

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук



РЗК-2025



**Научно-техническая конференция
«Радиозондирование на Земле и в космосе»
(РЗК-2025), 1 – 2 октября 2025 г.**

**Сборник тезисов
(электронное научное издание)**

Москва, Троицк
2025

УДК 621.37
ББК 32.840
Р 15

Организатор конференции

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Р 15 Радиозондирование на Земле и в космосе: сборник тезисов научно-технической конференции (Москва, Троицк, 1-2 октября 2025 г.). Электронное научное издание. Под ред. И.В. Прокоповича, Москва: ИЗМИРАН, 2025. – 47 с.
URL: <https://www.izmiran.ru/library>
ISBN 978-5-6052190-1-9

Представлены результаты исследований, связанных с радиофизическими методами зондирования земных покровов, радиолокации материальных сред в геофизике, радиозондирования ионосферы, создания радиотехнических систем для решения радиофизических задач.

Предназначен для специалистов в области радиолокации, радиофизики, геофизики и радиосвязи, а также для студентов, аспирантов соответствующих специальностей.

Тезисы, рисунки и формулы представлены в авторской правке.

УДК 621.37
ББК 32.840

Электронное научное издание

Радиозондирование на Земле и в космосе

Сборник тезисов научно-технической конференции

Москва, Троицк, 1-2 октября 2025 г.

Под редакцией И.В. Прокоповича

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН) 108840 Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4.

ISBN 978-5-6052190-1-9

© ИЗМИРАН, 2025

Научные направления

Секция 1. Радиозондирование материальных сред в геофизике.

Секция 2. Радиолокация малой дальности.

Секция 3. Радиотехнические системы зондирования.

Секция 4. Радиозондирование ионосферы.

Программный комитет

Председатель:

Попов А.В., д.ф.-м.н., г.н.с. ИЗМИРАН.

Заместители председателя:

Кузнецов В.Д., д.ф.-м.н., науч. рук. ИЗМИРАН;

Крашенинников И.В., д.ф.-м.н., в.н.с. ИЗМИРАН.

Члены программного комитета:

Крюковский А.С., д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой РосНОУ;

Калошин В.А., д.ф.-м.н., проф., г.н.с. ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН;

Клименко М.В., д.ф.-м.н., директор Западного отд. ИЗМИРАН;

Николаев А.В., д.т.н., г.н.с. ИМАШ РАН;

Андреев С.Н., д.ф.-м.н., нач. отд. радиофотоники НИЦТ МФТИ;

Иванов А.А., к.г.-м.н., декан геофизического факультета МГРИ;

Судакова М.С., к.ф.-м.н., доцент НИУ ВШЭ;

Падохин А.М., к.ф.-м.н., доцент МГУ;

Колесник С.А., к.ф.-м.н., доцент ТГУ;

Федорова Л.Л., к.т.н., в.н.с. ИГДС СО РАН;

Едемский Д.Е., к.т.н., в.н.с. ИЗМИРАН;

Морозов П.А., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЗМИРАН, ООО «ВНИИСМИ»;

Сахтеров В.И., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЗМИРАН;

Прокопович И.В., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЗМИРАН.

Организационный комитет

Прокопович И.В., к.ф.-м.н., с.н.с. ИЗМИРАН — председатель оргкомитета.

Сахтеров В.И., к.ф.-м.н., гл. специалист ИПГ — зам. председателя комитета.

Члены оргкомитета:

Гладышев В.О., д.ф.-м.н., рук. НУК ФН МГТУ им. Н.Э. Баумана;

Ивашов С.И., к.т.н., Лаборатория дистанционного зондирования;

Кулижников А.М., д.т.н., нач. упр. РОСДОРНИИ;

Еремин Р.А., к.т.н., зам. нач. упр. РОСДОРНИИ;

Пудова Н.Г., нач. отд. РОСДОРНИИ;

Осип А.И., к.ф.-м.н., зав. ИВЦ ИЗМИРАН;

Митин О.В., сотрудник ИВЦ ИЗМИРАН;

Аверин А.А., зав. сектора ИЗМИРАН;

Беликова Т.М., зав. канцелярией ИЗМИРАН;

Бершадская И.Н., уч. секр. секции ИРР ИЗМИРАН;

Корсукова В.С., инж. ИЗМИРАН.

Содержание

Секция 1. Радиозондирование материальных сред в геофизике

<i>Павлова В.Ю., Акбашиев Р.Р.</i> Опыт применения метода георадиолокации в районах активного вулканизма (Камчатка, Курильские острова)	7
<i>Свинобоев А.С.</i> Результаты лабораторного определения электрофизических свойств образцов горных пород рудного штабеля Эльконского ГМК.....	8
<i>Фёдоров М.П.</i> Определение толщины и типа строения ледяного покрова р. Лена с помощью георадара, установленного на борту воздушного судна.....	9
<i>Шамаев С.Д.</i> Разработка математической модели георадиолокационного волнового поля, получаемого при изучении ледяного покрова северных рек.....	10
<i>Прудецкий Н.Д.</i> Опыт применения метода георадиолокации для поисков мамонтовой фауны и изучения объектов исторического наследия	11
<i>Куляндин Г.А.</i> Выявление талых горных пород в многолетнемерзлом массиве методом георадиолокации.....	12
<i>Едемский Д.Е., Прокопович И.В., Попов А.В., Лыткин В.М.</i> Георадиолокационное исследование дюнных массивов Махатта и Кызыл-Сыр (Якутия)	13
<i>Едемский Д.Е., Лыткин В.М., Прокопович И.В.</i> Предварительные результаты георадарного обследования отложений ледового комплекса в долине р. Вилой (Якутия)	14

Секция 2. Радиолокация малой дальности

<i>Нгуен В.К., Николаев А.В.</i> Исследование вторичного излучения неразорвавшихся боеприпасов на третьей гармонике.....	16
<i>Горкин Д.С., Аверин А.А., Пивторак А.А., Егоров А.П.</i> Георадарные радиообразы на золоторудных месторождениях разных типов.....	17
<i>Богати С.Р., Щербаков Г.Н., Рычков А.В.</i> Распознавание объектов по их радиолокационным спектрам с применением нейросетей	18
<i>Романов В.В., Иванов А.А.</i> Применение стохастической адаптивной фильтрации в георадиолокации.....	19
<i>Сахтеров В.И.</i> Георадары повышенной мощности	20
<i>Морозов П.А., Попов А.В., Прокопович И.В., Морозов Ф.П.</i> Годограф как инструмент георадарного зондирования (практический опыт решения инженерно-геологических задач)....	21
<i>Морозов П.А., Попов А.В., Прокопович И.В., Морозов Ф.П.</i> Результаты георадарных исследований в рамках геофизической поддержки экспедиций Государственного Эрмитажа и Института археологии РАН.....	22

Секция 3. Радиотехнические системы зондирования

<i>Чернышов А.А., Синевич А.А., Чугунин Д.В., Пулинец С.А., Клименко М.В., Панченко В.А., Котова Д.С., Могилевский М.М.</i> Радиозондирование как средство исследования поляризационного джета в ионосфере Земли	24
<i>Варенков В.В., Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А.</i> Обработка и визуализация георадарных данных в программе Grot.....	25
<i>Гулевич О.А., Волкомирская Л.Б., Каигородов Е.П., Варенков В.В.</i> Виртуальная скважина по данным глубинной георадиолокации.....	26
<i>Горкин Д.С., Аверин А.А., Пивторак А.А., Егоров А.П., Гайнулин А.Б.</i> Опыт применения георадиолокации в рудных шахтах полиметаллов	27

<i>Савватеев Я.В., Иляхин С.В., Корнилов Б.А.</i> Картирование отраженного сигнала георадиолокационного зондирования под действием фонового поля (поля подсветки)	28
<i>Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В.</i> Расчет резистивно-нагруженных дипольных антенн	29
<i>Колесников А.В., Федосов Д.В., Николаев А.В., Бекишиев Р.А.</i> Адаптация малогабаритной цифровой радиоаппаратуры средневолнового диапазона к экспедициям на Марсе	30
<i>Падохин А.М.</i> Новые сверхширокополосные сигналы GNSS в задаче радиопросвечивания ионосферы.....	31
<i>Акчурин А.Д., Хасанов Д.Ф., Санаев А.Л.</i> Выбор и испытания различных схем широкополосного антенного усилителя для короткоимпульсного ионозонда	32
Секция 4. Радиозондирование ионосферы	
<i>Крашенинников И.В., Шубин В.Н., Абуин А.А.</i> «Прогноз_ИЗМИРАН» – интегрированная система прогнозирования радиокоммуникаций в декаметровом диапазоне радиоволн	34
<i>Митин О.В., Крашенинников И.В.</i> Эффект терминаторной рефракции в измерениях фонового электромагнитного шума на частоте 5 МГц	35
<i>Капустина О.В.</i> Спутниковые наблюдения распространения ОНЧ-КНЧ радиоволн над Карибским бассейном	36
<i>Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А.</i> Исследование F – рассеяния по временным и амплитудным вариациям dFs в зависимости от солнечной активности по данным ионозонда вертикального зондирования DPS-4.....	37
<i>Носиков И.А., Тимченко А.В., Носикова В.В., Борчевкина О.П., Клименко М.В.</i> Исследование ионосферных эффектов во время геомагнитных и метеорологических событий по данным ионозонда «Парус-А»	38
<i>Телегин В.А., Зацепин А.Г., Мысленков С.А., Круглова Е.Е., Горбацкий В.В.</i> Измерения морских течений в районе Голубой бухты (г. Геленджик) с помощью доплеровского КВ радиолокатора Sea Sonde.....	39
<i>Романов И.В.</i> Перспективы радиозондирования ионосферы на высокоширотной орбите с высоты максимума области F	40
<i>Продан П.Е., Книжин С.И.</i> Применение SDR технологии для приема сигналов от низкоорбитальных спутников	41
<i>Сингин А.Н., Щирый А.О.</i> Постановка задачи, потенциальные возможности и предварительные результаты применения нейронных сетей для синтеза ионограмм радиозондирования ионосферы.....	42
<i>Зайцев А.А., Щирый А.О.</i> Извлечение доплеровских данных из файлов формата 16с ионозондов DPS	43
<i>Масюченко С.В., Щирый А.О.</i> Предварительные результаты применения методов сегментации изображений для выделения треков мод распространения радиосигнала на ионограммах радиозондирования ионосферы.....	44
<i>Крюковский А.С., Кутузова Б.Г., Растигаяев Д.В.</i> Моделирование амплитуды и доплеровского смещения частоты радиосигналов при распространении в ионосфере Земли.....	45
<i>Ким В.Ю.</i> О быстрой оценке доплеровского смещения частоты при вертикальном зондировании ионосферы	46

Секция 1.
Радиозондирование материальных сред в геофизике

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В РАЙОНАХ АКТИВНОГО ВУЛКАНИЗМА (КАМЧАТКА, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

Павлова В.Ю.¹, Акбашев Р.Р.²

¹ Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга,
Петропавловск-Камчатский, Россия

² Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия
verpavlova88@gmail.com

Одними из наиболее интересных и сложных регионов при использовании георадаров являются районы активного вулканизма. Существующий опыт использования георадаров в районах с активными вулканами невелик. Многие аспекты использования георадаров в вулканических районах остаются недостаточно изученными. Все это определяет актуальность темы. В данной работе представлены результаты многолетних исследований с помощью метода георадиолокации в районах активного вулканизма Камчатки, а также на острове Парамушир (Курильские острова). Благодаря методу георадиолокации возможно детальное изучение верхней части геологического разреза с определением мощностей слоев, а также выделение георадарных фаций, что вносит вклад в изучение процесса рельефообразования в районах активного вулканизма и в выяснение характера вулканической деятельности исследуемой области.

