

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>

УДК: 621.3.09

## АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОЛИНИЙ

А.О. Щирый

АО «НПК «НИИДАР», 127083, Москва, ул. 8 Марта, д.10, стр.1

Статья поступила в редакцию 6 июля 2022 г.

**Аннотация.** В статье представлены основные архитектурные принципы и технические решения, принятые автором при разработке программной части аппаратно-программного комплекса оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний, осуществляемой, главным образом, посредством дистанционного наземного радиозондирования. Приведено краткое описание методик измерений (разработанных, в том числе, при непосредственном участии автора) и измерительной аппаратуры. Решены задачи автоматизации самого процесса измерений и регистрации данных, позволяющих организовать работу комплекса по заданному расписанию без непосредственного участия человека. Также решены задачи извлечения информации из полученных экспериментальных данных радиозондирования и диагностики ионосферы, включая возможности работы с иерархией экспериментальных данных, в т.ч. возможности регенерации производных данных, просмотра имеющихся данных, а также возможности пакетной обработки больших массивов данных для исследования их статистических характеристик. Рассмотрена организация обработки при сборе статистики вариаций межмодовых задержек (разностей времен группового запаздывания различных мод распространения коротких волн), амплитудно-частотных характеристик многолучевых коротковолновых

радиолиний, а также классификации этих данных по т.н. эмпирическим моделям многолучевости; приведены примеры результатов. Показаны перспективы и предварительные результаты применения достижений теории обучения машин для решения задач автоматизации извлечения информации из данных радиозондирования; описано средство разметки данных для формирования обучающих выборок. Направлениями дальнейших исследований являются выбор метрик качества и оптимальных архитектур глубоких нейронных сетей, а также развитие средств разметки, включая средства перекрестного контроля за результатами разметки.

**Ключевые слова:** ионосфера, радиозондирование ионосферы, ионограммы, обработка ионограмм, многолучевое распространение коротких радиоволн, амплитудно-частотные характеристики многолучевых радиолиний, автоматизация измерений.

**Автор для переписки:** Щирый Андрей Олегович, [andreyschiriy@gmail.com](mailto:andreyschiriy@gmail.com)

## **Введение**

По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми (КВ) сигналами можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, о ее структуре и состоянии [1-5]. Данные радиозондирования ионосферы также крайне важны для систем КВ связи и загоризонтной (ЗГ) радиолокации [2,3]. Работа этих радиотехнических систем (РТС) основана на способности КВ сигналов многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация к ионосферным условиям, для чего в составе этих РТС содержится система частотного обеспечения, включающая аппаратуру радиозондирования ионосферы и анализатор загруженности радиоканала. При этом возможна адаптация РТС КВ диапазона по рабочей частоте, мощности излучения, скорости передачи информации. Также и наземная инфраструктура ГЛОНАСС включает в себя средства автоматической диагностики состояния ионосферы.

Наиболее предпочтительным является выбор линейно-частотно модулированного (ЛЧМ) сигнала в качестве зондирующего [1,4,5]. Разработанная в том числе при непосредственном участии автора, аппаратура комплекса диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний [5] позволяет осуществлять измерения в режимах наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) [1,4,5], вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) [1] и панорамного измерения помех КВ диапазона [5].

В статье представлены результаты многолетних работ автора по автоматизации процессов измерений и обработки данных диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний [4-19]. Этой тематикой, разумеется, занимались также другие разработчики и исследователи (см. например [22-28]), однако по степени комплексности и охвату измерительных методик и алгоритмов обработки данных полных аналогов нет, тем более что часть работ [25,26] посвящена вопросам только вертикального зондирования (которое значительно проще и в аппаратной реализации, и при обработке и интерпретации результатов). Задачи обработки ионограмм НЗИ если и решаются, то делается это на основе метода трафаретных масок [24,28], 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 алгоритмами; такой метод обладает рядом недостатков: применяемые математические модели зачастую не обеспечивают приемлемую точность, особенно в условиях геомагнитных и солнечных возмущений, особенно в верхних широтах; также при таком подходе невозможно выделение сигнальных компонент аномальных мод распространения. Либо применяются еще более примитивные пороговые методы [22], существенно зависящие от отношения сигнал/шум (или «качества ионограммы», другими словами).

Поэтому значительно более удачными стоит признать методы, основанные на статистических критериях обнаружения резко выделяющихся значений

выборки (т.н. «грубых промахов») [29-31]; однако статистические характеристики сигнала в случае пересечения треков сигнала с сосредоточенными помехами, и в случае диффузности (размытости) сигнала существенно отличаются от характеристик сигнала сильных мод, что может приводить к ошибкам; также не используется информация о протяженной по частоте зондирования структуре трека (из-за обработки ионограммы блоками, равными одной вертикальной линии ионограммы). Также ни в одной из перечисленных работ-аналогов не реализуется измерение помех в сеансах между радиозондированиями, а также не извлекается информация о помехах из самих данных самих сеансов радиозондирования (из ионограмм).

## **1. Методики измерений и аппаратура комплекса**

Приведем краткое описание методик измерений (разработанных, в том числе, при непосредственном участии автора) и измерительной аппаратуры.

### **1.1. Методики измерений**

Основная идея НЗИ заключается в следующем [1,4,5]. При НЗИ передатчик излучает непрерывный ЛЧМ сигнал (т.е. как следствие частота линейно зависит от времени) во всем КВ диапазоне (например, от 2 до 30 МГц). Сигнал распространяется в ионосферной радиолинии и поступает на вход приемника. При НЗИ расстояние между приемником и передатчиком обычно составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров, поэтому время распространения меняется от единиц до десятков миллисекунд. Обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области состоит в умножении его на сигнал гетеродина приемника, комплексно-сопряженный излучаемому сигналу; после чего происходит прохождение сигнала через фильтр нижних частот, оцифровка «разностного сигнала» (термин получается вследствие перемножения на сигнал гетеродина), и спектральный анализ. Из-за частотной дисперсии волны разной частоты после прохождения ионосферной радиолинии имеют разные коэффициенты отражения и время фазового запаздывания.

Результатом работы наклонного ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимости времени группового запаздывания и амплитуды каждой моды распространения от частоты излучения (см. рис. 1).

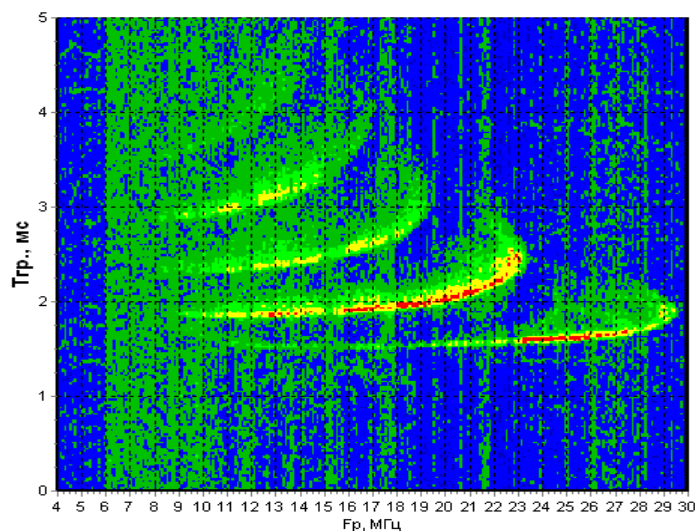


Рис. 1. Пример ионограммы наклонного зондирования ионосферы

Режим ВЗИ отличается тем, что приемник и передатчик находятся, в общем, в одном пункте. Ионограмма ВЗИ имеет иной физический смысл. Имеется задача коммутации антенн (в случае полного, а не «квази» однопозиционного приема). Однако сбор и накопление данных во многом подобны режиму НЗИ, хотя в части вторичной обработки, а уж тем более интерпретации результатов есть своя специфика.

В измерительном комплексе предусмотрен режим калибровки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) радиоприемного устройства (РПУ). В этом режиме на вход РПУ подается гармонический сигнал известного уровня и частоты; в файле сохраняется частотно-зависимый коэффициент усиления РПУ (отношение уровня выходного сигнала к уровню эталонного сигнала), используемый для коррекции АЧХ РПУ на этой частоте. Процедура повторяется для заданного частотного диапазона с заданным шагом.

С учетом последующей обработки, по данным НЗИ одновременно измеряются характеристики и сигнала, и помех [5], в частности могут быть выделены и исследованы сосредоточенные помехи (помехи от работающих радиостанций) [5,9] – доминирующий вид помех почти во всем диапазоне [32].

Однако, если исследователя подробно интересуют характеристики только помех, то целесообразно разработать специальный алгоритм измерения помех не в режиме ЛЧМ, а в режиме обычного классического приема. Поэтому разработан гибко перестраиваемый алгоритм измерения панорамы спектра помех ДКМ диапазона, позволяющий в широких пределах варьировать параметры обработки, благодаря чему может быть использован как для изучения «мгновенной» тонкой структуры помех, так и для исследования вариаций характеристик помех всего ДКМ диапазона на основе сбора обширной статистики [5,12]. Основная идея алгоритма заключается в том, что последовательно с заданным шагом происходит перестройка РПУ в заданном диапазоне, РПУ «стоит» на текущей частоте заданное время, данные с низкочастотного выхода РПУ оцифровываются, над ними выполняется БПФ. Полученные спектры, выстроенные последовательно, в общем, и представляют собой панораму спектра помех.

