

Закрытое акционерное общество «Научно-производственная фирма  
«Геофизическое дистанционное зондирование»  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»

На правах рукописи

**БОЛТИНЦЕВ ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ**

**АППАРАТНО – ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО  
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,  
материалов и изделий

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Черемисин Александр Алексеевич

Томск – Санкт-Петербург – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	10
1 ОСНОВЫ ЭМИ СШП ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ .....	17
1.1 Общие закономерности изменения электрофизических параметров почв.....	25
1.1.1 Классификация почв по изменениям электрофизических параметров .....	29
1.1.2 Влияние гумуса на изменение электрофизических параметров почв .....	30
1.1.3 Изменение электрофизических параметров почв при различных формах почвенной влаги .....	35
1.1.4 Исследование высокочастотного релаксационного максимума поглощения почв .....	38
1.2 Общие закономерности изменения электрофизических параметров грунтов	43
1.2.1 Особенности порового и микроструктурного пространства глин .....	49
1.2.2 Макродипольная электрическая поляризация грунтов .....	55
1.2.3 Влияние влажности и минерального состава на электрофизические свойства грунтов.....	58
1.3 Электрические свойства горных пород .....	63
1.3.1 Проводимость и поляризация горных пород .....	63
1.3.2 Электрофизические параметры горных пород с учётом дисперсности .....	65
1.4 Георадарные измерения электрических параметров.....	69

1.4.1	Общепринятая структурная схема георадаров типа PRS.....	72
1.4.2	Современное состояние обработки данных в системах PRS.....	76
1.5	Основы распространения ЭМИ СШП сигналов в подстилающей среде.....	79
1.5.1	Существование оптимального частотного диапазона.....	80
1.5.2	Применение эмпирической гистограммы амплитуды радиолокационного сигнала и способы ее построения.....	81
1.6	Состояние вопроса о согласовании антенны со средой.....	82
1.6.1	Электродинамическое моделирование антенн.....	83
1.6.2	Анализ влияния подстилающей поверхности.....	86
	<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>91</b>
	<b>II КОМПЛЕКС ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....</b>	<b>92</b>
2.1	Характеристические частоты в подповерхностной среде.....	93
2.2	Состав комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования.....	96
2.2.1	Генератор излучаемых импульсов.....	102
2.2.2	ИИС комплекса.....	109
2.3	Принцип работы аппаратно – программного комплекса.....	116

2.4 Синхронизация ИИС комплекса.....	121
2.5 Методики аппаратурной идентификации.....	123
2.5.1 Методика синтезирования амплитуды сигнала.....	123
2.5.2 Методика определения глубины залегания слоя (объекта).....	125
2.5.3 Идентификация наличия воды.....	128
2.5.4 Оценка наличия связанной воды в горной выработке.....	133
2.6 Проверка излучения комплекса ЭМИ СШП зондирования на электромагнитную совместимость.....	135
ВЫВОДЫ.....	138
III АНТЕННЫ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОСТИ ПУТЁМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ	141
3.1 Применение численных методов.....	143
3.2 Индуктивность как объект параметрической оптимизации .....	147
3.2.1 Моделирование параметров погонной индуктивности с учётом влияния земли .....	150
3.2.2 Результаты экспериментальных измерений частотных характеристик неоднородной МПА подповерхностного зондирования.....	155
3.2.3 Анализ полученных экспериментальных данных.....	163
3.2.4 Экспериментальная проверка чувствительности антенны к изменению импеданса подстилающей среды.....	164

3.3 Природа волн, излучаемых неоднородной МПА.....	168
3.3.1 Экспериментальная проверка наличия волны $H_{10}$ .....	170
3.3.2 Неоднородная МПА как экранированная симметричная щелевая линия.....	172
3.3.3 Вид распространяющегося в среде поля.....	174
3.3.4 Голографическое восстановление поля в дальней зоне по полю, измеренному на плоскости .....	177
3.4 Влияние составляющих неоднородной МПА.....	179
3.4.1 Учёт влияния ребра полоскового проводника.....	179
3.4.2 Влияние анизотропии материала подложки, оголовка и толщины неоднородной МПА.....	183
3.5 Монопольная антенна подповерхностного зондирования как антенна в материальной среде.....	188
3.5.1 Практическая необходимость и свойства монопольных антенн.....	190
3.5.2 Форма диэлектрика монопольной антенны как решение задачи геометрической оптики.....	197
3.6 Тонкопроволочная (струнная) антенна подповерхностного .....	198
3.6.1 Чебышевский плавный переход.....	198
3.6.2 Антенное полотно тонкопроволочной (струнной) антенны.....	201
3.6.3 Результаты экспериментальных измерений частотных характеристик проволочной (струнной) антенны.....	202