Данные исследования являются частью работ, направленных на реализацию общей цели – создание научно-методической основы метода георадиолокации применительно к Камчатке, включая методику обработки и интерпретации данных, с учетом практического опыта применения на различных объектах. Для оптимизации метода георадиолокации необходимо сопоставление и анализ результатов геофизических наблюдений в различных геологических условиях [1].

Работа выполнена в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и темы НИР «Применение метода георадиолокации на Камчатке» (КамГУ им. Витуса Беринга).

Литература

1. Павлова В.Ю. и др. Применение метода георадиолокации на Камчатке: монография. // М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2024, 144 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД РУДНОГО ШТАБЕЛЯ ЭЛЬКОНСКОГО ГМК

Свинобоев А.С.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН,
Якутск, Россия
jecson38@email.ru*

Круглогодичная эксплуатация рудного штабеля в зоне многолетней мерзлоты осложнена продолжительным зимним сезоном (7 месяцев). Циклы замерзания и оттаивания грунта приводят к деформации штабеля, что вызывает повреждение защитной геомембраны. Кроме того, неравномерное орошение является причиной образования прослоек льда внутри штабеля. В совокупности эти факторы снижают эффективность добычи. В настоящее время для контроля этих проблем применяют комплекс геофизических методов, таких как электrorазведка и георадиолокация [1-3].

Для определения электрофизических свойств образцов горных пород рудного штабеля была построена модель рудного штабеля и подготовлен щелочной раствор рН=9 для увлажнения горных пород имитирующий технологический раствор. Проведены лабораторные георадиолокационные и электrorазведочные измерения электрофизических параметров руды при различном криогенном состоянии

Установлено, что сухая руда, сухая мерзлая руда и влажная замороженная руда не имеют существенных различий в значениях скоростей распространения электромагнитных волн (0,160-0,168 м/нс), а расчетные диэлектрические характеристики распределены в диапазоне 3,2-3,4. Влажная руда в талом состоянии заметно отличается от вышеуказанных сред низкими значениями скорости распространения электромагнитных волн (0,110 м/нс) и высоким значением диэлектрической проницаемости – 7,4.

Результаты электrorазведочных измерений показали, что значения электросопротивлений в талой влажной руде составили 402 Ом^{*}м, а в мерзло-влажной 2740 Ом^{*}м.

Литература

2. Каймонов, М.В. и др. Моделирование теплового режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в холодном климате // Горная промышленность. – 2025. №1. С. 102-108. DOI 10.30686/1609-9192-2025-1-102-108.
3. Татаринов С.М и др. Применение кучного выщелачивания золота в условиях Крайнего Севера // Цветные металлы. 2010. Т. 11. С. 44–46.
4. Medina D. et al. A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates // Metals. 2020. V. 10. № 7. P. 897. DOI: 10.3390/met10070897.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ И ТИПА СТРОЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА Р. ЛЕНА С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА БОРТУ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Фёдоров М.П.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН,

Якутск, Россия

mpfedoroff@gmail.com

Для предупреждения чрезвычайных ситуаций, возникающих в результате образования опасных ледовых явлений (недостаточная грузоподъемность ледяного покрова, наледи, промерзание рек и ледовые заторы), необходима информация о толщине и типе строения ледяного покрова рек. В настоящее время для оперативного исследования ледяного покрова рек успешно применяется метод георадиолокации. По материалам георадиолокационных исследований ледяного покрова на участках р. Лена в районе г. Якутска выполнен анализ параметров волновых картин (форма осей синфазности отраженных волн, амплитуда и фаза отраженных волн) [1]. Определены признаки основных типов строения льда, такие как монолитный лёд, береговой лёд и торосовый лёд. Статистическая оценка вариации амплитуд отраженных волн от ледяного покрова позволила выявить характер однородности совокупности амплитудных значений в зависимости от типа строения льда. В результате разработан алгоритм обработки и интерпретации больших объёмов данных георадиолокации, позволяющий определить толщину и тип строения ледяного покрова рек. Усовершенствован алгоритм картографического отображения данных георадиолокации на базе ГИС. Алгоритм включает применение цветовой классификации значений толщины льда и маркировки основных типов строения ледяного покрова рек, что позволяет отобразить их пространственное распределение на картах [2].

Полученная информация о толщине и типе строения ледяного покрова рек может быть использована для организации инженерно-геофизических изысканий, эксплуатации ледовых переправ, составления прогнозов сроков вскрытия рек и определения затороопасных участков с целью безопасного пропуска весеннего половодья.

Литература

1. Фёдоров М.П. и др. Исследование строения ледяного покрова на затороопасных участках р. Лена методом георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 130–135.
2. Фёдоров М.П. и др. Карттирование различного строения ледяного покрова на затороопасном участке реки Лена методом георадиолокации // Гидрометеорология и экология. 2024. Вып. 74. С. 105–119.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ,
ПОЛУЧАЕМОГО ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
СЕВЕРНЫХ РЕК**

Шамаев С.Д.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирское отделение РАН,
Якутск, Россия
sha.sd@inbox.ru*

Холодные климатические условия России приводят к ежегодному формированию ледяного покрова на реках, сопровождающегося процессами, нередко вызывающими чрезвычайные ситуации. Для их предупреждения требуется информация о структуре ледяного покрова. Перспективным методом получения таких данных является георадиолокация с борта воздушных судов.

В последние годы для анализа радарограмм применяются искусственные нейронные сети [1-3]. Однако их использование осложнено необходимостью больших обучающих выборок, формирование которых в полевых условиях требует значительных ресурсов. Поэтому актуальна задача разработки математических моделей георадиолокационного волнового поля, позволяющих автоматически генерировать синтетические данные различных типов ледяного покрова.

В ходе исследования проведён анализ георадиолокационных данных участка р. Лена. На основе этого построены модели волнового поля для трёх основных типов льда: монолитного, берегового и торосового.

Разработанное программное обеспечение генерирует синтетические радарограммы с учётом параметров ледяного покрова. Апробация показала высокую степень соответствия с полевыми данными: коэффициент корреляции составил 0,96 для монолитного и берегового льда и 0,86 для торосового.

Литература

1. Lameri S. et al. Landmine detection from GPR data using convolutional neural networks // Proc. 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). 2017. P. 508–512. DOI: 10.23919/EUSIPCO.2017.8081259.
2. Xiang Z. et al. An improved convolutional neural network system for automatically detecting rebar in GPR data // Proc. ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering. Atlanta, Georgia. 2019. P. 422–429. DOI: 10.1061/9780784482438.054.
3. Верховцев Л.Р. и др. Автоматизация поиска границ раздела сред на георадарных данных с помощью искусственных нейронных сетей // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. Т. 14. №1. С. 16–18.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ПОИСКОВ МАМОНТОВОЙ ФАУНЫ И ИЗУЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИСТОРИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Прудецкий Н.Д.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирское отделение РАН,
Якутск, Россия
ndprudetskii@mail.ru*

В последние десятилетия георадиолокация (ГРЛ) зарекомендовала себя как один из наиболее перспективных неразрушающих методов изучения подповерхностных объектов [1]. В рамках экспедиции «Новосибирские острова – форпост России» (2019 г.), организованной Академией наук РС(Я) и Русским географическим обществом (РГО), был осуществлён комплексный поиск останков мамонтовой фауны на о. Котельный. Использование метода георадиолокации позволило построить цифровые карты местности, определить границы погребённых объектов и локализовать перспективные участки для раскопок.

В ходе полевых исследований на байджерахах были зафиксированы аномальные зоны, выделенные отраженными георадиолокационными сигналами, подтвердившие наличие костных остатков. Совмещение метода ГРЛ с традиционными поисковыми приёмами (щуповые работы) обеспечило успешную верификацию находок и позволило оптимизировать дальнейшие раскопки. Отдельным направлением работ стало применение георадиолокации для поиска захоронений участников Никольского сражения (Намский район, с. Никольцы). Полученные данные позволили выделить контуры структурных неоднородностей, предположительно связанных с оборонительными сооружениями. Однако для окончательной атрибуции обнаруженных объектов требуется дополнительная археологическая проверка [2].

Показана высокая эффективность георадиолокации в археологии и палеонтологии. Метод позволяет существенно повысить точность поиска, минимизировать затраты и снизить риск разрушения исторических и природных объектов. В перспективе дальнейшее развитие георадиолокационных технологий обеспечит более широкое их применение для сохранения историко-культурного наследия и изучения древней фауны.

Литература

1. Zajícová K. et al/ Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review // Geoderma. 2019, V. 343. P. 116–129.
2. Modern directions of application of ground-penetrating radar // Moscow University Geology Bulletin. 2018, V. 73. P. 219–228.

ВЫЯВЛЕНИЕ ТАЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ МАССИВЕ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Куляндин Г.А.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия
kgavriliu@yandex.ru

Представленные данные георадиолокационных исследований геокриологических условий получены на территории Северной части Якутской алмазоносной провинции зимой. Район расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощность которых превышает 350 м. Для площадного георадиолокационного обследования представлен вскрышной блок, находящийся вблизи инженерно-технических сооружений, техногенное воздействие которых на прилегающую территорию привело к растеплению и даже оттайке многолетнемерзлых горных пород.

Для определения строения и криогенного состояния горных пород невскрытого участка работы выполнены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком «АБ-250М» (НПО «Логис-Геотех», Россия). Талые участки в массиве многолетнемерзлых пород на волновом поле определены по двум признакам: повышение амплитуды отраженных сигналов; смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкочастотную область [1]. В результате талые породы обнаружены по семи профилям. При этом прослеживаются как минимум четыре потенциальные зоны обнажения талых пород по борту. По данным георадиолокации площадь талых пород составила около 1600 кв. м. Для подтверждения данных георадиолокационного исследования участок дополнительно обследован бурением скважин.

Показано, что применение георадиолокации позволяет получить оперативную информацию о криогенном состоянии горных пород на разрабатываемых месторождениях и в зоне техногенного воздействия инженерно-технических объектов.