Из полученной панорамы спектра помех возможно выделение фонового шума. Здесь под фоновым шумом [32] понимается шум природного происхождения с медленно меняющимися характеристиками, т.е. без атмосферных импульсных, стационарных и промышленных помех, другими словами под фоновым шумом понимается сумма помех – шумов (атмосферный, флуктуационный, тепловой, галактический шумы), уровни которых на порядки меньше уровней (и медленнее меняются во времени) мощных помех природного (атмосферный импульсный шум – ближние грозы) и антропогенного (стационарные и промышленные помехи) происхождения. Вообще, измерение фонового шума – отдельное направление, важное для геофизики. Применяемая методика основана на гипотезе, что минимальный уровень помех в диапазоне определяется фоновым шумом (что, конечно, не будет соответствовать действительности для диапазона, полностью забитого помехами «не-фоновых» видов). Для оценки уровня фонового шума по панораме спектра помех на выбранной частоте в заданном частотном интервале (10 кГц – 1 МГц)

выбираются частотные элементы с минимальным уровнем помехи, который принимается за уровень фонового шума на этом интервале.

Подчеркнем, что методика [5,9] позволяет извлекать информацию о стационарных помехах из данных радиозондирования ионосферы ЛЧМ сигналами, таким образом могут быть одновременно измерены характеристики и сигнала, и помех. В то время как методика [5,12] представляет собой универсальную гибко перестраиваемую методику измерения панорам спектра помех различных видов, её гибкость заключается в возможностях широкого варьирования параметров измерений помех (в то время как, в первой методике гибкости меньше, поскольку параметры измерений привязаны к параметрам сеансов зондирования, хотя при вторичной обработке оцифрованный сигнал, конечно, может быть обработан с разными параметрами, например блоками разного размера и с разным частотным разрешением).

Можно задать расписание автоматической работы измерительного комплекса таким образом, чтобы между сеансами радиозондирования проводилось измерение помех. Полученные данные могут не только дополнять «картину» обстановки радиолинии, но и в режиме реального времени использоваться для корректировки расписания, например реализуя радиозондирование только в незанятых помехах поддиапазонах [5].

## **1.2. Аппаратура комплекса**

Общая структурная схема комплекса диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний представлена на рис. 2. Он состоит из трех взаимосвязанных частей: радиоприемного комплекса (РПК), радиопередающего комплекса (РПДК) и ПЭВМ управления и обработки.

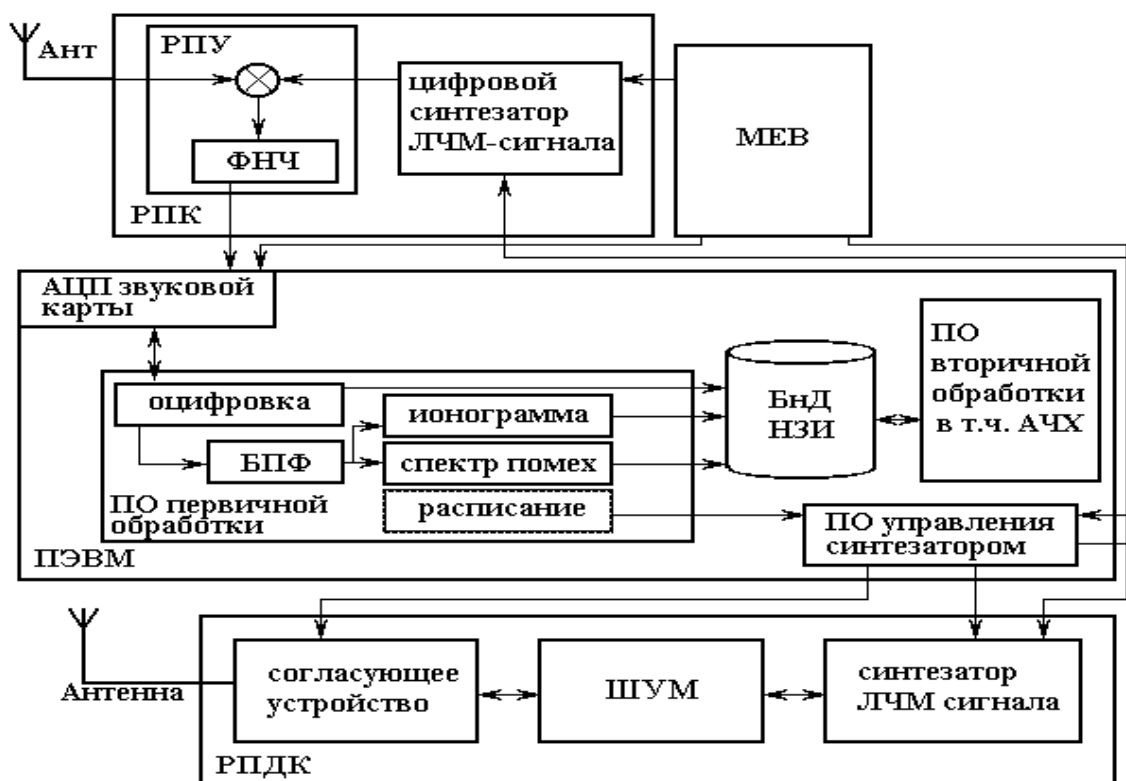


Рис. 2. Аппаратура комплекса диагностики ионосферы

РПДК используется в режиме передачи диагностирующего сигнала и служит для формирования диагностирующего непрерывного ЛЧМ сигнала, его усилении по мощности и излучения в пространство. В состав РПДК входят:

- синтезатор непрерывного ЛЧМ сигнала;
- широкополосный усилитель мощности (ШУМ);
- согласующее устройство (СУ);
- передающая антенна.

РПК используется в приемном режиме, и служит для приема, корреляционной обработки, и демодуляции диагностирующего сигнала.

В состав РПК входят:

- синтезатор непрерывного ЛЧМ сигнала;
- радиоприемное устройство (РПУ);
- приемная антенна.

ПЭВМ управляет работой всех технических средств комплекса диагностики в режимах приема и передачи диагностирующего сигнала, а также обрабатывает результаты диагностики радиолиний. В ПЭВМ установлено



программное обеспечение (ПО) управления синтезатором ЛЧМ сигнала РПК и РПДК, построения ионограмм, их обработки и занесения в банк данных (БнД); ПО вторичной обработки. В ПЭВМ находится также модуль единого времени (МЕВ), являющийся источником точного времени.

Кроме того, в состав диагностирующего комплекса входит опорный генератор, формирующий высокостабильный опорный сигнал заданной частоты. Этот сигнал используется для формирования когерентных ЛЧМ сигналов. Также этот сигнал поступает в МЕВ для формирования импульса запуска аппаратуры в режиме диагностики и тактовых последовательностей управления электронными часами.

Рассмотрим функционирование технических средств в режиме излучения диагностирующего ЛЧМ сигнала. В этом режиме оператор в программе управления синтезатором задает параметры диагностирующего сигнала и время начала его излучения. Эти данные поступают от ПЭВМ в синтезатор ЛЧМ сигнала РПДК и в МЕВ. В момент, когда показания часов МЕВ совпадают со временем начала излучения диагностирующего сигнала, МЕВ формирует импульс «Пуск». С приходом этого импульса в синтезатор ЛЧМ сигнала, тот начинает формировать непрерывный ЛЧМ сигнал с параметрами, заданными оператором. Диагностирующий сигнал с выхода синтезатора поступает в ШУМ, где он усиливается по мощности и через СУ, предназначенное для согласования антенны с выходным импедансом ШУМ, поступает на антенну РПДК. РПК комплекс диагностики в режиме излучения диагностирующего ЛЧМ сигнала не принимает участие.

Прием диагностирующего сигнала осуществляется РПК. Оператор в программе управления синтезатором, как и при излучении, задает параметры ЛЧМ сигнала и время начала его излучения. Эти данные поступают от ПЭВМ в синтезатор ЛЧМ сигнала РПДК и в МЕВ. Поскольку часы МЕВ приемного и передающего пунктов синхронизированы между собой, то момент начала излучения диагностирующего ЛЧМ сигнала совпадает с началом приема сигнала на приемном пункте. Диагностирующий сигнал, распространяясь в ионосфере,

попадает на антенну РПК. Синтезатор РПК формирует ЛЧМ сигнал для первого гетеродина РПУ, когерентный излучаемому и отличающийся начальной частотой на величину первой промежуточной частоты (ПЧ) РПУ. Кроме того, синтезатор ЛЧМ сигнала формирует цифровой сигнал для управления преселектором РПУ. В РПУ происходит селекция и усиление принимаемого ЛЧМ сигнала, его преобразование и сжатие в частотной области. Низкочастотный сигнал разностный сигнал с РПУ поступает на вход аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) звуковой карты ПЭВМ, где он оцифровывается и подвергается дальнейшей обработке. РПДК комплекса в пункте приема в работе в приемном режиме не участвует. Сразу отметим, что в данной статье рассматривается оцифровка сигнала только посредством АЦП звуковой карты, возможность работы с внешними платами сбора данных (АЦП) также имеется (и была реализована в некоторых исполнениях измерительных комплексов), но здесь не приводится; отличия сводятся только к программным интерфейсам для работы с АЦП (есть также отличия в получении стартового импульса) и не влияют на общие потоки данных и алгоритмы обработки.

