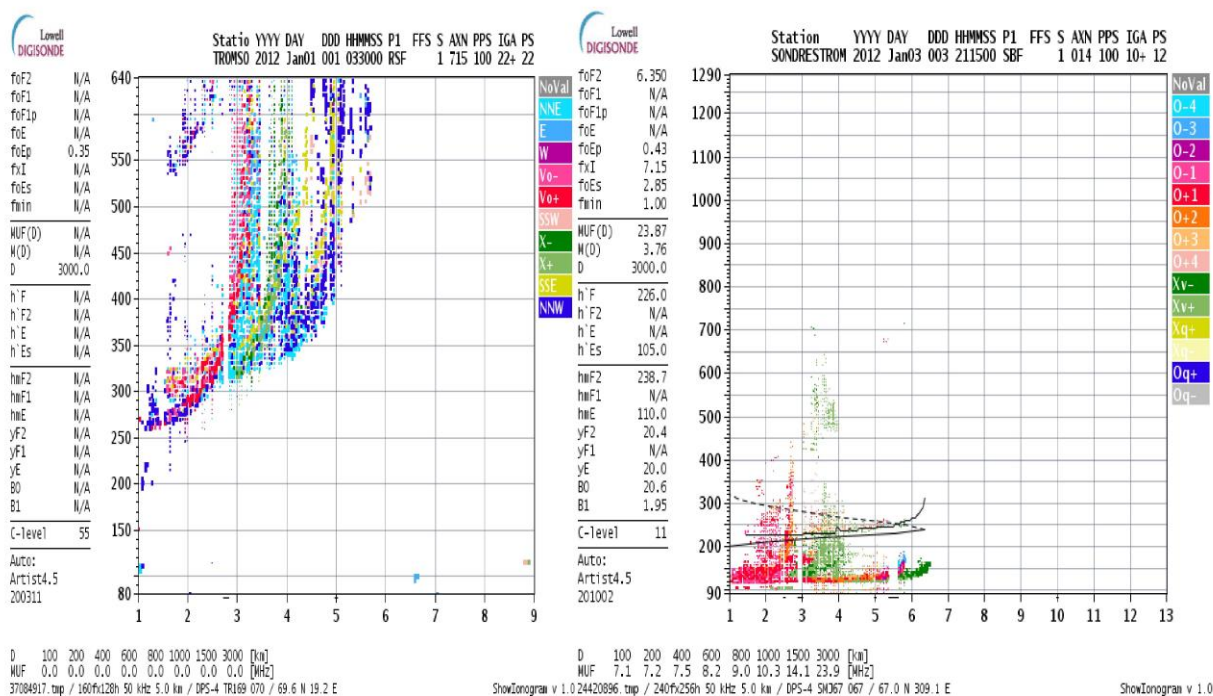


Рис. 7. Ионограммы ионозонда DPS (Тромсё, Норвегия), показывающие отсутствие результатов автоматической обработки.

Таблица 4. Координаты арктических станций ВЗ, дигизонд Рейниша (DPS-4)

№ п/п	Станция	СГМ широта	СГМ долгота	Географическая широта	Географическая долгота
1	Сондерстром °	74,51°	42,8°	66,98°	309,06°
2	Тромсё	66,57°	103,47°	69,6°	19,2°
3	Норильск	58,71°	165,7°	69,2°	88,26°
4	Якутск	50,99°	194,1°	62°	129,6°

Результаты сравнения автоматической и автоматизированной обработки ионограмм с использованием кодов ИОНКИ представлены диаграммой на рис. 8.

Представленная диаграмма показывает, что существующие в настоящее время программы ав-

томатической обработки ионограмм дают в высоких широтах, в среднем, только 20% правильных результатов зимой и 65 % - летом, тогда как автоматизированная обработка ионограмм с использованием кодов ИОНКИ дает более высокие результаты: 80 % - зимой и > 90 % летом.