Литература

1. Федорова Л.Л. и др. Определение участков талых пород в многолетнемерзлом массиве по данным георадиолокации // Успехи современного естествознания. 2023. №11. С. 192-198. – DOI 10.17513/use.38163.

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЮННЫХ МАССИВОВ МАХАТТА И КЫСЫЛ-СЫР (ЯКУТИЯ)

Едемский Д.Е.¹, Прокопович И.В.¹, Попов А.В.¹, Лыткин В.М.²

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия*

²*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
prokop21@mail.ru*

В работе представлены результаты георадиолокационного исследования дюнных массивов (тукуланов) Махатта и Кысыл-Сыр – уникальных геологических образований в бассейне нижнего течения р. Вилюй. В исследовании применен метод георадиолокации с использованием импульсного георадара «Лоза-В», укомплектованного резистивно-нагруженными антеннами с центральной частотой 50, 150 и 250 МГц. Получены георадарные профили, которые характеризуют строение песчаных отложений и определены границы надмерзлотных субаэральных таликов. Анализ амплитуды и полярности сигнала, а также наличие зон «реверберации» позволил выделить места разгрузки подземных вод и идентифицировать влагонасыщенные горизонты. Проведена площадная съемка дюнного массива и выполнена 3D визуализация георадарных данных, что позволило детально изучить пространственную структуру песчаных отложений.

В долине ручья Кысыл-Юрях на глубине ~10 м выявлены палеорусла, которые интерпретируются как погребенные тальвеги, заполненные песчано-гравийно-галечным аллювием. В дюнном массиве Кысыл-Сыр выделен надмерзлотный талик шириной 550 м и глубиной залегания от 13 до 32 м. Он формирует каналы миграции подземных вод и разгружается в основании обрыва дюнного массива. Выполнено зондирование методом общей глубинной точки (ОГТ) и определены скорости распространения радиоволн в песчаных отложениях. Они изменяются в диапазоне от 13 до 14,7 см/нс. Сопоставлены результаты георадарного обследования с ранее выполненными исследованиями методом электротомографии.

Результаты исследований свидетельствуют о перспективности применения метода георадиолокации в комплексе с геологическими методами исследований для изучения строения песчаных отложений в зоне распространения многолетнемерзлых пород при решении инженерно-геокриологических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 22-12-00083-П).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА В ДОЛИНЕ Р. ВИЛЮЙ (ЯКУТИЯ)

Едемский Д.Е.¹, Лыткин В.М.², Прокопович И.В.^{1,3}

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
prokop21@mail.ru

Отложения ледового комплекса (ЛК) широко распространены на территории криолитозоны России. Такие отложения характеризуются наличием повторно-жильных льдов, которые образуют полигональную решетку из пересекающихся вертикальных ледяных жил шириной 2–6 м и протяженностью в десятки метров. В горизонтальном разрезе они имеют конфигурацию полигональной сетки, чаще всего четырехугольной, поперечник которой составляет 5–25 м. Пространство между ледяными жилами заполняют грунтовые столбы. Обычно они имеют высокую льдистость, поэтому суммарная объемная льдистость всей толщи ЛК достигает 80–90%.

В работе представлены предварительные результаты полевых георадарных исследований ЛК на трех участках в долине нижнего течения р. Вилуй. При съемке использовался импульсный георадар повышенной мощности «Лоза-В», центральная частота импульса – 50, 150 и 250 МГц. Цель работы состояла в определении с помощью георадиолокационного зондирования положения и ширины ледяных жил ЛК, залегающих в неоднородных по составу и льдистости отложениях. Задача осложнялась тем, что покровный слой имел большой разброс по глубине, гранулометрическому составу и влажности.

В результате проведенных исследований получены данные о условиях залегания и строения ЛК в обнажении Тыалычымы и на двух участках Хомустахского обнажения. Методом георадиолокации исследованы разрезы мерзлых пород с полигонально-жильными льдами разного размера и возраста, залегающих в неодинаковых по составу и льдистости отложениях. Уточнены критерии локализации ледяных жил, залегающих в сложных гетерогенных средах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 25-27-00208, <https://rscf.ru/project/25-27-00208/>).

Секция 2.
Радиолокация малой дальности

ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕРАЗОРВАВШИХСЯ БОЕПРИПАСОВ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ

Нгуен В.К.¹, Николаев А.В.²

¹ Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

² Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

v.k.nguen@edu.mtuci.ru

Очистка территорий, загрязнённых неразорвавшимися боеприпасами (НРБ), остаётся критически важной задачей для Вьетнама, где после войны сохранились миллионы таких объектов. Окисленные элементы корпуса НРБ формируют выраженный нелинейный отклик на третьей гармонике зондирующего СВЧ-сигнала, что открывает возможности дистанционного обнаружения отклика методом нелинейной радиолокации.

В работе представлен метод нелинейной радиолокации, основанный на регистрации вторичного излучения на третьей гармонике. Для анализа использованы трёхмерные модели НРБ (мина M19, миномётный снаряд M720, кассетная бомба BLU-26), которые содержатся в грунтовых и лесных массивах Вьетнама. Выполнено численное моделирование угловых диаграмм рассеяния СВЧ-сигнала моделей НРБ методом моментов в среде FEKO, а также представлены натурные радиоизмерения в безэховой камере. Уровень вторичного излучения НРБ оценивался относительно мощности, рассеянной линейным объектом с эффективной поверхностью рассеяния 1 м^2 .

Результаты исследования:

- относительный уровень вторичного излучения НРБ на третьей гармонике зондирующего СВЧ-сигнала варьируется от -12 до -32 дБм², что достаточно для надежного обнаружения объекта на дальности до 20 м;
- совпадение результатов численного моделирования и натурного эксперимента составило ≤ 3 дБ, что подтверждает адекватность модели, описывающей процесс рассеяния зондирующего СВЧ-сигнала на третьей гармонике.
- угловые диаграммы рассеяния СВЧ-сигнала на третьей гармонике позволяют не только фиксировать присутствие объекта в зоне действия радара, но и классифицировать его по-откликам, полученным радарами с разных ракурсов.

Полученные результаты подтверждают эффективность метода нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения и идентификации НРБ. Метод обладает высоким потенциалом для аппаратной реализации в безопасных машинах, что значительно повысит эффективность очистки территорий, загрязнённых НРБ, во Вьетнаме.

ГЕОРАДАРНЫЕ РАДИООБРАЗЫ НА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РАЗНЫХ ТИПОВ

Горкин Д.С.¹, Аверин А.А.¹, Пивторак А.А.², Егоров А.П.³

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пущкова РАН, Москва, Троицк, Россия*

²*Deep GPR RC, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*«ГеоЭкспертКонсалт», Усть-Каменогорск, Казахстан*

gorkin@izmiran.ru

При поиске золоторудных месторождений и других коренных типов рудных тел методами электроразведки на территориях с плохим контактным заземлением пески, скальный породы, курумники, мерзлые грунты и так далее в отличии от классических ВЭЗ-ВП используются георадарный бесконтактный метод, который дает более корректные стабильные измерения и в некоторых моментах дает лучшие результаты.

Накоплен за 15 лет определенный опыт и выявлены повторяющиеся типы радиообразов связанные с рудными зонами и локальными объектами, представленными ниже. Данные были собраны георадарами серии ЛОЗА, ГРОТ, ЭХО СФЕРА. Глубины составили от первых метров, где хорошо видны локальные структуры и до 300 метров где видны нарушенные зоны связанные с выходом флюидных потоков которые насыщали вмещающие породы рудных зон.

Например за счет высокого разрешения по глубине и горизонту можно различать геологические структуры связанные с кварц жильными образованиями, выявлять зоны контактов разных пород, определять зоны тектоники, различать породы разных типов и выявлять зоны увлажненности и повышенной минерализации. Так, что при измерениях верхней части разреза на средних частотах первые десятки метров выявляющий структуры понятной для геологов. На низких частотах с мощными передатчиками на глубины до сотен метрах, получаем информацию о разрывных структурах, зонах контактов, связанной с рудной зоной то есть при разведке одним георадарным методом повышает вероятность обнаружения рудных тел.

Литература

1. Аверин А.А., Горкин Д.С., Варенков В.В., Сахтеров В.И. Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024 Т. 29. №3 С.49-58.
2. Аверин А.А., Антипов В.В., Горкин Д.С., Копейкин В.В., Смирнов Д.А., Пивторак А.А., Сахтеров В.И. Развитие глубинной георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 62–75.

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ СПЕКТРАМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

Богати С.Р., Щербаков Г.Н., Рычков А.В.

Общевойсковая академия Вооруженных сил РФ им. М.В. Фрунзе, Москва, Россия
bogati93@gmail.com

Существенной особенностью ИНС выступает их способность к обучению, а не программированию в классическом понимании – обучение заключается в определении значений весовых коэффициентов синаптических связей между нейронами, что дает возможность нейросети выявлять сложные взаимосвязи между входными сигналами и результирующими данными.

Каждая из спектрограмм представляет собой матрицу доплеровских спектров, в которой горизонтальный уровень соответствует дальности от радиолокатора в дискретах измерения. Примерная структурная схема нейросети обработки спектрограмм сигналов приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема алгоритма обработки радиолокационных спектрограмм сигналов, отражённых от объектов.

Литература

1. Ермоленко В.П. и др. Учет вида зондирующего сигнала и архитектурных особенностей радиолокационных целей при определении потенциальных возможностей их распознавания. // Зарубежная радиоэлектроника, № 11. 1996. С. 73-76.
2. Yu Shi, Xian-Da Zhang. "A Gabor Atom Network for Signal Classification With Application in Radar Target Recognition". // IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 49, No. 12 Dec. 2001. [Электронный ресурс] URL: https://www.researchgate.net/publication/3318172_A_Gabor_atom_network_for_signal_classification_with_application_in_radar_target_recognition (дата обращения: 10.02.2022).
3. Zurada J. Introduction to artifical Neural Systems. St. Paul, NY. 1992. 764 p.
4. Барабаш Ю.Л. и др. Вопросы статистической теории распознавания / Под ред. Б.В. Барского. М.: Сов. радио, 1967. 400 с.
5. Горелик А.Л. и др. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. Горелика А.Л. М.: Радио и связь, 1990. 240 с.

ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Романов В.В., Иванов А.А.

*Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия
biwolf@mail.ru*

Качество данных георадиолокации в значительной степени зависит от интенсивности коррелированных помех. Их источники носят многофакторный характер. В первую очередь это прямая волна, как наложение воздушной и грунтовой волны [1]. Подавление подобных помех является критически важным этапом обработки.

Авторами был предложен алгоритм адаптивной стохастической фильтрации для подавления коррелированных помех. Его преимущество — отсутствие необходимости знать форму импульса помехи, что позволяет эффективно работать с нестационарными сигналами. Основная идея заключается в предположении, что помеха коррелирована и ее уровень превышает амплитуды прямой и последующих волн и ее можно выделить фильтром воспроизведения [2] и вычесть из исходных данных.