Использование параметра «Задержка» при составлении расписания для каждой радиолинии обеспечивает прием информационного сигнала в заданной полосе анализа РПУ независимо от групповой задержки диагностирующего сигнала для каждой радиолинии.

Особо нужно отметить одно важное требование к ПО ионозонда, которое осуществляет дальнейшую обработку сигнала разностной частоты: формирование ионограммы должно начинаться по приходу стартового импульса от МЭВ.

## **2. Типы и форматы данных**

Экспериментальные данные комплекса образуют иерархию, для пояснения этого факта введем понятие уровня экспериментальных данных. Данные большего по номеру уровня получаются из данных меньшего уровня; данные меньшего по номеру уровня не могут быть получены из данных большего по

номеру уровня. Имеются следующие данные (по уровням): 1 – оцифрованный сигнал (отсчеты) с выхода РПУ; 2 – ионограммы, спектры помех; 3 – треки мод, спектр фоновго шума, характеристики станционных помех; 4 – АЧХ КВ радиолиний, модели многолучевости, оптимальные рабочие частоты, отношение сигнал/шум и др.; 5 – статистика вариаций данных уровня 4.

Основным типом исходных данных, которые подвергаются вторичной обработке, являются оцифрованные отсчеты сигнала с выхода РПУ (сигнала разностной частоты ЛЧМ-ионозонда или сигнала уровня помех КВ диапазона), т.е. данные уровня 1. Вообще же, исходными данными могут быть данные уровней 1...4 для получения данных большего по номеру уровня.

Необходимо различать организацию хранения данных в памяти и формат файлов на внешних устройствах. Так, в файлах не хранятся избыточные данные, то есть те данные, которые можно вычислить на основе имеющихся («базовых»), а в памяти эти избыточные – вычисляемые данные могут храниться для увеличения скорости доступа к этим вычисляемым данным (при этом надо обеспечивать механизмы синхронного пересчета вычисляемых данных при изменении базовых). С другой стороны, файлы очень большого размера (десятки-сотни мегабайт) обычно не загружаются в память целиком, а обрабатываются блоками. Так что организация хранения данных в памяти и на внешних устройствах может сильно различаться.

При разработке и программной реализации хранения данных в оперативной памяти использовалось ООП (объектно-ориентированное проектирование) – каждый тип данных был представлен классом, объединяющим в себе поля для хранения данных и методы, реализующие операции над этими данными.

Поскольку, как было сказано, файлы не содержат избыточных полей данных, рассмотрение основных типов данных проведем на основе форматов файлов. Каждый из перечисленных ниже форматов включает заголовок, расположенный в самом начале файла. В начале заголовка содержится некоторая сигнатура, позволяющая идентифицировать тип файла (хотя для каждого типа

файлов расширение имени специфично, идентификация типа файла по расширению имени очень ненадежна). Также в заголовках всех типов имеются поля, хранящие дату и время, соответствующие началу сеанса получения данных 1-го уровня (оцифрованных отсчетов сигнала с выхода РПУ). Данные более высоких уровней наследуют значения этих полей (кроме данных 5-го уровня, так как они получены на основе обработки больших массивов данных нижних уровней). Например, четыре файла (1,2,3,4 уровней соответственно) – файл отсчетов, файл ионограммы НЗИ (построенной по этому файлу отсчетов), файл треков ионограммы (выделенных на этой ионограмме) и файл АЧХ многолучевой КВ радиолинии (АЧХ, вычисленной по этому файлу треков) – будут иметь в заголовках равные поля даты и времени (и равные дате и времени начала сеанса НЗИ). Естественно, что поля даты и времени в заголовках никак не связаны с атрибутами даты и времени создания (модификации, и др.) файла, хранящимися в файловой системе ОС.

Надо отметить, что существует множество форматов хранения данных радиозондирования, которые создавались разработчиками соответствующих программно-аппаратных средств (в основном это касается ионограмм вертикального зондирования). Например, в [23] описаны форматы данных ионозондов (разных поколений), созданных в ИСЗФ СО РАН (Иркутск). Автор хорошо знаком с форматами ионограмм IG2 и оцифрованных отсчетов EQ, разработанных в МарГТУ Егошиным А.Б. [22] и Батухтиным В.И. под руководством Шумаева В.В. Существуют и другие форматы.

Общим недостатком всех этих форматов является не универсальность, т.е. ориентация на конкретное программное (а иногда и аппаратное) обеспечение, выражающаяся в невозможности использования этих данных в существующем «л8стандартном» ПО обработки данных (ПО обработки сигналов, математическом ПО, и т.п.); а также затруднении интеграции научного ПО, разработанного в разных научных коллективах (и использующего несовместимые форматы данных). С целью преодоления последнего недостатка, предпринимаются попытки использования формата XML, что нельзя признать

хорошим решением, так как, во-первых, все-таки не решаются проблемы со «стандартным» ПО, и, во-вторых, формат XML является текстовым и не приспособлен для хранения бинарных данных (хранение бинарных данных в формате XML, вообще, возможно – например путем преобразования в печатные символы посредством схемы base64; но это приводит к увеличению размеров файлов в разы по сравнению с бинарными).

Поэтому для файлов отсчетов и ионограмм (наиболее важные типы данных) были выбраны универсальные бинарные форматы, позволяющие устранить указанные недостатки – WAV и PNG соответственно. При этом пришлось решать задачи приспособления этих форматов для реализации некоторых несвойственных им функций.

Рассмотрим форматы файлов основных типов данных.

**1. *Оцифрованные отсчеты сигнала с выхода РПУ.*** Данные 1-го уровня. В заголовке хранятся параметры временного ряда отсчетов (частота дискретизации, число отсчетов, разрядность отсчетов), режим (НЗИ, измерение помех, АЧХ РПУ), в котором получены эти отсчеты, и параметры режима (радиолиния, диапазон частот, скорость перестройки и др.).

Все данные 2-го уровня могут быть получены только из файлов отсчетов.

Для сохранения данных этого вида был выбран формат WAV. Такой выбор был сделан для облегчения использования существующих программ цифровой обработки сигналов (например, SpectraLAB) и программ для цифровой обработки звука (например, SoundForge). Стоит также отметить, что популярный математический пакет MATLAB позволяет работать с WAV файлами, равно как и его свободно доступные аналоги, а также средства анализа данных на основе многочисленных библиотек Python.

Формат WAV (являющийся частным случаем формата RIFF) допускает создание в файле различных дополнительных («информационных») секций. Эти секции можно использовать в т.ч. для хранения информации о параметрах сеанса зондирования.

Основной концепцией RIFF-формата является т.н. chunk — порция данных с заголовком; заголовок состоит из сигнатуры, указывающей на содержимое chunk'a, и размера данных chunk'a [20].

«Основные данные», т.е. оцифрованный сигнал с выхода РПУ хранится аналогично звуковым данным (т.е. последовательность двух chunk'ов: «fmt» и «data» — как принято в «обычном» WAV файле для хранения звука).

После этих данных находится chunk с «нашим» заголовком. Это реализовано в виде стандартного chunk'a INFO, включающего стандартные chunk'и ICMT, INAM, ISBJ, ISFT, ISRF.

В chunk ICMT помещается поясняющая информация (комментарий из одноименной колонки расписания «Поясняющая информация»).

В chunk ISRF помещается заголовок с параметрами сеанса. Заголовок преобразован из бинарного вида в печатные символы. Такое преобразование сделано потому, что программы редактирования звуковых файлов ожидают увидеть в chunk'e ISRF именно текстовую информацию, так что могут отказаться открывать файл с бинарным содержимым chunk'a ISRF или могут его испортить. В chunk ISRF помещается структура с параметрами сеанса, предварительно преобразованная в печатные символы.

В chunk ISBJ помещается полное строковое наименование трассы. Хотя это название можно сформировать (по координатам пунктов, хранящимся в заголовке в ISRF и названиям пунктов, хранящимся в файле описания приемных/передающих пунктов), это сделано на случай потери файла пунктов.

Chunk INAM зарезервирован для будущего использования.

**2. Ионограммы. Данные 2-го уровня.** Получаются в режиме НЗИ. В начале файла ионограммы – заголовок с параметрами НЗИ: частотным диапазоном и скоростью зондирования, идентификатором радиолинии, положением полосы анализа НЗИ. За заголовком – спектры разностного сигнала, из которых и состоит ионограмма. Обычно записывается не весь спектр разностного сигнала, а в полосе анализа НЗИ, выровненной по границам спектральных элементов.

Для хранения ионограмм выбран формат PNG.

Интересно отметить, что рассматривался также формат GIF, показавший лучшие результаты (меньший размер файла) при сохранении ионограммы с точностью 4 бита на пиксель (16 цветов), чем PNG при идентичных условиях. Однако, GIF «проиграл» при сохранении ионограммы с точностью 8 бит на пиксель (256 цветов), а именно такую точность решено было использовать.