ВЫВОДЫ.....	206
IV ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИИ	
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	208
4.1 Методы описания СШП сигналов.....	209
4.2 Представление отражённого сигнала его эмпирическим распределением.....	212
4.3 Шахматная доска как способ построения двумерной ЭПВ.....	219
4.4 Результаты построения эмпирических распределений.....	223
4.5 Алгоритмы обработки данных ЭМИ СШП зондирования.....	229
4.6 Применение корреляционно-дисперсионного анализа данных ЭМИ СШП зондирования для литологического разделения подстилающей среды.....	237
ВЫВОДЫ.....	251
V ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЭМИ СШП	
ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	253
5.1 Контроль качества закрепления грунта в строящихся тоннелях.....	253
5.1.1 Геофизические исследования ЭМИ СШП зондированием Северомуйского тоннеля.....	253
5.1.2 Контроль качества закрепления грунтов на территории строительства станции метрополитена «Звенигородская» в г. Санкт-Петербурге.....	257
5.2 Результаты ЭМИ СШП зондирования секции 17-I-2 плотины Бурейской ГЭС.....	260
5.3 Применение метода ЭМИ СШП зондирования как составляющей геотехнического мониторинга.....	264

5.3.1 Результаты ЭМИ СШП зондирования при геотехническом мониторинге зоны «Размыва» .....	264
5.3.2 Мониторинг инженерно-геологического пространства в г. Сочи вперёд забоя.....	272
5.4 Применение метода ЭМИ СШП зондирования при разведке месторождений полезных ископаемых на примере горючих сланцев.....	275
5.4.1 В полупустынях (Иордания) .....	276
5.4.2 В саванне (Мьянма) .....	279
5.5 Применение надводного варианта комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования.....	286
ВЫВОДЫ.....	289
VI ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	291
6.1 Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования.....	294
6.1.1 Отладка (юстировка) бортовой аппаратуры.....	296
6.1.2 Сравнение результатов наземных и воздушных ЭМИ СШП измерений.....	300
6.1.3 Низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости влажных грунтов (площадная оценка) .....	301
6.2 Подводный вариант комплекса.....	304
6.2.1 Отладка (юстировка) аппаратуры подводного варианта комплекса.....	304
6.2.2 Подводные работы.....	308

6.2.3 Построение профиля подводных работ.....	311
ВЫВОДЫ.....	312
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	313
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	315
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	369
Приложение А. Порядок расчёта взаимной индуктивности несимметричной МПА.....	369
Приложение В. Электродинамическое приближение.....	375
Приложение С. Результаты голографического восстановления поля в дальней зоне для тонкопроволочной (струнной) антенны.....	378
Приложение Д. Сингулярность данных ЭМИ СШП зондирования как связь многомодовости отражённого сигнала с его эмпирическим распределением.....	380
Приложение Е. Заключение на исследование.....	382
Приложение F. Акт контрольного вскрытия обделки.....	384
Приложение G. Письмо ЗАО «Управление -15 Метрострой» .....	385
Приложение J. Эффективность применения надводного варианта комплекса ЭМИ СШП зондирования.....	386

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** Сегодня инженерно–геологические задачи по неразрушающему контролю геодинамики массива горных пород и процессов, вызванных техногенной деятельностью, являются востребованными. Нужны технические решения, позволяющие значительно увеличить глубину и точность обследований.

Определённый вклад в исследование подповерхностной среды вносят георадары. Они различаются составом аппаратуры и программным обеспечением.

Возможности георадиолокационного обследования в настоящее время ограничены, во-первых, достигнутой глубиной при удовлетворительном пространственном разрешении и, во-вторых, отсутствием устойчивых и практических методик анализа данных измерений в одной точке. Решение этих задач позволяет расширить классы инженерно-геологических объектов, подлежащих контролю. Поэтому выход за пределы указанных выше ограничений является актуальной и сложной научно-технической проблемой.

Решение этой проблемы возможно на пути использования генераторов мощных видеоимпульсов, которые в настоящее время созданы в России; использования широкополосных сигналов и создания соответствующей приемо-передающей аппаратуры; а также разработки новых методов обработки принимаемых сигналов, позволяющих выявить скрытую в них информацию о состоянии подповерхностных структур (объектов).

**Цель работы** заключается в создании аппаратно–программного комплекса электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования для обследования и контроля состояния подстилающей среды мощными наносекундными импульсами.

Для достижения этой цели необходимо **решить следующие задачи:**

1. Сформулировать технические условия на линейку генераторов с технологией дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ) и их параметры.