Основные этапы алгоритма: предварительное выравнивание амплитуд с помощью степенной кривой усиления ($n=1,5-2,5$) для уменьшения динамического диапазона; расчет энергетического спектра каждой трассы, который аппроксимирует спектр помехи; построение адаптивного фильтра воспроизведения на основе нормированного энергетического спектра; частотная фильтрация и обратное преобразование Фурье; вычитание результата фильтрации из исходной записи. При реализации адаптивного вычитания обработчик подбирает только два параметра — показатель степенного закона усиления и стабилизирующий коэффициент фильтра.

Для данных георадиолокации отмечается существенное подавление «звона» различного генезиса, расширение спектра сигнала и повышение вертикального разрешения.

Предложенный алгоритм показал превосходство над традиционными методами (вычитание среднего, полосно-заграждающие фильтры, деконволюция) в эффективности подавления интенсивных коррелированных помех.

Литература

1. Galagedara L. W. et al. An analysis of the ground-penetrating radar direct ground wave method for soil water content measurement //Hydrological processes. 2003. V. 17. № 18. P. 3615-3628.
2. Jeng Y. et al. Adaptive filtering of random noise in near-surface seismic and ground-penetrating radar data //Journal of Applied Geophysics. 2009. V. 68. № 1. P. 36-46.

ГЕОРАДАРЫ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Сахтеров В.И.

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

akhterov@ipg.geospace.ru

Первые эксперименты по радиозондированию окружающей среды были проведены в СССР в 1924 году, под руководством Алексея Алексеевича Петровского в Институте прикладной геофизики имени профессора В.И. Баумана (ныне ЦНИГРИ). Он первым применил технологию радиопросвечивания для определения залегания многолетнемёрзлых горных пород.

В Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР в 80-е годы группой энтузиастов – Гайданский В.И., Гарбацевич В.А., Копейкин В.В. и др. – проводились эксперименты по разработке аппаратуры для исследования ионосферы с условием минимизации времени вертикального зондирования. Был разработан передатчик, формирующий широкополосный сигнал амплитудой свыше 50 кВ. Копейкин В.В. предложил использовать мощный передатчик на газонаполненном разряднике для подповерхностного радиозондирования, при этом средняя мощность снижалась до единиц Вт. Регистрация сигнала производилась последовательно и для повышения динамического диапазона применено прямое усиление сигнала с антенны.

В 1990 году был сделан первый работающий макет георадара «Грот», с 2000 года выпуск под маркой «Грот» продолжил ООО «Таймер» [1], георадары под маркой «Лоза» с 2001 года начала производить ООО «Компания ВНИИСМИ» [2].

Разработкой экспериментальных георадаров занимается сектор научного приборостроения ИЗМИРАН [3]. Ведется большая исследовательская работа, в том числе совместно с другими лабораториями института по разработке антенн для георадаров различного назначения.

Литература

1. Волкомирская Л.Б. и др. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы 2012. №5. С.3-5.
2. Попов А.В. и др. Глубинный георадар: принципы и применение // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. №4. С. 28-36.
3. Аверин А.А. и др. Развитие глубинной георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. №3. С. 62-75.

ГОДОГРАФ КАК ИНСТРУМЕНТ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ)

Морозов П.А.¹, Попов А.В.¹, Прокопович И.В.¹, Морозов Ф.П.^{1,2}

¹Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

²ООО «Компания ВНИИСМИ», Москва, Россия

pmoroz5@yandex.ru

Существуют два основных способа георадарной съемки: «профилирование» и «зондирование». При профилировании радар перемещается вдоль трассы, при каждом измерении передающая и приемная антенны находятся на фиксированном расстоянии и в одной точке трассы. При зондировании выбирается одна точка трассы, на которой проводится ряд регистраций отраженных сигналов с пошаговым разносом антенн передатчика и приемника. В результате получается годограф – функция времени задержки отраженных сигналов от расстояния между передающей и приемной антеннами [1,2].

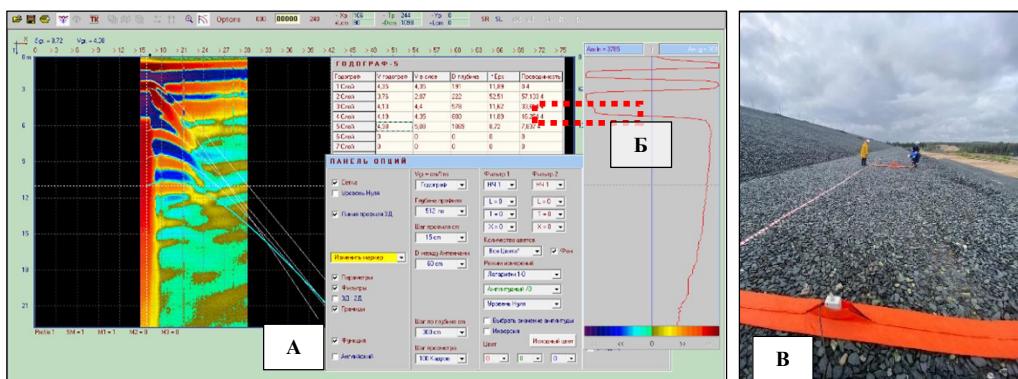


Рис. 1. Измерение скорости по годографу: [А] – панель «Годограф» в программе «Крот», (В) – (фото), процесс съемки годографа, [Б] – таблица расчетов.

Пример обнаружения аномального водонасыщенного горизонта в теле грунтовой плотины приведен на рис.1. Применение зондирования (построение годографа) позволяет расширить круг задач, решаемых георадиолокацией. Годограф позволяет интерпретировать георадарные данные в тех случаях, когда невозможно провести заверочное бурение.

Исследования проводятся в рамках гранта РНФ № 22-12-00083-П.

Литература

1. Владов М.Л. и др. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. М. МГУ, 1999, 92 с.
2. Копейкин В.В. Обратная задача георадиолокации. Loza-Textbook-Part5(RUS), ООО «Компания ВНИИСМИ», Москва, 2017.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАМКАХ
ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКСПЕДИЦИЙ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭРМИТАЖА И ИНСТИТУТА
АРХЕОЛОГИИ РАН**

Морозов П.А.¹, Попов А.В.¹, Прокопович И.В.¹, Морозов Ф.П.^{1,2}

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия*

²*ООО «Компания ВНИИСМИ», Москва, Россия*

pmoroz5@yandex.ru

Группа специалистов, участвующих в выполнении гранта РНФ № 22-12-00083-П «Глубинный георадар: теория, методы, эксперимент», продолжила в 2025 году теоретические и экспериментальные исследования диаграмм направленности и радиообразов подземных объектов. Были выполнены обследования по заявкам на геофизическую поддержку экспедиций Эрмитажа и Института археологии РАН в Крыму [1,2].

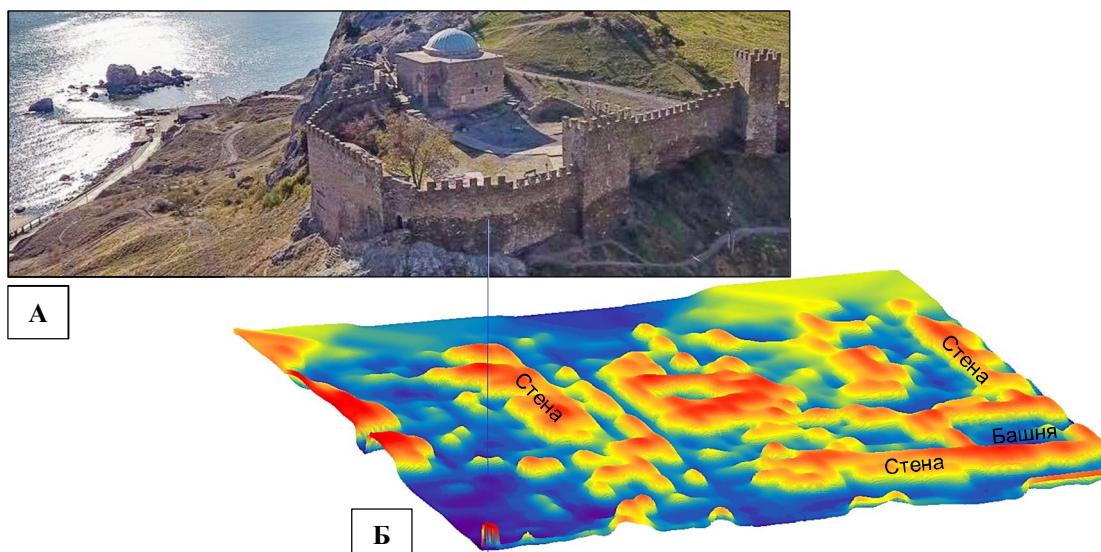


Рис. 1. Аэто Генуэзской крепости в Судаке (крепости построены примерно в XIV в. н.э.) [А] и Георадарное 3Д сечение восточной части крепости в Тихой бухте (Коктебель) [Б].

В докладе приведены результаты обследования средневековой крепости в Тихой бухте (рис. 1), некрополя на озере Чокрак и крепости Илурат (Крым), Склепа Сурхай-хана-1 (Дагестан).

Литература

1. Morozov P. et al. Characterization of GPR radiation pattern in the upper and lower hemisphere (theory and experiment) // GPR 2024, Chanchun, China, 06, 2024.
2. Морозов П.А. и др. Диаграмма направленности георадарного сигнала и радиообразы подземных объектов. // Доклад на конференции РРВ-29, 30.06 – 04.07.2025, г. Казань.

Секция 3.
Радиотехнические системы зондирования

РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

**Чернышов А.А.¹, Синевич А.А.^{1,2}, Чугунин Д.В.¹, Пулинец С.А.¹,
Клименко М.В.³, Панченко В.А.², Котова Д.С.⁴, Могилевский М.М.¹**

¹ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

³ Калининградский филиал Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова, Калининград, Россия

⁴ Университет Осло (UiO), Осло, Норвегия
achernyshov@cosmos.ru

Поляризационный джет (ПД) представляют собой узкие ($\sim 1^\circ$ – 2° шириной) и протяжённые по долготе структуры, возникающие в субавроральной зоне в вечерние иочные часы при геомагнитных возмущениях. Скорости плазмы могут достигать нескольких км/с, а неоднородности плазмы варьируются от десятков до сотен метров, вызывая отражения и искажения радиосигналов. Изменения параметров плазмы в ПД могут приводить к сильным скачкам фазы и даже потере сигналов спутников ГНСС, ухудшая качество радиосвязи и навигации. Для комплексного исследования применён мультиинструментальный подход, объединяющий данные наземных ионозондов, карты изменения полного электронного содержания и спутниковую информацию с аппаратов Swarm, DMSP, NorSat-1. ПД проявляются на ионограммах ионозондов как резкое снижение критической частоты и локальной электронной плазменной частоты, а также исчезновение или расщепление следа F-слоя. Эти эффекты связаны с пониженнной электронной плотностью, что приводит к прохождению зондирующего сигнала без отражения в пределах полосы ПД. Также в настоящей работе впервые представлен анализ ПД с использованием данных ионозонда ЛАЭРТ на борту спутника «Ионосфера-М». До этого момента прямых наблюдений ПД с помощью бортового ионозонда не проводилось.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059).