Формат JPG не рассматривался, т.к. это формат с потерей данных.

Случай сохранения ионограммы с точностью 4 бита на пиксель (16 цветов) проверялся потому, что, как правило, ионограмма представляется в определенной 11-цветной палитре (и только при создании картинок для печати требуется серая палитра). Однако, было принято решение для повышения точности представления амплитуды сигнала использовать 8 бит на пиксель. Поэтому, для сохранения видимости тех же 11 цветов (ставшими стандартом де-факто в определенном кругу специалистов) приходится формировать 256-цветную палитру с 11-ю диапазонами одинаковых цветов, т.е. количество одинаковых цветов в каждом диапазоне палитры примерно равно  $256/11$ , а точнее: все диапазоны палитры, кроме последнего, имеют размер по 23 цвета, последний имеет размер 26 цветов. При использовании такой палитры остается возможность легко перейти к серой 256-цветной палитре, и, что важно, не менять при этом значения самих пикселей — достаточно только смены палитры.

Основные данные ионограммы (спектрограмма спектров мощности сигнала с выхода приемника ионозонда — зависимость амплитуды сигнала от частоты зондирования и времени группового запаздывания радиоволн) помещены в виде, «готовом для просмотра» стандартными программами просмотра картинок, т.е. имеются оси, надписи и пр. Поэтому для получения программного доступа к основным данным ионограммы, в заголовке записываются параметры, означающие сдвиг информационного поля основных данных ионограммы относительно верхнего левого угла изображения; учет этих сдвигов позволяет работать с данными ионограммы как с двумерным массивом.

Для хранения параметров сеанса измерения используется опциональная секция файла PNG, называемаяся zTXt (подробнее о секции zTXt см. стандарт

PNG: «11.3.4.4 zTXt Compressed textual data» [21]). В эту секцию помещается структура с параметрами сеанса, предварительно преобразованная в печатные символы. Такое преобразование делается потому, что стандартная программа просмотра изображений Windows не поддерживает PNG формат полностью, т.е. считает ошибочными дополнительные бинарные секции, несмотря на то, что они валидны с точки зрения стандарта PNG [21] (создание дополнительных бинарных секций было опробовано и такие PNG файлы просматриваются большинством программ просмотра и обработки изображений, к каковым не относится упомянутая стандартная программа просмотра изображений Windows; так что от такого – самого естественного – пути пришлось отказаться и помещать параметры сеанса в секцию zTXt преобразованными в печатные символы, как это сказано выше).

**3. Панорама спектра помех.** Данные 2-го уровня. Получаются в режиме измерения помех. В начале файла – заголовок с параметрами измерения помех [5,12]. После заголовка – один или несколько массивов спектра мощности помех. Массивов больше одного, если было произведено несколько сканирований частотного диапазона ( $n > 1$ ). Один массив может быть либо, если было проведено одно сканирование ( $n = 1$ ), либо если все сканирования были усреднены (этот факт отмечается в специальном поле заголовка).

**4. Панорама спектра фоновых шумов.** Данные 3-го уровня. Получаются из панорамы спектра помех. После заголовка – два массива: массив спектра мощности фонового шума и массив частот (равный по размерности массиву спектра), на которых соответствующие элементы спектра фоновых шумов были получены [5,12].

**5. Характеристики сосредоточенных помех.** Данные 3-го уровня. Получаются из панорамы спектра помех. После заголовка три массива: массив распределение ширин сосредоточенных помех; массив с числами сосредоточенных помех на частотных интервалах; массив с частотными интервалами (пары чисел в виде структуры), занятыми сосредоточенными помехами, превышающими заданный уровень.



**6. Треки (траектории мод).** Данные 3-го уровня. Получаются по ионограмме. В начале – заголовок, содержащий информацию о радиолинии и параметрах ее зондирования (как в ионограмме), а также некоторые дополнительные служебные атрибуты. Затем – массив областей ионограммы (прямоугольных и непрямоугольных). Область характеризуется своими границами (структура с четырьмя полями для прямоугольных, массив структур для непрямоугольных). Есть два варианта этого файла: для выделенных треков с аппроксимацией следа трека полиномами и вариант выделенных компонент полезного сигнала. Соответственно, для первого из этих вариантов далее в файле трека, после массива областей, располагаются два массива (и поля, хранящие число их элементов): массив для хранения коэффициентов аппроксимирующего полинома траектории трека моды и массив с АЧХ парциальной моды (АЧХ моды обычно сглажена медианным фильтром). Для второго варианта файла, после массива областей, располагаются массивы битовых масок сигнальных компонент, выделенных на ионограмме.

**7. Файлы АЧХ КВ радиолинии.** Данные 4-го уровня. Получаются по трекам ионограммы НЗИ [4,5]. В начале – заголовок, содержащий информацию о радиолинии и параметрах ее зондирования (как в ионограмме), а также параметры вычисления АЧХ. Затем собственно АЧХ КВ радиолинии – массив коэффициентов.

**8. Файлы АЧХ РПУ.** Данные 2-го уровня. Получаются в режиме калибровки РПУ. За заголовком – массив коэффициентов (АЧХ РПУ) – зависящий от частоты коэффициент усиления РПУ.

**9. Файлы выделенных моделей многолучевости.** Данные 4-го уровня. Получаются с использованием информации о треках ионограммы НЗИ. За заголовком – массив структур, имеющих три поля: начальную и конечную частоты диапазона многолучевости и номер модели многолучевости [4,5].

Следует упомянуть также о формате файла расписания. Это не файл экспериментальных данных, но расписание работы является важнейшим элементом разработанного измерительного комплекса, обеспечивающим работу

в автоматическом режиме. В начале файла – заголовок. За заголовком – массив строк расписания (строка здесь – не в смысле последовательность символов). Строка расписания – структура с полями: время; режим; параметры обработки, которые будут установлены при активации этой строки. Эти параметры делятся на: не зависящие от режима и зависящие от режима. Параметры, не зависящие от режима: нужно ли ожидать стартовый импульс, нужно ли сохранять файл оцифрованных отсчетов, уровень «громкости» звуковой карты и др. Параметры, зависящие от режима для режима НЗИ: начальная и конечная частоты зондирования, скорость зондирования, ширина спектра, полоса анализа по задержке разностного сигнала, весовая оконная функция, параметры сглаживания спектров по Уэлчу.

### 3. Архитектура программного обеспечения измерительного комплекса

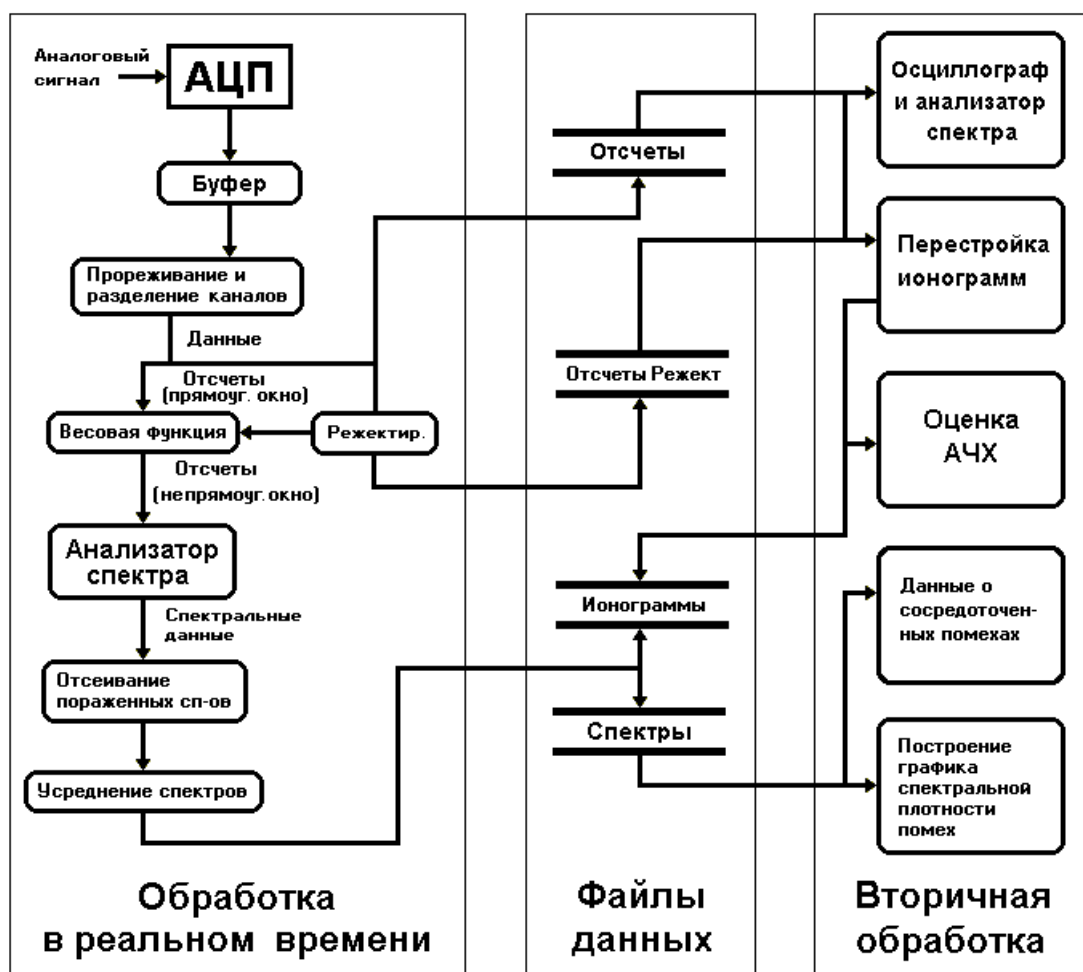


Рис. 3. Общая схема ПО комплекса

Разработанное автором ПО комплекса радиозондирования состоит из подсистем первичной и вторичной обработки [5,13,16]. Под первичной обработкой понимается автоматическая регистрация и сохранение полученных данных в реальном времени; возможна также индикация получаемых данных. Вторичная обработка заключается в анализе полученных данных с удобной для человека скоростью (включая пакетную обработку большого массива данных с целью вычисления статистических характеристик).