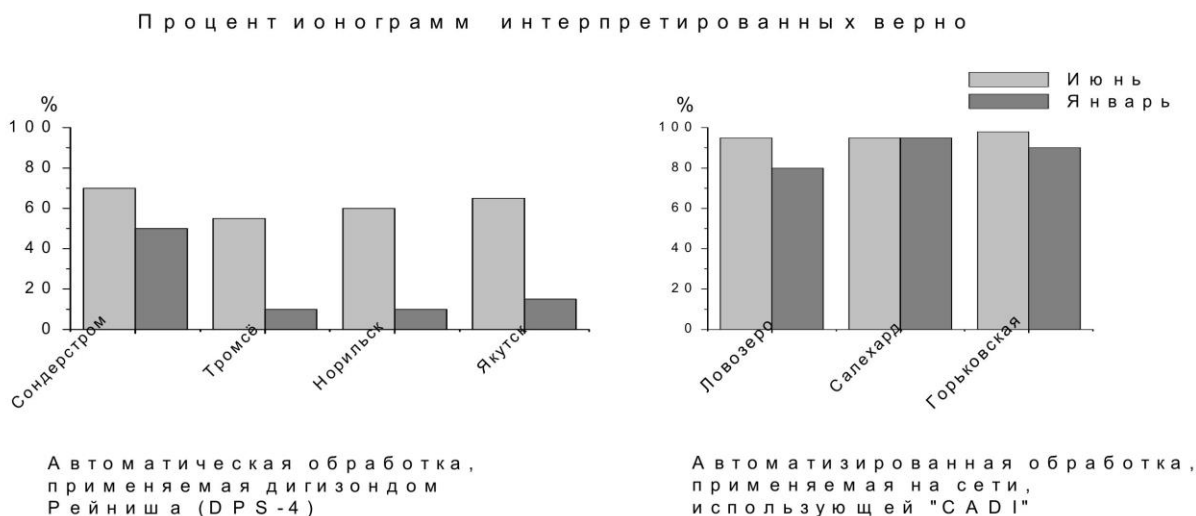


Рисунок 8. Результаты сравнения автоматической и автоматизированной обработки ионограмм с использованием кодов ИОНКА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжительный опыт успешной эксплуатации ионозонда CADI в условиях полярных широт, включая его работу в Российской Арктике, показал полное соответствие получаемых ионограмм техническим и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к сетевому ионозонду, предназначенному для непрерывного мониторинга геофизической обстановки в высоких широтах. Особо следует отметить возможность работы CADI в автономном режиме в течение нескольких суток.

Специалистами ААНИИ разработаны и введены в эксплуатацию технические средства, позволя-

ющие осуществлять бесперебойную передачу данных зондирования в Центр геофизических данных ААНИИ в режиме реального времени. Для составления суточных таблиц основных параметров ионосферы разработана система автоматизированной обработки ионограмм в авроральных широтах с использованием данных кода ИОНКИ.

Данные результатов радиозондирования ионосферы установками CADI (ионограммы и суточные таблицы) размещены на веб-сайте ААНИИ и доступны любому потребителю.

INVESTIGATIONS OF THE HIGH – LATITUDE IONOSPHERE BY USING DATA OF THE MODERN DIGITAL VERTICAL IONOSONDE CADI

V.M. Vystavnoy, L.N. Makarova, A.V. Shirochkov, L.V. Egorova

Detailed survey of the available digital vertical ionosondes produced by the foreign and Russian companies capable to accomplish effective permanent monitoring of the polar ionosphere condition made by the AARI scientists allowed them to choose for that purpose Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI). Successful performance of the CADI at the Russian high-latitude stations during a couple of years proved expedience of this choice. The technical and operational details of the CADI are described in this paper.

KEYWORDS: MONITORING, IONOSPHERE, SENSING, VERTICAL SOUNDING, INTERPRETATION OF THE IONOGRAMS, ANTENNA

ЛИТЕРАТУРА

1. J.W. MacDougall, I.F. Grant, X. Shen. The Canadian advanced digital ionosonde: design and results. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-104, Boulder, Colorado, USA, 1995, pp.21-27.
2. B. Reinisch. The digisonde 256 system and Ionospheric Research. Bulletin INAG, Boulder, Colorado, USA, August 1986, pp. 13-19.