ОБРАБОТКА И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ В ПРОГРАММЕ GROT

Варенков В.В.¹, Волкомирская Л.Б.¹, Гулевич О.А.^{1,2}

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия*

²*ООО «Таймер», Москва, Россия*

gprsoft@yandex.ru

Для интерпретации геофизических данных, полученных георадаром при проведении полевых работ, полезно иметь набор качественных инструментов [1]. Разработанные алгоритмы программной обработки полевых георадарных измерений используются для извлечения целевой полезной информации с учетом специфики методики измерений, а также их последующего анализа и представления в удобном формате.

Большое практическое значение в процессе интерпретации имеет визуализация [2]. В докладе представлены методы обработки и визуализации данных, реализованные в программе Grot [3], на примере обработки данных георадаров серии ГРОТ 12. Показано, как комплексная обработка данных для набора профилей позволяет выявлять геологогеофизические элементы в подповерхностном пространстве с последующим представлением результатов в различных системах автоматизированного проектирования (САПР), в том числе AutoCAD и в Micromine. Создание 3D образов, полученных георадаром, наглядно показывает пространственное расположение обнаруженных объектов и зон аномалий. На рис. 1 показаны примеры визуализаций данных в программе Grot.

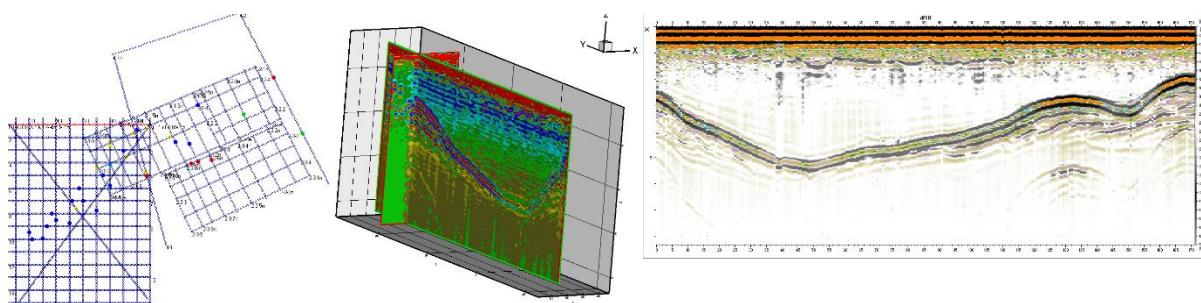


Рис. 1. Примеры визуализаций данных в программе Grot.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. // Под ред. А.Ю. Гринёва. М: Издательство «Радиотехника», 2005.
2. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2008. 192 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668672 от 31.08.2023 г. Название: Grot. // Варенков В.В., Волкомирская Л.Б.

ВИРТУАЛЬНАЯ СКВАЖИНА ПО ДАННЫМ ГЛУБИННОЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Гулевич О.А.^{1,2}, Волкомирская Л.Б.¹, Кайгородов Е.П.³,
Варенков В.В.¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия

²ООО «Таймер», Москва, Россия

³Научно-Аналитический Центр Рационального Недропользования им. В.И. Шпильмана,
Тюмень, Россия
oxana.gulevich@mail.ru

В докладе представлены результаты обработки экспериментальных исследований методом отраженных электромагнитных волн с общей глубинной точкой (МОЭМВ-ОГТ) в Мирнинском районе, Якутия. Скоростной анализ данных полученных полевых годографов позволил перейти от качественных оценок свойств горных пород к количественным на глубинах в сотни метров. По результатам скоростного анализа и на основе теории распространения электромагнитных волн в диссипативных средах построена зависимость УЭС от глубины – виртуальная скважина глубиной более 500 метров с шагом 2-5 метров [1,2]. Построение виртуальной скважины не требует применения априорных структурных моделей и методов инверсии, применяемых в электроразведке, что обеспечивает высокое пространственное разрешение и способствует повышению достоверности геолого-геофизических моделей. Достоверность виртуальной скважины подтверждена на нефтегазовом участке недр бурением и геокриологической информацией. Новая, альтернативная всем традиционным геофизическим методам методика исследования подповерхностного пространства актуальна для повышения эффективности геологоразведочных работ, изучения геокриологических условий, определения характера насыщения коллекторов, выявления аномалий и объектов, малоконтрастных по электрическим свойствам ко вмещающим породам.

Литература

1. Гулевич О.А. и др. Опыт кинематической интерпретации данных глубинной георадиолокации // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 4. С. 523–528. DOI: 10.15372/GIG2024162.
2. Гулевич О.А. и др. Оценка электрических свойств горных пород на основе скоростного анализа данных метода отраженных электромагнитных волн (МОЭМВ-ОГТ) // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Т. 25. ES1003. DOI: 10.2205/2025es000933.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В РУДНЫХ ШАХТАХ ПОЛИМЕТАЛЛОВ

Горкин Д.С.¹, Аверин А.А.¹, Пивторак А.А.², Егоров А.П.³,
Гайнулин А.Б.⁴

^{1,2} Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

² Deep GPR RC, Санкт-Петербург, Россия

³ ТОО «ГеоЭкспертКонсалт», Усть-Каменогорск, Казахстан

⁴ ТОО «Востокцветмет». Казминералс, Усть-Каменогорск, Казахстан

gorkin@izmiran.ru

На современном этапе развития горнопромышленной отрасли одной из актуальных задач является обеспечение безопасного ведения горных работ. Особую важность данная задача приобретает, когда речь идет о строительстве и эксплуатации объектов, расположенных на территориях подземной отработки месторождений, где обеспечение безопасности требует знаний о физических свойствах грунтов, не только подстилающих фундамент, но и распространяющихся до глубины выработанного пространства, о том, что приводит к деформации земной поверхности и, следовательно, к природно-техногенным катастрофам.

Цель работ – получение неразрушающим методом с помощью измерений глубинными георадаром геофизической информации о подповерхностных аномалиях и грунтах на территории объектов до глубин 50 метров, а именно:

- Определение однородности массива
- Определение структуры грунтов.
- Локализация подземных полостей
- Локализация зон трещиноватости.

Литература

1. Аверин А.А., Антипов В.В., Горкин Д.С., Копейкин В.В., Смирнов Д.А., Пивторак А.А., Сахтеров В.И. Развитие глубинной георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 62–75.

КАРТИРОВАНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФОНОВОГО ПОЛЯ (ПОЛЯ ПОДСВЕТКИ)

Савватеев Я.В.¹, Иляхин С.В.², Корнилов Б.А.³

¹ Институт физики Земли-РАН им. О. Ю. Шмидта, Москва, Россия

² Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

³ Научно-технический кооператив «Диоген», Москва, Россия
savvateev-yar@yandex.ru

Разрешающая способность метода определяется различимым расстоянием между частотными пиками в координатах ось частот – спектральная плотность. Важные осложняющие факторы при применении георадиолокационного зондирования при картировании отраженного сигнала являются волна прямого прохождения между приемной и передающей антеннами, либо кратные волны (рис. 1). Однако разрешающую способность есть возможность повысить действием фонового поля (поля подсветки), представляющего собой наложение электромагнитного поля на поле отраженного сигнала георадара, действующее аналогично операции деконволюции по отношению к отраженному сигналу. Под воздействием фонового поля и смещения спектра в сторону высокочастотной составляющей проявляются дифракционные волны над локальными объектами (представляющими собой объекты поиска - кристаллы в модели породы).

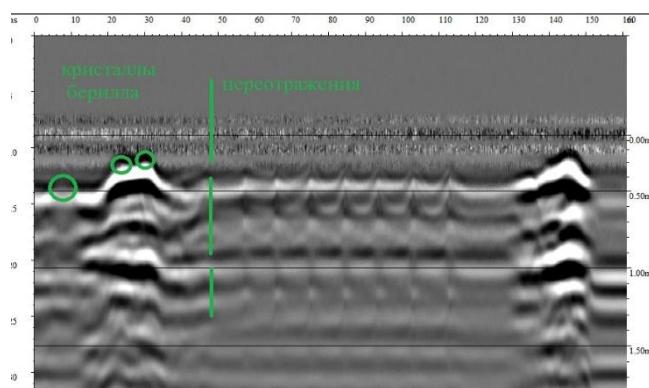


Рис. 1. Запись радарограммы профиля георадиолокационного зондирования при действии генератора фонового поля.

Литература

1. Разевиг В.В. и др. Применение голографических подповерхностных радиолокаторов для обследования и диагностики конструкционных материалов // Тр. III Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». — Москва, 2009. Т. 1. С. 173-177.

РАСЧЕТ РЕЗИСТИВНО-НАГРУЖЕННЫХ ДИПОЛЬНЫХ АНТЕНН

Смирнов Д.А., Сахтерова Т.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия

dsmirnov@izmiran.ru, sahterova@izmiran.ru

Развитие импульсной глубинной георадиолокации требует применения антенн, способных эффективно излучать сверхширокополосные сигналы высокой мощности без возникновения паразитных автоколебаний. Оптимальным решением являются резистивно-нагруженные дипольные антенны (РНДА). Разработана программа расчета сопротивлений РНДА с различными характеристиками затухания, возможностью графического представления результатов и их дальнейшего использования при изготовлении антенн для георадаров. В основе программы лежит расчет двух законов распределения сопротивлений вдоль вибратора: экспоненциального и линейного. Для экспоненциального закона реализована формула (1):

$$R_i = R_0 \cdot k^{is} \quad (1)$$

где:

R_i – сопротивление i -го резистора (Ом);

R_0 – начальное сопротивление первого резистора (Ом);

k – коэффициент роста, подбираемый итерационно так, чтобы сумма ряда сопротивлений соответствовала заданному общему сопротивлению антенны;

s – параметр резкости;

i – номер резистора.

Программа расчета РНДА позволяет сократить время и затраты на разработку антенн для импульсных георадаров средней и повышенной мощности.

Исследование выполнено при финансировании ООО «НПО РГР» и при частичной финансовой поддержке грантом РНФ № 22-12-00083-П.

Литература

1. Аверин А.А. и др. Увеличение глубины зондирования импульсного георадара путем снижения импеданса антенны // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. №3 С. 49–58.
2. Аверин А.А. и др. Развитие глубинной георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. №3. С. 62–75.

АДАПТАЦИЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА К ЭКСПЕДИЦИЯМ НА МАРСЕ

Колесников А.В.¹, Федосов Д.В.¹, Николаев А.В.², Бекишев Р.А.¹

¹НПООО «КВ-СВЯЗЬ», Омск, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

alarmoren@yandex.ru

Современные программы изучения планет активно используют методы наземного радиозондирования. Наземные радиостанции спутниковой, мобильной и космической связи, а также системы радиолокации и дальней радиосвязи обеспечивают выполнение задач навигации и голосовой связи научных экспедиций и автономных аппаратов. Тем не менее высокая эффективность таких радиотехнических систем в первую очередь обусловлена спецификой атмосферных условий Земли.

Радиоволны с частотой от 30 МГц до 20 ГГц практически свободно проходят сквозь атмосферу Земли, что сделало их основой современной спутниковой связи и глобальных телекоммуникаций. В отличие от них низкочастотные диапазоны (<30 МГц) подвержены сильному влиянию ионосферы, зависящей от солнечной активности.

При подготовке к исследованию Марса одной из инженерных задач может быть адаптация малогабаритной цифровой радиоаппаратуры средневолнового диапазона, доказавшей свою надежность в земных условиях, включая шахты и рудники.

Марс обладает атмосферой, способной создавать аналоги земных ионосферных каналов связи. Исследования показывают, что плазменные частоты основных слоёв марсианской ионосферы (M1, M2, M3) существенно ниже, чем на Земле, варьируясь днем от 0,9 до 9 МГц, а ночью – от 40 кГц до 1,4 МГц. Это открывает возможность интеграции цифровой аппаратуры, такой как аппаратура связи FERRA, для автоматического мониторинга состояния марсианской атмосферы и увеличения надежности связи за пределами прямой видимости.

Совмещение функций связи, навигации и зондирования в малогабаритной цифровой радиоаппаратуре сокращает затраты на создание специализированной инфраструктуры связи и мониторинга для научных экспедиций на Марс.

НОВЫЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ GNSS В ЗАДАЧЕ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Падохин А.М.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия
padokhin@izmiran.ru*

Многие десятилетия кодовые измерения сигналов GNSS были значительно более шумными, чем фазовые, что ограничивало их применимость для исследований полного электронного содержания (ТЕС) ионосферы. Сверхширокополосные сигналы AltBOC изменили ситуацию.

В данном докладе рассматриваются сигналы AltBOC Galileo E5 и BeiDou B2 и их применение для одночастотной оценки ТЕС. Показано, что шумы ТЕС сравнимы для одночастотной фазово-кодовой комбинации, использующей сигналы AltBOC, и для двухчастотной фазовой комбинации BPSK/QPSK сигналов, в то время как шумы ТЕС для одночастотной комбинации сигналов BPSK/QPSK значительно выше. Кроме того, отношение сигнал/шум (SNR) для AltBOC сигналов (как BeiDou, так Galileo) превышает SNR для BPSK/QPSK на 7,5 дБ-Гц в условиях отсутствия возмущений. Тем не менее радиочастотные помехи во время двух солнечных радиовсплесков, рассмотренных в докладе, сильнее влияют на SNR сигналов AltBOC, чем на SNR сигналов BPSK/QPSK. В настоящий момент в орбитальных группировках BeiDou и Galileo, достаточно спутников, передающих сигналы AltBOC, для надежной оценки абсолютного ТЕС на одной частоте, что может положительно повлиять на обеспеченность данными ионосферных наблюдений.

ВЫБОР И ИСПЫТАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ШИРОКОПОЛОСНОГО АНТЕННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ИОНОЗОНДА

Акчурин А.Д., Хасанов Д.Ф., Сапаев А.Л.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия
adel.akchurin@kpfu.ru

Выбор схемы широкополосного антенного усилителя (ШАУ) для короткоимпульсного (30-100 мкс) ионозонда довольно трудная задача, т. к. у него возможности для когерентного накопления 500-1000 мкс радиосигнала, как у длинноимпульсных и ЛЧМ-ионозондов. Нужно учитывать, что КВ-диапазон значительно перегружен нетепловым шумом индустриального и радиовещательного происхождения. Это ограничивает использование малошумящих транзисторов во входных каскадах ШАУ, ввиду их небольшого выходного тока и, следовательно, потенциальной опасности появления нелинейных искажений, связанных с перегрузками из-за сильных КВ-помех. В настоящий момент типовыми решениями для ШАУ являются готовые минимодули на микросхемах Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) и схемы на дискретных транзисторах с бесшумной трансформаторной обратной связью (БТООС). С принципами построения минимодулей на основе MMIC-микросхем можно познакомиться в [1] (на примере серии MAR-x), а с усилителями с БТООС – в [2] (правда, под другим названием – как усилителя типа А).

В полевых испытаниях в работе короткоимпульсного ионозонда испытывались готовые минимодули с MMIC микросхемами INA-02184 и SBB5089 и два варианта (симметричный и несимметричный) двухкаскадных усилителей с БТООС с примерно равными значениями точек компрессии $P_{1\text{dB}}$ и пересечения по интермодуляции третьего порядка IP_3 . Испытания показали, что ШАУ с БТООС лучше справляются с сильными помехами, чем минимодули на MMIC [3]. На ионограммах, полученных с использованием ШАУ с БТООС, отраженный ионосферой сигнал сильнее, и помехи имеют меньшую амплитуду.

Литература

1. Carr J. J., RF Components and Circuits. Elsevier Science, 2002. 398 р.
2. Ред. Э. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: Схемы, блоки, 50-омная техника. Пер. с нем. М.: Мир, 1990. 256 с.
3. Акчурин А.Д. и др. К вопросу выбора широкополосного антенного усилителя для короткоимпульсного ионозонда // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. №.5. В печати.

Секция 4.

Радиозондирование ионосферы

«ПРОГНОЗ_ИЗМИРАН» – ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОКОММУНИКАЦИЙ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН

Крашенинников И.В., Шубин В.Н., Абуин А.А.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пуцкова РАН, г. Москва, Россия я
krash@izmiran.ru*

«Прогноз-ИЗМИРАН» – развивающаяся в ИЗМИРАН система описания ионосферного распространения радиоволн декаметрового диапазона, которая лежит в основе прогнозирования (планирования) работы радиотехнических систем, использующих ионосферу как среду переноса излучения. Базовой ионосферной моделью является модель ИЗМИРАН – GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere). Модель имеет в качестве управляющих параметров: гелиогеофизические данные на данный день в 5-ти дневном интервале (данные потока солнечного радиоизлучения – F10.7 и геомагнитные индексы) и средневзвешенные данные параметра F10.7 за 27 дней, которые составляют индекс солнечной активности – F. Весь набор гелиогеофизических данных формируется центром прогнозов ИЗМИРАН.

В режиме построения текущего прогноза прохождения радиоволн гелиогеофизические данные дополняются результатами вертикального радиозондирования ионосферы с автоматической обработкой ионограмм, что осуществляется двумя независимыми программами: комплекс института прикладной геофизики и комплекс Autiscala (INGV, Италия). Данные вертикального радиозондирования используются для адаптации модели ионосферы под текущие условия.

В докладе представлены результаты построения долгосрочного, краткосрочного и оперативного прогнозов и обсуждаются общие особенности прогнозирования работы радиолиний с учетом технических средств в расчете управляющего параметра – соотношения сигнал/шум, определяющего качество радиокоммуникаций.

Литература

1. Крашенинников И.В. и др. Особенности прогнозирования работы ионосферных радиолиний на верхнелучевых модах // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. №4. С. 473-480. DOI 10.31857/S0016794023600096.

ЭФФЕКТ ТЕРМИНАТОРНОЙ РЕФРАКЦИИ В ИЗМЕРЕНИЯХ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА НА ЧАСТОТЕ 5 МГЦ

Митин О.В.^{1,2}, Крашенинников И.В.¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия
mitin@izmiran.ru

Электромагнитный шум в декаметровом диапазоне радиоволн является принципиальным ограничивающим фактором в работе радиотехнических систем, использующих ионосферное прохождение радиоволн. Соотношение сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio) определяет ключевые параметры радиосистем: скорость и надежность передачи информации.

Регистрация уровня фонового электромагнитного шума осуществлялась SDR-приемником HackRF (динамический диапазон ~ 90 дБ) с программным управлением приемом радиосигнала и последующей его обработкой на языках программирования высокого уровня Perl и Python. Приемная антenna была реализована в виде несимметричного полуволнового диполя, имеющего диаграмму направленности с учетом подстилающей поверхности в азимутальной плоскости, близкую к круговой, а в вертикальной плоскости – слабонаправленную в зенит, с резонансом на гармониках частоты передатчика сигналов точного времени RWM – 4996 кГц. Общая длина антенны равна половине длины волны для рабочей частоты (28,51 м), отношение длин плеч диполя — 3:1 с максимальным коэффициентом усиления 2,7 дБи. Экспериментальные реализации представляли собой получасовые наборы данных, содержащих минуту записи собственного шума радиоэфира в паузе работы передатчика RWM. После предварительной обработки каждое наблюдение было представлено в виде значения усредненной среднеквадратичной мощности шума эфира, нормированное на максимально возможное значение оцифрованного сигнала в логарифмической шкале. Выбор в качестве рабочей частоты одной из служебных частот RWM, в определенной степени, гарантировал отсутствие помехового радиоизлучения радиотехнических средств с ионосферным распространением радиоволн.

Результаты исследований показывают наличие выраженного эффекта усиления уровня шума, связанное с прохождением утреннего и вечернего терминаторов в зимний период, и его практическое отсутствие в летнее время.

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОНЧ-КНЧ РАДИОВОЛН НАД КАРИБСКИМ БАССЕЙНОМ

Капустина О.В.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкиова РАН, Москва, Троицк, Россия
olkap@izmiran.ru*

Подробное описание аппаратуры и обзор некоторых результатов спутниковых исследований опубликованы в работе [1]. Возможности диагностики с помощью ОНЧ-КНЧ радиоволн показаны в работах [2,3]. Описание особенностей распространения свистящих атмосфериков, зарегистрированных над Карибским бассейном, и их связи с естественными катастрофическими событиями приведено в работах [4,5].