На рис. 3 показана информационная схема ПО измерительного комплекса с встроенными в него подсистемами измерения помех и подавления (режектирования) сосредоточенных помех.

ПО первичной обработки было реализовано для двух операционных систем (ОС): Linux и MS Windows (ОС выбирается в зависимости от состава аппаратуры и требований конкретного исполнения).

ПО вторичной обработки реализовано для ОС MS Windows. Так как оно работает с файлами данных, то является общим для всех реализаций комплекса поскольку соблюдается совместимость форматов данных.

### **3.1. ПО первичной обработки**

ПО первичной обработки состоит из двух основных подсистем: подсистемы управления и подсистемы регистрации данных. Подсистема регистрации (оцифровки) может быть реализована как на основе стандартной звуковой карте ПЭВМ, так и на основе различных специализированных АЦП. Подсистема управления является общей, независимо от используемых устройств оцифровки. Подсистема регистрации (оцифровки) ниже описана для случая использования звуковой карты.

Для обеспечения гибкости, переносимости и расширяемости подсистема управления разделена на следующие слои:

1. низкоуровневые ОС-зависимые процедуры доступа к портам ПЭВМ;
2. классы для работы с субблоками комплекса низкоуровневыми командами субблоков;

3. классы для работы с функциональностью субблоков комплекса в терминах их функций (классы «виртуальных устройств»);

4. сеансы режимов измерений.

Характер комплекса предполагает работу в автоматическом режиме (без непосредственного участия человека), когда по заданному расписанию происходит автоматическая смена рабочего режима и его параметров. После запуска работы по расписанию (нажатия на кнопку Старт или Автозапуска) выбирается ближайший к текущему времени сеанс среди всех сеансов работы, указанных в расписании. Например, для режима НЗИ-приема, в строке расписания указывается название передающего пункта (приемный пункт – текущий, определяется или задается при старте программы); время запуска  $t_{\text{пуска}}$  с точностью до секунд; задержка  $\Delta\tau$ , относительно старта, компенсирующая время распространения сигнала в ионосфере; начальная, конечная частота и скорость ЛЧМ сигнала и др. За несколько секунд (задается; как правило, равно 5 сек)  $\Delta t_{\text{подг}}$  до времени запуска сеанса  $t_{\text{расч}}$  в синтезатор отправляется команда запуска режима и параметры режима. С наступлением заданного времени  $t_{\text{пуска}}$  (равное  $t_{\text{расч}}$  плюс заданная задержка  $\Delta\tau$ ) от синтезатора на правый канал звуковой карты (или на особый вход специализированного АЦП) поступает сигнал запуска сеанса (см. рис. 4). Длительность пускового сигнала – 50 мс. Если в заданный период (задается; как правило, равен 5 сек; на рис.4 не показан) пусковой сигнал не был получен, программа уточняет время от синтезатора и переходит к следующему по расписанию режиму.

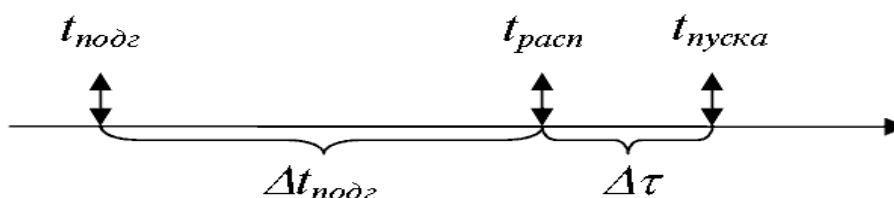


Рис. 4. Временная диаграмма запуска сеанса

Для программного управления работой по расписанию предназначен отдельный программный поток (thread), вычисляющий по расписанию время ближайшего старта  $t_{\text{расч}}$  (среди всех строк загруженного расписания выбирается

ближайшая по времени) и засыпающий до момента времени  $t_{подг}$ . После пробуждения в  $t_{подг}$ , этот поток создает объект сеанса, заданного в расписании (и с параметрами, заданными в расписании). Объект сеанса, в соответствии с заданными в расписании параметрами и спецификой заданного режима измерений, управляет объектами виртуальных устройств, которые, в свою очередь, через 2 и 1 слои управляют соответствующими субблоками комплекса.

В варианте комплекса с АЦП звуковой карты, из-за специфики ожидания стартового импульса, далее происходит следующее. Если в параметрах выбранной строки расписания (сеанса) задано ожидание стартового импульса, то производится ожидание момента времени  $t_{подг}$ , по наступлении этого момента времени запускается оцифровка, далее происходит ожидание стартового импульса как это описано выше. Если в параметрах выбранной строки расписания (сеанса) не задано ожидание стартового импульса, то производится ожидание момента времени,  $t_{расп}$ , затем запуск оцифровки без ожидания стартового импульса.

Расписание может быть показано в табличном виде (рис. 5 и 6). При этом сеансу работы соответствует строка в таблице. Каждому задаваемому параметру соответствует столбец. Задание и редактирование параметров удобнее осуществлять прямо в таблице.

Время	Режим	Трасса	Начал	Конеч	Скорос	Ширин	Диапа	Спектр	Перекр	Полос
** 12:00	НЗИ	Жаберовск - Йошкар-Ола	4	30	100	100	20	4	50	
** 27:00	НЗИ	Жаберовск - Йошкар-Ола	4	30	100	100	20	4	50	
** 42:00	Помехи	Неопределенная трасса	2	32						10000
** 57:00	Помехи	Неопределенная трасса	2	32						10000
** 02:00	НЗИ	Магадан - Йошкар-Ола	5,9	29	99,9534	100	20	4	50	
** 17:00	НЗИ	Магадан - Йошкар-Ола	5,9	29	99,9534	100	20	4	50	
** 32:00	Доплер	Магадан - Йошкар-Ола								
** 47:00	Доплер	Магадан - Йошкар-Ола								
** 07:00	НЗИ	Inskip (Великобритания 54 4.1	30	30	100	100	20	4	50	
** 37:00	НЗИ	Inskip (Великобритания 54 4.1	30	30	100	100	20	4	50	
** 21:00	НЗИ	Svalbard (Шпицберген 78N 3.7	30	30	100	100	20	4	50	
** 51:00	НЗИ	Svalbard (Шпицберген 78N 3.7	30	30	100	100	20	4	50	