2. Разработать методику согласования антенн подповерхностного зондирования со средой.
3. Разработать методику контроля и идентификации отраженных электромагнитных сигналов.
4. Разработать программный комплекс, реализующий методику контроля и идентификации отраженных электромагнитных сигналов.
5. Апробировать выполненные разработки в полевых и камеральных условиях на территории России и за рубежом.

**Положения, выносимые на защиту:**

- технические условия (ТУ) на линейку генераторов на базе ДДРВ и ее применение;
- три типа широкополосных антенн для подповерхностного зондирования, согласованных со средой;
- повышение помехоустойчивости системы через отказ от использования сигнала синхронизации в аппаратном комплексе;
- формальные методы информационных технологий идентификации подповерхностных структур по результатам СШП измерений в одной точке;
- аппаратно-программный комплекс ЭМИ СШП зондирования для обследования и контроля подстилающей среды мощными наносекундными импульсами и его перспективные варианты для аэровоздушного (самолётного) и подводного применения;
- варианты комплекса, методики контроля и идентификации подповерхностных структур для обеспечения безопасности горнопроходческих работ, непрерывного мониторинга инъекционного закрепления на примере проходки Северомуйского (БАМ, 1999 – 2001 гг.) и Сочинских тоннелей (олимпийские объекты, 2007 – 2012 гг.) и зоны «Размыва» г. Санкт-Петербург.

**Методы исследования:** электродинамика сплошных сред; классическая теория четырёхполюсников; теория информационной энтропии; теория оценивания на основании информационной меры Кульбака; корреляционно –

дисперсионный анализ; теория анализа временных рядов (статистическое разложение волатильности).

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Разработка на базе ТУ линейки генераторов, использующих дрейфовые диоды с резким восстановлением, обеспечивает глубины контроля структуры подстилающей среды до 130 м.

2. Разработка под линейку генераторов трех типов широкополосных антенн подповерхностного зондирования – неоднородные микрополосковые, монопольные, тонкопроволочные (струнные), которые согласованы с подстилающей средой в полосе от 1 МГц до 500 МГц.

3. Повышение помехоустойчивости системы за счет отказа от использования сигнала синхронизации от генератора излучаемых импульсов и перехода к синхронизации в аппаратном комплексе от максимального сигнала из подстилающей среды.

4. Разработка преобразований временных сигналов, основанных на информационно – энтропийных критериях, литологически разделяющих подстилающую среду по результатам измерений в каждой отдельной пространственной точке.

5. Разработан подход по зондированию в одной точке, позволяющий расширить возможности контроля подземных объектов вперед забоя при горной проходке, контроль состояния быков мостов и контроль качества инъекционного закрепления.

6. Полученные технические результаты по наземному комплексу распространены на перспективные: аэровоздушный (самолётный) и подводный комплексы.

7. Создан аппаратно-программный комплекс ЭМИ СШП зондирования для обследования и контроля подстилающей среды мощными наносекундными импульсами.

**Практическая ценность полученных результатов:**

- разработанный комплекс и методики контроля и идентификации подповерхностных структур нашли своё применение в ходе обеспечения безопасности горнопроходческих работ, контроля инъекционных работ при проходке Северомуйского (БАМ, 1999 – 2001 гг.) и Сочинских тоннелей (олимпийские объекты, 2007 – 2012 гг.). По результатам данных СШП измерений ведётся непрерывный мониторинг инъекционного закрепления на ул. Карбышева г. Санкт-Петербург, зона “Размыва”.

**Достоверность.** Результаты ЭМИ СШП контроля среды вперед забоя, полученные при прямой проходке горнопроходческим щитом, подтверждены данными о геологии, полученными после окончания горных работ при строительстве Северомуйского тоннеля (БАМ) и Сочинских тоннелей. Результаты ЭМИ СШП обследования на Пантелеймоновском и Аничковом мостах (г. Санкт-Петербург) подтверждены вскрышными работами, испытаниями кернов для бетонной плотины Бурейской ГЭС, разведочным бурением на ул. Карбышева и ул. Политехническая (г. Санкт-Петербург, зона “Размыва”), проходкой тоннеля Descenderie de Saint Martin la Porte (Италия), натурными исследованиями кладки стены Московского Кремля в районе прясел №52, 53 при бурении, заверочным бурением бетонной обделки технологического тоннеля «Шесхарис - Грушовая» (г. Новороссийск).

**Комплекс ЭМИ СШП зондирования** нашел применение при решении практических задач в следующих организациях: ОАО НИПИИ “Ленметрогипротранс” (г. Санкт-Петербург), ЗАО “ПИРС” (г. Омск), ОАО “Метрогипротранс” (г. Москва), ЗАО “Геострой” (г. Санкт-Петербург), ОАО “Гипротрубопровод” (г. Москва), СФУ (г. Красноярск).