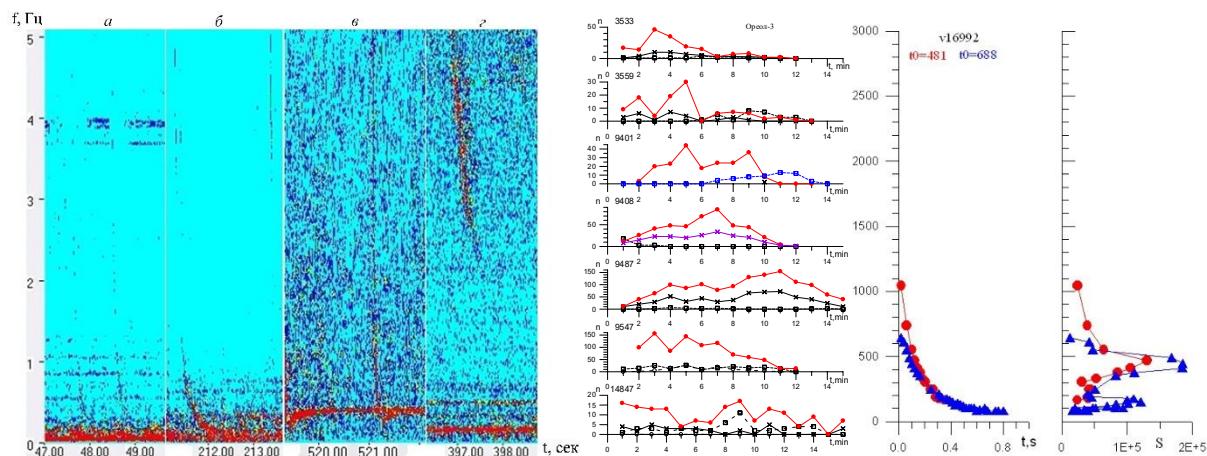


Рис. 1. Слева – цифровая сонограмма четырех типов событий, принимаемых на спутниках; в центре – количество сигналов разного типа в минуту (чд СА, чд КНЧ СА, ПСА, СА) в зависимости от времени; справа – частотно-временная и амплитудно-частотная характеристики двух сигналов с разной дисперсией.

Литература

1. Михайлов Ю.М. Низкочастотные электромагнитные волны. Космические и наземные эксперименты // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2018.
2. Лихтер Я.И. и др. Волновая диагностика приземной плазмы. М.: Наука, 1988. С. 86–122.
3. Budko N.I. et al. Determination of the proton temperature in the outer ionosphere from the amplitude spectra of proton whistling atmospherics (Intercosmos-5) // Artificial Satellites. 1980. V. 15. № 3. P. 194-198.
4. Капустина О.В. и др. Эффекты распространения электромагнитных волн над Карибским бассейном по данным широкополосной регистрации на спутниках // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65. № 2. С. 197–205. DOI: 10.31857/S0016794025020054.
5. Капустина О.В. Сравнение спектральных характеристик КНЧ-атмосфериков по наземным и спутниковым наблюдениям // Геомагнетизм и аэрономия. В печати.

ИССЛЕДОВАНИЕ F – РАССЕЯНИЯ ПО ВРЕМЕННЫМ И АМПЛИТУДНЫМ ВАРИАЦИЯМ dFs В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ DPS-4

Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия
rozhdestvenskaya.wera@yandex.ru*

Исследование неоднородности электронной концентрации ионосферного слоя F2 проводилось методом измерения ширины следа отраженного сигнала при вертикальном зондировании ионосферной плазмы. Для определения параметра изменчивости ширины следа разработан комплекс программ анализа данных на основе спектрального анализа с помощью цифровой фильтрации и последующим спектральным разложением [1]. Упомянутым методом были обработаны данные критической частоты $foF2$ и вариаций F-рассеяния dFs, полученные на ионозонде DPS-4 ИЗМИРАН за 2015, 2021 и 2024 гг. с целью оценить влияние солнечной активности на ионосферные процессы.

Для оценки энергии флюкутирующего процесса рассчитан интеграл энергетического спектра по частоте. Получена кривая изменения во времени энергии процесса. Результаты расчетов показали прямую зависимость величины критической частоты $foF2$ от уровня солнечной активности для чисел Вольфа и излучения F10,7 см, а также отмечено заметное уменьшение величины критической частоты в мае 2024 г. во время сильной солнечной вспышки класса Xm. Вариации dFs характеризуют ионосферные неоднородности более высокой частоты. При 15-минутных измерениях они позволяют оценивать процессы, протекающие в течение 30 минут. В спектрах вариаций $foF2$ и dFs также прослеживается влияние солнечной активности. Так, величина амплитуды основной гармоники для 2015 и 2024 гг. существенно выше той же характеристики для 2021 г. – минимума солнечной активности.

Литература

1. Rozhdestvenskii D. B. et al. Methods of digital filtration for processing ionospheric data "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXXVIII // Annual Seminar, Apatity, 2015, P. 149-152.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА «ПАРУС-А»

**Носиков И.А., Тимченко А.В., Носикова В.В., Борчевкина О.П.,
Клименко М.В.**

*Калининградский филиал Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн имени Н.В. Пушкиова, Калининград, Россия
ianosikov@wdizmiran.ru*

Построение амплитудных (A) и высотных (H) характеристик сигнала как функций времени наблюдения является одним из методов анализа данных радиозондирования. Такое представление позволяет исследовать динамику ионосферы, включая эффекты перемещающихся ионосферных возмущений. В данной работе рассматриваются ионосферные эффекты во время геомагнитных бурь максимума 25-го солнечного цикла и сильных метеорологических событий на основе данных вертикального зондирования ионозонда «Парус-А», расположенного в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН. Интерпретация A- и H- карт позволила выявить основные ионосферные эффекты, а также аномалии в суточных вариациях ионосферных слоев.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

ИЗМЕРЕНИЯ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ В РАЙОНЕ ГОЛУБОЙ БУХТЫ (Г. ГЕЛЕНДЖИК) С ПОМОЩЬЮ ДОПЛЕРОВСКОГО КВ РАДИОЛОКАТОРА SEA SONDE

Телегин В.А.¹, Зацепин А.Г.², Мысленков С.А.², Круглова Е.Е.²,
Горбацкий В.В.³

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк, Россия

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

³ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия
telegin@izmiran.ru

С 2010 года в районе Голубой бухты (г. Геленджик) существует гидрофизический полигон ИО РАН, целью создания которого является мониторинг состояния водной среды и биоты. Работы выполнялись в режиме ежегодных Черноморских экспедиций ИО РАН продолжительностью по одной–две недели в период времени с апреля по сентябрь. Для мониторинга состояния водной среды использовались различные контактные и бесконтактные средства, в том числе датчики для измерения температуры, солености, акустические доплеровские измерители скорости морских течений, дрифтеры. В качестве одного из основных средств измерения скоростей поверхностного течения применялся доплеровский КВ радиолокатор Sea Sonde производства США. В качестве зондирующего импульса используется ЛЧМ сигнал на частоте 25 МГц. Радиолокатор позволяет получать радиальные скорости течений на расстояниях порядка 22 км. На протяжении последних лет проводились эпизодические измерения морских поверхностных течений с помощью радиолокатора и сопоставление их с данными других наблюдений. Было показано достаточно хорошее согласие результатов, полученных разными методами.

В 2025 году в рамках выполнения Подпрограммы 6 Программы фундаментальных и поисковых исследований РАН встал вопрос об организации регулярных, практически ежедневных наблюдений за динамикой изменения морских поверхностных течений с помощью радиолокатора Sea Sonde и сопоставлении полученных результатов с результатами расчета морских течений в гидродинамических моделях высокого разрешения.

В докладе приводятся результаты измерений морских течений, полученных ранее и предварительные результаты работ в 2025 году.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОРБИТЕ С ВЫСОТЫ МАКСИМУМА ОБЛАСТИ F

Романов И.В.

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия
romanov@ipg.geospace.ru

Радиозондирование ионосферы с борта Российской орбитальной станции (РОС) [1] вошло в проект долгосрочной программы целевых работ (ЦР). Эта работа направлена на решение научных и прикладных задач оперативной диагностики глобальной ионосферы и организации мониторинга ионосферы с высоты близких максимуму концентрации электронов. Принципиальная возможность зондирования ионосферы с высот 300-400 км впервые показана в космическом эксперименте (КЭ) на ОКС «МИР» [2]. В отличие от КЭ на ОКС «Мир», имевшего орбиту с наклонением 54 градуса, ЦР на РОС позволит исследовать неоднородные структуры в максимуме концентрации в высоколатитудной внешней ионосфере и полярных районах. В ходе ЦР планируется отработать элементы ионосферной службы [3], позволяющие предупреждать о развитии опасных неоднородных структур в ионосфере. Планируется провести исследования распространения электромагнитных волн в плазме, линейных и нелинейных физических процессов, крупномасштабных ионосферных структур, неоднородностей ионосферы, возможности прогноза ионосферных аномалий. Предполагается отработка режимов комплексного радиозондирования с наземными ионосферными станциями [4]. В ЦР планируется создание ионозонда внешнего радиозондирования.

Литература

1. Данилкин Н.П. и др. Радиозондирование ионосферы на полярной орбите Российской орбитальной станции // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 13–17 ноября 2023 года. С. 30.
2. Котонаева Н. Г. Регистрация задержанных нижних следов на ионограммах ОК «МИР» при радиозондировании с высот ниже максимума слоя F2 // Гелиогеофизические исследования. 2013. №3. С. 25-39.
3. Денисова В.И. и др. Развитие Государственной системы мониторинга ионосферы в интересах обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации геофизической информацией // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 100-107.
4. Данилкин Н.П. и др. Трансионосферное радиозондирование как основа оперативного прогноза для совершенствования коротковолновой радиосвязи // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. Т. 50. № 4. С. 76-83, DOI: 10.26162/LS.2020.50.4.011.

ПРИМЕНЕНИЕ SDR ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ОТ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Продан П.Е.¹, Книжин С.И.^{1,2}

¹ Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

prodanpavel@gmail.com

Диагностика ионосферной плазмы с использованием сигналов низкоорбитальных спутников является важной и актуальной задачей в исследованиях околоземной плазмы. Принимаемые характеристики сигналов на частотах 150 и 400 МГц, излучаемые бортовыми передатчиками спутников, позволяют восстанавливать параметры ионосферы, такие как электронная концентрация и диэлектрическая проницаемость. Для когерентного приема этих сигналов разработан макет двухканального приемника на базе SDR-технологии (программно-определяемое радио) с использованием плат HackRF One. В качестве приемной антенны была использована турнистическая антenna, настроенная на частоту 150 и 400 МГц.

Макет включает в себя следующие компоненты: 2 платы HackRF One российского производства с диапазоном частот 1 МГц – 6 ГГц, частотой дискретизации 8–20 Msps и полосой пропускания 20 МГц; турнистическая антenna, обеспечивающая КСВ < 1,5 и минимальную реактивную составляющую входного сопротивления антенны; малошумящие усилители LNA-144 и LNA-433 с усилением 26 и 22 дБ соответственно; полосовые фильтры (FBP-155, FBP-433).

Для когерентной регистрации используется общая опорная частота 10 МГц. Платы синхронизируются через порты CLKIN и CLKOUT, а одновременный старт записи обеспечивается триггерным сигналом и Bash-скриптом.

Для проверки влияния дополнительных компонентов на принимаемый сигнал был проведен эксперимент, который можно разделить на четыре этапа. На первом этапе сигнал от вспомогательного источника принимался макетом приемника, состоящим из двух синхронизированных каналов на 150 и 400 МГц. На втором этапе к исходному макету для обоих каналов были добавлены полосовые фильтры. На третьем этапе добавлялись только малошумящие усилители без полосовых фильтров. На четвертом этапе измерения проводились с добавлением малошумящих усилителей и полосовых фильтров.