Рис. 5. Пример расписания работы, показанного в табличном виде

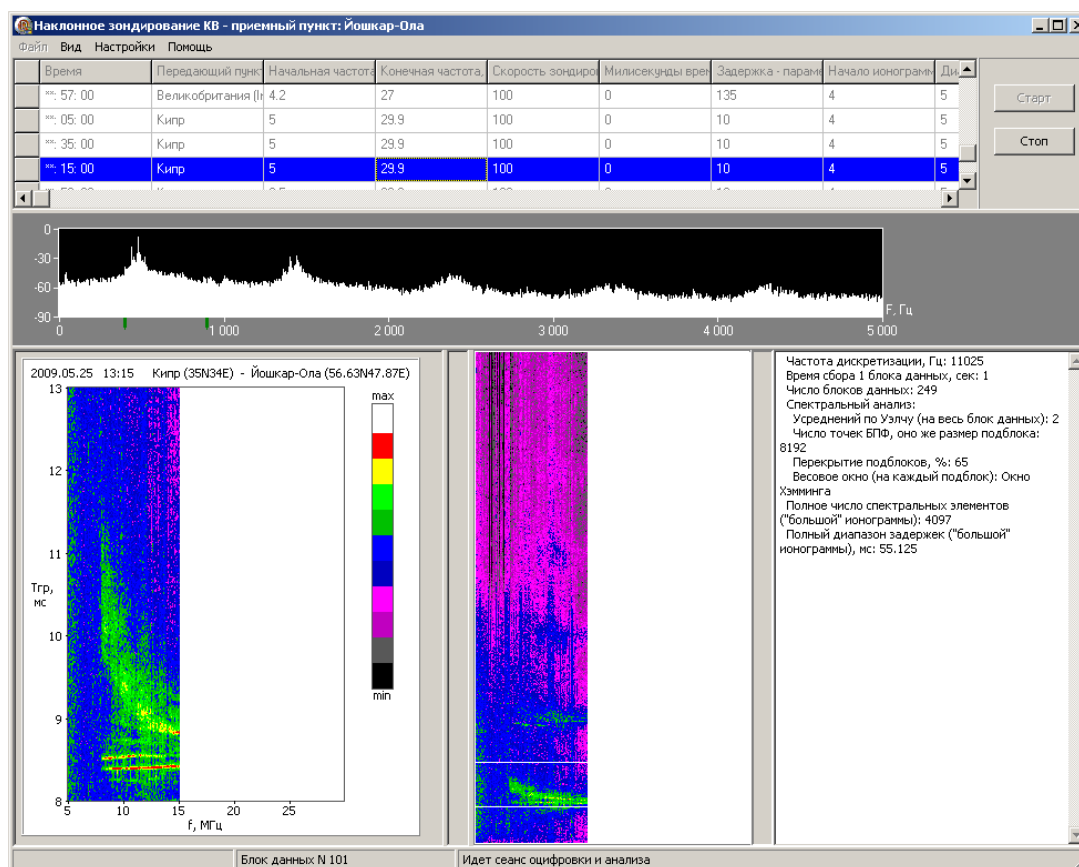


Рис. 6. Главное окно ПО первичной обработки во время измерений

Пользовательский интерфейс разработан на основе библиотеки Qt, имеющей реализации как для ОС Linux, так и Microsoft Windows. ОС-зависимые процедуры управления аппаратурой реализованы для каждой из ОС отдельно.

Во время сеанса происходит отображение текущих получаемых данных. Так в режиме НЗИ-приема в окне программы первичной обработки выводится спектр мощности текущего блока данных, выводится ионограмма — в уменьшенном масштабе ионограмма по всей полосе частот разностного сигнала (т.е. по всему диапазону межмодовых задержек) и в масштабе 1:1 ионограмма в заданной полосе частот разностного сигнала (см. рис. 6).

### 3.2. ПО вторичной обработки

Вторичная обработка экспериментальных данных подразумевает обработку после эксперимента, в отличие от первичной обработки, проводящейся во время эксперимента в реальном масштабе времени.

ПО вторичной обработки включает (но не ограничивается):

- ПО построения ионограмм НЗИ и ВЗИ с заданными параметрами спектральной обработки (весовые окна, перекрытие спектров, число точек БПФ и др.), а также с возможностью предварительного подавления сосредоточенных помех;
- ПО построения панорамы и оценки характеристик различных видов помех КВ диапазона;
- ПО оценки тонкой структуры АЧХ и ее характеристик.

ПО вторичной обработки предоставляет также возможности просмотра полученных данных, поиска, группировки. Это необходимо для просмотра сохраненных данных, причем с удобной для человека скоростью, используя функции навигации по выбранному файлу данных (прокрутка вперед, назад, в начало, в конец, изменить масштаб и др.).

ПО вторичной обработки предназначено для работы с иерархией экспериментальных данных, включая возможности регенерации производных данных и возможности просмотра имеющихся данных. Кроме того, оно обеспечивает программную инфраструктуру для реализации, отладки и апробации новых алгоритмов обработки данных зондирования.

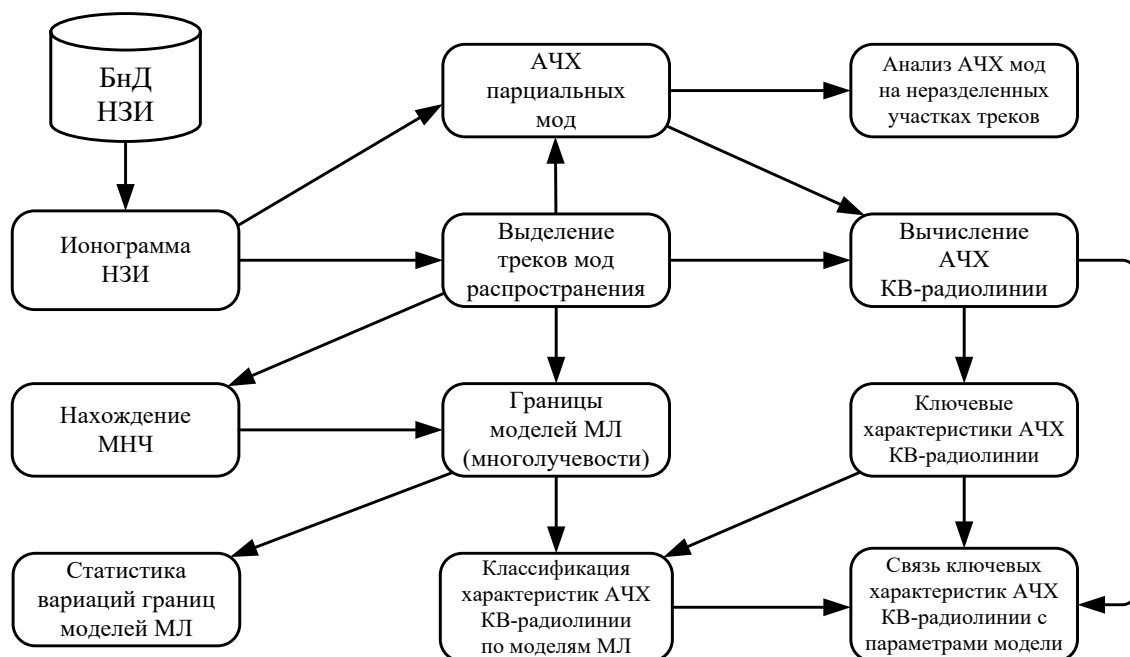


Рис. 7. Диаграмма исследования характеристик моделей МЛ

В качестве примера рассмотрим функционирование ПО вторичной обработки при сборе статистики вариаций межмодовых задержек (разностей времен группового запаздывания различных мод распространения КВ), АЧХ парциальных мод и АЧХ радиолинии в целом [4-6,8], а также классификации этих данных по т.н. эмпирическим моделям многолучевости (МЛ); основные этапы этого процесса показаны на рис. 7. Ионограмма, извлекаемая из банка данных (БНД) НЗИ, может предварительно обрабатываться по алгоритму подавления сосредоточенных помех [5,7,11] (на диаграмме не показано). Далее происходит выделение треков мод полезного сигнала.

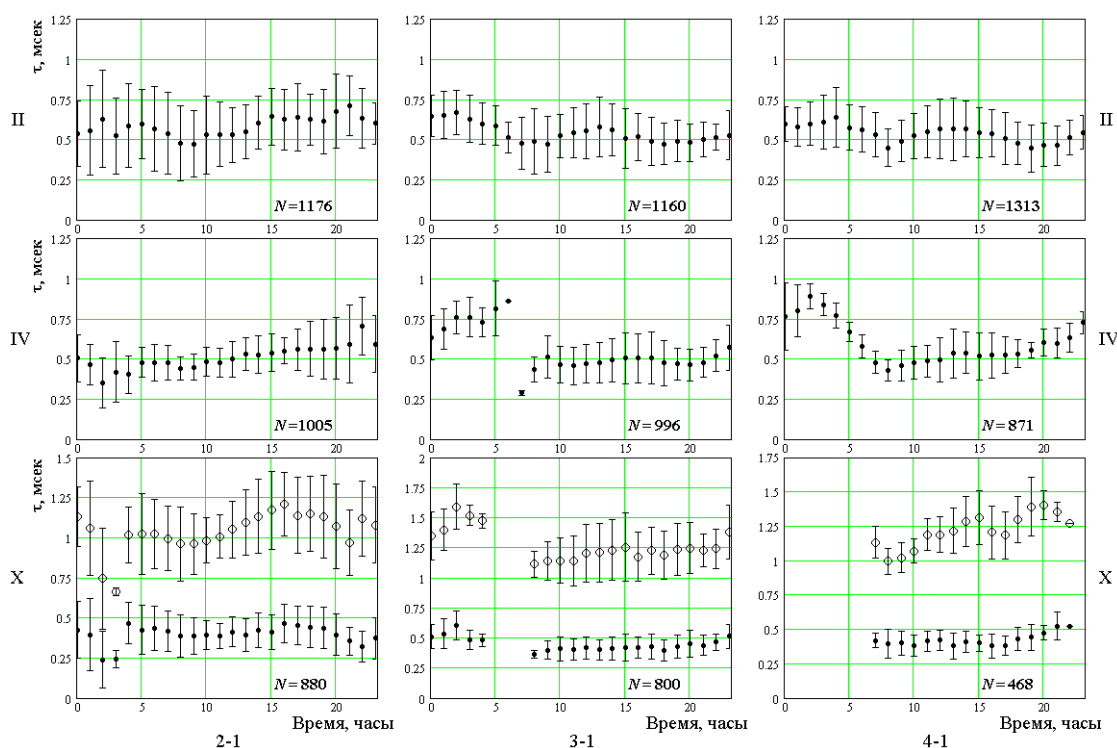


Рис. 8. Суточные вариации межмодовых задержек

Один из результатов такой обработки массива ионограмм – суточные вариации межмодовых задержек (разностей времен группового запаздывания) – показан на рис.8 [5]. Радиолинии обозначены 2-1 – Хабаровск – Йошкар-Ола (5700 км), 3-1 – Великобритания – Йошкар-Ола (3100 км) и 4-1 – Кипр – Йошкар-Ола (2600 км). Римскими цифрами обозначены эмпирические модели многолучевости – сочетания определенных типов мод радиосигнала: (в скобках даны обозначения для двухскачковой радиолинии 2-1): II – 1F2, 1F2п (2F2, 2F2п); IV – 1F2, 2F2 (2F2, 3F2); X – 1F2, 2F2, 3F2 (2F2, 3F2, 4F2); в названиях мод



подстрочными «п» обозначены Педерсеновские моды. Для трехмодовой модели X приведено по два графика (разности второй и третьей задержек относительно первой). Буквой N обозначено число ионограмм по которым получен каждый график (и на которых присутствовала данная модель многолучевости).