Разработанный макет двухканального приемника на базе платы HackRF One обеспечивает когерентный прием сигналов. Данный макет может быть использован для приема сигналов от низкоорбитальных спутников с частотами излучения на 150 и 400 МГц.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Сингин А.Н.¹, Щирый А.О.²

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкиова РАН, Москва, Троицк, Россия*

sasha.singin@gmail.com

В данной работе предлагается рассмотреть применимость искусственных нейронных сетей (ИНС) для синтеза ионограмм радиозондирования ионосферы, который актуален для различных научных приложений. Традиционно он основывается на решении краевой задачи распространения радиоволн в двумерно-неоднородной ионосфере (например в [1]). Также существуют иные методы.

В качестве альтернативы предлагается рассмотреть задачу генерации ионограмм как построение функции отображения входных данных, называемых метаданными, в ионограмму. Метаданные можно разделить на две группы: определяющие внешние условия и определяющие параметры измерений. В качестве функции отображения выступает ИНС. В процессе обучения с учителем она калибруется и приобретает знания об отображении. В роли учителя выступает обучающая выборка, каждый элемент которой представлен в виде пары метаданных и спектрограммы в специальном формате [2]. Основные проблемы при таком подходе связаны со спецификой графической интерпретации ионограмм. Существующие архитектуры ИНС для синтеза изображений допускают возникновение артефактов при генерации, что недопустимо в рассматриваемой задаче. Для решения проблемы требуется адаптация архитектур ИНС под особенности предметной области и подбор оптимальной функции потерь.

В докладе приводятся предварительные результаты, позволяющие говорить о возможности синтеза детальных ионограмм радиозондирования ионосферы. Задачами дальнейших исследований являются поиск оптимальных архитектур ИНС и функции потерь.

Литература

1. Прогнозирование состояния КВ-радиоканала на протяженных трассах путем математического моделирования ионограмм НЗ: Отчет о НИР. Часть I // Мособлсовет ВОИР; рук. Ю.Н. Черкашин, И.В. Крашенинников. М., 1990. 27 с.
2. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2022. №10. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.10.4

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ДОПЛЕРОВСКИХ ДАННЫХ ИЗ ФАЙЛОВ ФОРМАТА 16С ИОНОЗОНДОВ DPS

Зайцев А.А.¹, Щирый А.О.^{1,2}

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Путикова РАН, Москва, Троицк, Россия*

sao@izmiran.ru

Ионозонды вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы семейства Digisonde представляют значительную долю ВЗ ионозондов вообще, кроме того, огромные архивы данных этих ионозондов свободно доступны в интернете [1]. Привлекательность работы с большими массивами архивных данных обусловлена возможностью применения современных методов машинного обучения для поиска редких событий, нахождения скрытых закономерностей и построения предиктивных моделей [2]. Поэтому разработка программных библиотек для работы с данными этих ионозондов является актуальной задачей. В докладе представлены результаты разработки программного модуля на языке Python для извлечения ионограмм и доплеровских данных из файла формата 16С [3]. 16С – «самый сырой» формат «16-ти канальных ионограмм» дигизондов [3] (т.е. содержит наиболее полные данные), из которого могут быть получены «сырые» ионограммы (таких форматов как MMM, SBF, RSF). Упомянутые каналы представляют комбинации доплеровских ячеек, соответствующих поляризации антенны и положению луча приемной антенной решетки, т.е. этот «самый сырой» формат позволяет получить не только ионограммы, но и информацию о направлениях прихода и поляризации радиоволн, а также данные о доплеровских сдвигах. Задачами дальнейших исследований будет анализ извлеченных доплеровских данных, построение моделей их временных рядов, а также поиск корреляций с геогелиофизическими факторами.

Литература

3. Щирый А.О. и др. Общедоступные архивы данных наземного радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами // Электронные библиотеки. 2023. Т. 25. №6. С. 992-1005.
4. Щирый А.О. Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 55-60. DOI 10.18127/j5604128-202405-08.
5. T. Bullett et al. Digisonde 256 data decoding: 16 channel ionograms // National Centers for Environmental Information (NCEI), NOAA. 2002. URL: <https://data.ngdc.noaa.gov/instruments/remote-sensing/active/profilers-sounders/ionosonde/documentation/Digisonde/D256%202016C%20Specification.pdf>

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ
СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕКОВ
МОД РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА НА ИОНОГРАММАХ
РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

Масюченко С.В.¹, Щирый А.О.²

¹*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Путикова РАН, Москва, Троицк, Россия*

stiwwin@gmail.com

Автоматизация обработки ионограмм радиозондирования ионосферы крайне важна как в оперативной диагностике ионосферы и ионосферных радиолиний, так и для обработки больших массивов архивных данных ионограмм с целью поиска скрытых закономерностей, редких событий, построения предиктивных моделей. Важнейшим необходимым этапом такой автоматизации является автоматическое выделение треков мод радиосигнала на ионограмме [1]. В данной работе предлагается подход с использованием современных методов машинного обучения, а конкретно – методов сегментации изображений и классификации.

Обучающий набор данных был сформирован из 200 ионограмм наклонного зондирования радиолиний Хабаровск – Йошкар-Ола, Магадан – Йошкар-Ола, Норильск – Йошкар-Ола, Усолье – Йошкар-Ола, Кипр – Йошкар-Ола, Кипр – Москва (Троицк). Для предотвращения переобучения модели были отобраны максимально непохожие ионограммы. Набор был размечен вручную, на данном этапе выделялись 3 класса треков: нижние, верхние, неопределённые. Использовалась модель maskrcnn_resnet50_fpn [2] – предобученная Mask R-CNN, основанная на архитектуре ResNet-50 и с использованием сети пирамидальных признаков (FPN). Модель дообучена на нашем наборе данных, в итоге получены следующие метрики на тестовой выборке: mAP@50 = 0,561, mAP (IoU 0,5:0,95), = 0,234, mAR@100 = 0,357 – и по ним видно, что модель хорошо классифицирует треки, но попиксельное совпадение не очень хорошее, однако в данном случае не так важно идеальное совпадение найденной маски с «эталоном». Задачей дальнейших работ является улучшение модели, в т. ч. посредством расширения обучающего набора данных.

Литература

6. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники [Электронный журнал]. 2022. №10. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.10.4.
7. TorchVision. Mask R-CNN with ResNet-50-FPN backbone [Электронный ресурс] // PyTorch Documentation. <https://docs.pytorch.org/vision/main/models.html>

МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ И ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Крюковский А.С.^{1,2}, Кутузов Б.Г.², Растворяев Д.В.^{1,2}

¹*Российский новый университет, Москва, Россия*

²*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия*
rdv@rosnou.ru

Ионосфера Земли представляет собой сложную, динамически изменяющуюся, неоднородную и физически анизотропную область верхней атмосферы. Исследование характеристик радиоволн при распространении в ионосфере имеет существенное значение для решения важных теоретических и практических задач [1].

В настоящей работе выполнен расчет изменений амплитуды и доплеровского смещения частоты радиосигналов при взаимодействии с ионосферой. Была рассмотрена трехслойная модель ионосферы, включающая слои F2, F1 и E, дополненная моделью ионосферной неоднородности – перемещающимся ионосферным возмущением (ПИВ). Выполнено моделирование и проанализированы результаты влияния ионосферы Земли на амплитуду радиосигнала, а также величины доплеровского смещения частоты, вызванного движением ПИВ. Разработаны математическая и численная модели процессов распространения радиоволн метрового и дециметрового диапазонов в ионосфере Земли. Предложены методы расчета лучевых траекторий и ослабления сигнала, базирующиеся на бихарacterистической системе Гамильтона-Лукина. Для определения амплитуды сигнала решались дополнительные дифференциальные уравнения, характеризующие степень расходимости луча. Проведен подробный анализ влияния ионосферы на амплитуду и доплеровское смещение частоты радиосигналов в различных диапазонах. Полученные результаты показывают незначительное уменьшение амплитуды в метровом диапазоне и слабое влияние ионосферы в дециметровом диапазоне. Изучено доплеровское смещение частоты, обусловленное движением ионосферных неоднородностей, и установлено, что этот эффект наиболее значителен в метровом диапазоне.

Работа выполнена в рамках Госзадания по теме «Космос-3» № FFWZ-2025-0009.

Литература

1. Крюковский А.С., Кутузов Б.Г., Растворяев Д.В. Теоретические оценки влияния ионосферы на амплитуду, фазовое запаздывание и поляризацию радиолокационного сигнала при прохождении через ионосферу // Физические основы приборостроения. 2024. №2. Т. 13. С. 65-80.

О БЫСТРОЙ ОЦЕНКЕ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Ким В.Ю.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкина РАН, Москва, Троицк
vkim@izmran.ru*

Доплеровский метод радиозондирования широко применяется для исследования ионосферных возмущений различной природы при их мониторинге методами наклонного (НЗ) и вертикального (ВЗ) зондирования. Существующие методики исследования динамики ионосферы при ВЗ и НЗ позволяет оценивать доплеровское смещение $f_d \sim 0,1$ Гц с разрешением по частоте $\Delta f_d \sim 0,01$ Гц при интервале времени измерения $T \sim 100$ с. При исследовании искусственных нагревных возмущений ионосферы, когда $f_d \sim 1-10$ Гц и $T \sim 10$ с, для получения доплеровского разрешения $\Delta f_d \sim 0,1$ используется фазовая методика.

В докладе представлена новая методика быстрого измерения доплеровского сдвига частоты зондирующих радиосигналов при двухтактном ВЗ ионосферы. Методика основана на измерении мгновенного сдвига фаз отраженных радиосигналов с помощью метода пересечения нуля на интервале времени, равном периоду повторения зондирующих импульсов.

Проведена экспериментальная проверка методики, в ходе которой проверены аппаратные решения с использованием ионозонда «Базис-М», а также проведены измерения доплеровского смещения частоты сигналов, отраженных от Е-слоя ионосферы.

Показано, что предлагаемая методика позволяет измерять доплеровское смещение частоты зондирующих сигналов с точностью $\Delta f_d \sim 0,1$ Гц за интервал времени 40 мс. Использование новой методики в ионозондах позволит регистрировать доплеровские ионограммы за время одного сканирования по частоте.

Разработанная методика позволяет, в принципе, создавать специализированные ионосферные станции для мониторинга динамики ионосферных возмущений различной природы одновременно на высотах от Е-слоя до высоты максимума слоя F2 с высоким разрешением по времени. Развитие экспериментальной методики быстрого измерения доплеровских характеристик зондирующих сигналов может проводиться на базе существующих стандартных ионозондов путем модернизации цифровой регистрирующей аппаратуры и разработки специализированного программного обеспечения.

ISBN 978-5-6052190-1-9

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-5-6052190-1-9.

9 785605 219019 >