Разумеется, возможности вторичной обработки далеко не ограничиваются представленными в примере; ПО может быть использовано для получения новых радиофизических данных, в том числе для исследования диффузной многолучевости, эффектов магнитоионного расщепления КВ радиоволн, рассеяния КВ радиоволн на ионосферных неоднородностях, обнаружении искусственных неоднородностей в нагревных экспериментах и других исследований, требующих, подобно перечисленным исследованиям, достижения высокого разрешения по частоте и времени группового запаздывания радиоволн, а также требующих возможностей оперирования большими объемами разнообразных экспериментальных данных.

Разработанные средства просмотра ионограмм включают возможности как быстрого просмотра большого массива ионограмм со «стандартным» разрешением, так и средства детального просмотра выбранной ионограммы с возможностью задания разрешений по частоте зондирования и времени группового запаздывания, что достигается путем перестройки ионограммы по оцифрованному сигналу сеанса с выхода ионозонда.

При задании размеров (а значит и разрешений) возможны следующие случаи.

1. Задание размера ионограммы «по горизонтали» (т.е. по частоте зондирования).

Разрешение по частоте зондирования определяется числом N блоков («спектров», вертикальных линий ионограммы), это число может быть задано напрямую или может вычисляться в ответ на события соответствующего визуального элемента управления разрешением (механизм зумирования посредством мыши). При разбиении отсчетов сеанса на эти блоки и выполнения над ними БПФ, может потребоваться либо дополнение нулями до ближайшего

$2k$  ( $k$  – целое), если отсчетов брать  $M/N$  штук (где  $M$  – общее количество отсчетов сеанса); либо брать блоки с перекрытием, что задается опционально. Тогда разрешение «по вертикали» (т.е. по времени группового запаздывания) в этом случае определяется по размерам  $m$  блока отсчетов для БПФ, и равно  $(m/2 + 1)$ .

2. Задание размера ионограммы «по вертикали» (по времени группового запаздывания).

Исходя из заданного размера ионограммы «по вертикали» (фактически соответствующему числу спектральных элементов в спектре, который требуется получить) определяется размер блока отсчетов («число точек БПФ»). Тогда из размера блока отсчетов определяется число таких блоков и отсюда определяется размер ионограммы «по горизонтали» (по частоте зондирования).

3. Случай изменения разрешения по обеим осям.

Требование определенного «числа пикселей» по вертикали (числа элементов спектра) определяет соответственный выбор размера блока. В то же время, должно выполняться требование определенного «числа пикселей» по горизонтали (числа блоков, числа спектров). Очевидно, что оба требования одновременно невозможно выполнить без перекрытий блоков.

Случаи 1 и 2 демонстрируют своего рода принцип неопределенности при построении ионограммы, когда улучшение разрешения по одному параметру достигается за счет ухудшения разрешения по другому параметру. Причем, надо отметить, что речь идет о разрешениях только процесса обработки, не учитывая аппаратные разрешения ионозонда.

Случай 3 также не позволяет обойти данный принцип неопределенности, хотя это не так очевидно. Кажущееся увеличение «числа точек» одновременно по обеим осям, способно дать новую информацию только за счет преодоления некоторых побочных эффектов оконного периодограммного спектрального анализа, а именно в случае более удачного попадания, локализованного по времени процесса в одно из окон (блоков) и, соответственно, более точного определения характеристик этого процесса при этом.

Программно реализованы также возможности гибкой настройки отображения амплитуды. Поскольку человеческий глаз способен различать весьма небольшое число оттенков одного цвета (или градаций яркости), а применение различных цветов не позволяет интуитивно воспринимать величину амплитуды по цвету (без специальных тренировок), то имеется проблема отображения амплитуды «без потери разрешения». Основная идея предложенного решения заключается в том, чтоб поместить в диапазон яркостей, воспринимаемых человеческим глазом, интересующий диапазон амплитуд. Например, диапазон наибольших изменений амплитуды сигнала (что позволяет детальнее видеть эти изменения). Или, другой пример, путем отнесения к такому диапазону всех точек полезного сигнала (алгоритм выделения точек полезного сигнала приводился в [5]), достигается ситуация, когда полезный сигнал ионограммы занимает больший интервал яркостей, чем фоновый шум ионограммы.

#### **4. Обработка данных методами теории обучения машин**

Наиболее сложной проблемой при автоматизации обработки ионограмм является выделение треков мод сигнала: треки требуется выделить не только на фоне помех, но и отделить друг от друга, что является очень нетривиальной задачей. Далее, необходимо классифицировать треки по типам мод распространения. Существующие подходы выделения треков позволяют надежно выделять только треки мод сильных сигналов, с «классическим» расположением на ионограмме [22,24], при этом задачи выделения слабых сигналов (например, треки мод высоких порядков), или следов аномальных мод распространения сигнала (при гео- и гелиофизических возмущениях, в арктических широтах, и т.п.) очень плохо решаются существующими алгоритмами автоматического выделения.

Для решения задачи автоматического выделения треков мод радиосигнала на ионограмме, крайне перспективным представляется использование достижений теории обучения машин (машинного обучения) [19]. Очевидно, что

двум указанным процессам (выделения и идентификации треков) соответствуют классические задачи из теории обучения машин: задача кластеризации и задача классификации. Однако, попытка применения имеющихся алгоритмов теории обучения машин «в лоб» выявляет некоторую особенность обработки ионограмм человеком (экспертом): человек одновременно решает обе задачи, различные гипотезы классификации трека могут привести и к различиям в процессе кластеризации. Таким образом, встает задача разработки методики (метода, алгоритма) применения классических алгоритмов кластеризации и классификации. Возможно, это должен быть итерационный подход, или некий новый комплексный алгоритм.

Особняком стоят алгоритмы т.н. глубокого обучения, способные выделять признаки обучения самостоятельно. Однако применение глубокого обучения требует очень больших обучающих выборок, причем размеченных данных (скорее всего, потребуются привлечение сторонних разметчиков данных, поэтому возникает необходимость написания инструкции по разметке ионограмм, возможно на основе рефлексии эксперта). Требование больших объемов обучающих выборок вызвано большим числом внутренних параметров моделей глубокого обучения (а объектов для обучения должно быть гораздо больше, чем число параметров модели, иначе модель просто «переобучится» под конкретные данные).

Произведена предварительная апробация выделения треков радиосигнала на ионограмме НЗИ посредством сверточных нейронных сетей (CNN) – пока неглубоких, поскольку еще не размечены необходимые для глубоких сетей большие обучающие выборки; архитектура неглубокой сети: 5 сверточных слоев с функциями активации ReLU между ними и с сигмоидой после последнего слоя; пример результатов показан на рис. 9.

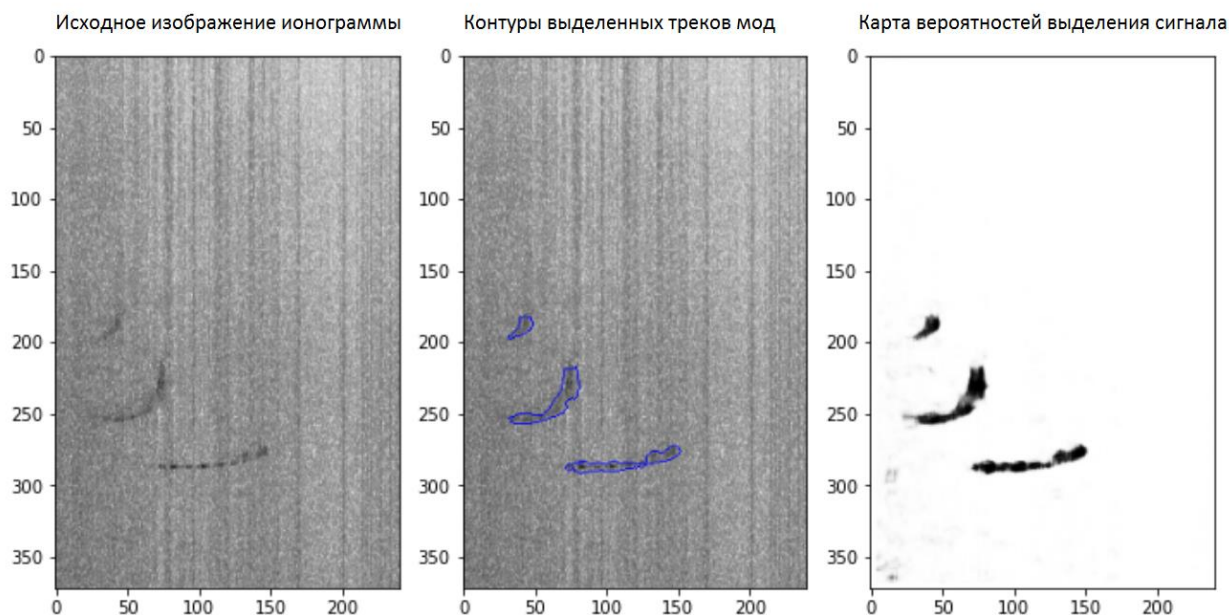


Рис. 9. Автоматического выделения сигнала посредством CNN

Поскольку требуется размечать большие объемы данных, было разработано специализированное ПО выделения различных объектов на ионограммах (т.е. их разметки), в составе подсистемы вторичной обработки. Отличие такого специализированного средства разметки от существующих программ разметки изображений (а ионограмму можно представлять как изображение, более того именно так она чаще и представлена) в том что должны быть реализованы средства не только выделения границ треков мод радиосигнала, но и возможность разметки всей той информации, которую «видит» человек (эксперт) по ионограмме: верхние и нижние лучи, магнитоионные расщепления, области повышенной диффузности, сосредоточенные (станционные) помехи, фоновые помехи. и др.

Треки могут размечаться различными «инструментами» (как полигональные области, как закрашенные «кистью» области, как отдельные точки – причем один трек может включать участки, размеченные разными «инструментами»). Треки могут сопровождаться дополнительными атрибутами разметки: верхний луч, магнитоионное расщепление, область диффузности, «Е или Es», спорный слабый сигнал, сбой аппаратуры. Кроме треков сигнала могут быть выделены и шумовые объекты с соответствующей разметкой: стационарный

шум и фоновый шум; причем для стационарных помех реализован еще один способ выделения – целыми вертикальными линиями. Реализована функция загрузки разметки ионограммы соседнего по времени (но уже размеченного) сеанса, в этом случае разметку можно начинать не «с чистого листа», а редактировать загруженную разметку (в спокойных геофизических условиях и в «непереходное» время суток соседние ионограммы одной радиотрассы могут слабо отличаться).

Дальнейшее развитие описанного средства разметки будет заключаться в добавлении функционала разметки следов ионосферных неоднородностей, а также перекрестного контроля за результатами сторонних разметчиков (поскольку задача разметки большого объема данных приводит к необходимости привлечения большого числа разметчиков, качество работы которых может сильно отличаться и требует контроля).

## **Заключение**

Таким образом, разработанное ПО первичной обработки позволяет производить регистрацию и первичную обработку в реальном времени автоматически без непосредственного постоянного участия человека, а ПО вторичной обработки включает возможности для работы с иерархией экспериментальных данных, в т.ч. возможности регенерации производных данных и возможности просмотра имеющихся, а также пакетной обработки больших массивов данных для исследования их статистических характеристик.

Всё представленное ПО разработано автором лично, включая общую концепцию и архитектуру ПО. Описанные методики измерений и алгоритмы разработаны при непосредственном участии автора в сотрудничестве с А.А. Колчевым, В.В. Шумаевым и А.Е. Недопекиным [4,7-12].

Дальнейшее развитие представленного ПО планируется в направлении углубления использования достижений теории обучения машин в целях автоматизации обработки данных радиозондирования, для чего потребуется разработка метрик качества и выбор оптимальных архитектур глубоких

нейронных сетей, а также доработка средств разметки. Также планируется создание функционала обработки данных радиозондирования в интересах адаптации ЗГ радиолокационных станций КВ диапазона к ионосферной обстановке [2,3,18,19].

### Литература

1. 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.
2. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. *Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов*. Москва, Техносфера. 2017. 492 с.
3. Giuseppe Fabrizio. *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*. McGraw-Hill Education. 2013.
4. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. *Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолоний: монография*. Йошкар-Ола, Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола 2013. 147 с.
5. Щирый А.О. *Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний*: Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: Спец. 05.12.04. Санкт-Петербургский гос. университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Защищена 24.05.2007. Утв. 14.12.2007. 04200722350. Шифр РГБ 61:07-5/2691. Йошкар-Ола. 2007. 199 с.
6. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement. *Fifth International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. IEEE. 2002. P.365-369.
7. Патент РФ №2290756. Колчев А.А., Щирый А.О. *Способ подавления сосредоточенных помех при приеме непрерывного линейно-частотно-*

модулированного сигнала. Дата заявки: 23.05.2005. Дата публикации: 27.12.2006. Бюл. № 36. (Исправл. опубл. 10.06.2007. Бюл. № 16.)

8. Колчев А.А., Щирый А.О. Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ-иозонда. *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т.20. №7. С 627-630.
9. Колчев А.А., Щирый А.О. Оценивание параметров сосредоточенных по спектру помех на выходе приемника ЛЧМ иозонда. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2007. №5. С.54-61.
10. Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирый А.О. Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2008. Т.51. №12. С.73-79.
11. Колчев А.А., Щирый А.О. Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ зондировании ионосферы. *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2006. Т.49. № 9. С.751-759.
12. Колчев А.А., Шумаев В.В., Щирый А.О. Гибкоперестраиваемая методика измерения радиопомех. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2007. №1. С.50-54.
13. Щирый А.О. Программное обеспечение управления базовой станцией ионосферного мониторинга. *Инженерный вестник: Информатика, радиофизика, управление*. 2005. №2. С.204-207.
14. Щирый А.О. Гибкая перестройка ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы в процессе вторичной обработки. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2011. №14. С.138-140.
15. Щирый А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014. Т.14. №5. С.170-173.
16. Щирый А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы. *Новые*



*информационные технологии в автоматизированных системах*. 2015. №18. С.144-152.

17. Щирый А.О. Развитие программного обеспечения вторичной обработки данных дистанционного наземного радиозондирования ионосферы. *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Сер.: *Радиофизика и Ионосфера*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2016. №34(1206). С.78-83.
18. Щирый А.О. О перспективах использования некоторых современных достижений ионосферного радиозондирования при воссоздании 3Г РЛС эшелона СПРН. *Радиолокация, навигация, связь (RLNC2019): сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции*. Воронеж. 2019. С.226-234.
19. Щирый А.О. Перспективы применения машинного обучения для адаптации загоризонтных радиолокационных станций декаметрового диапазона к геофизическим условиям. Постановка задач и возможные подходы. *Сборник научных статей V Междунар. научн.-практ. конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2021»)*. Москва, РТУ МИРЭА. 2021. С.781-786.
20. RIFF (Resource Interchange File Format) [web]. *Wikipedia*. Дата обращения: 22.06.2022. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/RIFF>
21. Portable Network Graphics (PNG) Specification (Second Edition) – ISO/IEC 15948:2003 [web]. W3C. Дата обращения: 22.06.2022. URL: <http://www.w3.org/TR/PNG/>
22. Егошин А.Б. *Автоматизированная система адаптивной обработки сигналов со сверхбольшой базой для радиозондирования ионосферных радиолиний*. Автореферат диссертации канд. техн. наук: Спец. 05.12.04. Марийский гос. техн. ун-т. Йошкар-Ола 2003. 25 с.
23. Ким А.Г., Матюшонок С.М. Структура и формат данных ЛЧМ-ионозонда *Препринт №8-06*. Иркутск, Институт солнечно-земной физики СО РАН. 2006. 12 с.

24. 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 Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева*. 2013. № 5(51). С.163-166.
25. Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Автоматическая обработка ионограмм в ионосферном комплексе «Циклон-10». *Ионосферные исследования*. 1997. №50. С.232-243.
26. Зазнобина Е.Г., Ососков Г.А. Применение нейронных сетей в анализе данных вертикального зондирования ионосферы. *Препринт Р10-93-404. Дубна, ОИЯИ*. 1993. 10 с.
27. Piggot W. R., Rawer K. *URSI hand book of ionogram interpretation and reduction*. Boulder, World Data Centre A. Rep. UAG-23A. 1978. 206 p.
28. Патент РФ №2697433 С1. Цыбуля К.Г. *Способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам*. Дата заявки: 26.10.2018. Дата публикации: 14.08.2019.
29. Колчев А.А., Щирый А.О. Алгоритм автоматического выделения спектральных компонентов сигнала на ионограмме. *Материалы десятого научно-практического семинара «Новые информационные технологии»*. Москва, Московский гос. ин-т электроники и математики. 2007. С.102-107.
30. Недопекин А.Е. Адаптация стандартных критериев тестирования статистических выбросов для выделения сигнала ЛЧМ-ионозонда. *Журнал радиоэлектроники*: [электронный журнал]. 2013. №9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/5/text.pdf>
31. Недопекин А.Е. Метод обнаружения сигнала ЛЧМ-ионозонда в частотной области с учетом уширения принимаемых мод ионосферного распространения. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2015. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/5/text.pdf>

32. Максимов М.В., Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х., Горгонов Г.И., Степанов Б.М., Шустов Л.Н., Ильин В.А. *Защита от радиопомех*. Москва, Сов. Радио. 1976. 496 с.

**Для цитирования:**

Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолоний. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>