Результаты данной работы могут быть рекомендованы к использованию в ряде областей промышленно – строительного комплекса, прежде всего в тоннелестроении - при зондировании вперед забоя; в микротоннелировании - при прокладке трубопроводов и коммуникаций большого диаметра под руслом рек; в оценке строительных рисков – при определении состояния

оснований и фундаментов; при геологоразведочных изысканиях на больших площадях и труднодоступных участках.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы рассматривались и докладывались на World Tunnel Congress '99. Norway, (1999, г. Oslo); научно – практической конференции «Подземное строительство на рубеже XXI века» (2000, г. Москва); международной геофизической конференции «Горно-геологической службе России 300 лет» (2000, г. Санкт-Петербург); международной конференции «Современные технологии изысканий, проектирования и геоинформационного обеспечения в промышленном, гражданском и транспортном строительстве» (2001, г. Москва); научно – практической конференции «Георадар – 2002» (2002, МГУ, г. Москва); международной конференции «Тоннельное строительство России и СНГ в начале века» (2002, г. Москва); международном форуме «Рациональное природопользование» (2005, г. Москва); I общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (2006, г. Москва); конференциях «Научно-практические задачи Красноярской ж.д.» (2006, 2009, 2014 г. Красноярск); международной конференции «Передовые технологии, оборудование и методы инженерно-геологических и геофизических изысканий при строительстве подземных сооружений» (2007, г. Москва); межрегиональной конференции «Особенности инженерно-геологических изысканий и определения физико-механических свойств грунтов для проектирования зданий и сооружений повышенного уровня ответственности» (2008, г. Санкт-Петербург); VII Всероссийской конференции «Финансово-актуарная математика и смежные вопросы» (2008, г. Красноярск); IV общероссийской конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (2008, г. Москва); Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress (2009, г. Budapest); VII÷X и XII Международных геофизических научно-практических семинарах

«Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (2009 ÷ 2012, 2015, г. Санкт-Петербург); II научно - технической конференции «Сварочные и родственные технологии для подводных переходов и морских нефтегазовых сооружений» (2009, г. Москва); Международной научно – технической конференции «Основные направления инновационных технологий при строительстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов» (2010, г. Москва); VII Международной конференции «Инженерная геофизика» (2011, г. Москва); Юбилейном X научно – практическом семинаре «ГИС для управления территориями, городами, предприятиями» (2011, г. Анапа); Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли» (2011, г. Новосибирск); V и VI Всероссийских научно – технических конференциях «Радиолокация и радиосвязь» (2011, 2012, г. Москва); Jordan International Oil Shale Symposium (2012, 2014, Jordan); IV Международной научно – практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики «АПР-2012» (2012, г. Томск); всероссийской конференции «120 лет железнодорожному образованию в Сибири» (2014, г. Красноярск); II Всероссийской Микроволновой конференции (2014, г. Москва).

**Публикации.** По теме исследований опубликовано 46 научных работ, из которых 19 статей в изданиях по списку ВАК; 1 статья в зарубежных периодических изданиях и 4 статьи в трудах зарубежных научно – технических конференций; 4 статьи в периодических изданиях; 13 статей в трудах научно – технических конференций; 1 депонированная статья; 1 патент; 3 свидетельства на полезную модель.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит постановка рассмотренных задач, разработка алгоритмов и вычислительных программ, проведение численных исследований и измерений метрологических характеристик комплекса, а также участие в проведении измерений и их интерпретации для наиболее ответственных работ. Автор непосредственно участвовал во всех этапах диссертационного исследования. При постановке

научной проблемы существенную помощь оказал А. А. Черемисин. На этапе экспериментальных исследований, их систематизации большой вклад внес В. Н. Ильяхин. При разработке аппаратного комплекса использован опыт и научный потенциал В.М. Ефанова по созданию ДДРВ генераторов. Идея использования комплекса для мониторинга подземного пространства вперед забоя принадлежит К.П. Безродному (1996). Анализ и интерпретация данных контроля инъекционных укреплений в грунтах Санкт - Петербурга проводится совместно с С.Я. Нагорным, А.Г. Мацегорой, В.И. Маслаком.

Автор отмечает вклад 

А.Ф. Волкова
--------------

 в разработку программного обеспечения. Автор признателен за обсуждение применения теории информации И.Ю. Лютынскому, А.А. Чапчаю. Совместно с В.М. Власовым проведен анализ материалов испытаний кернов Бурейской ГЭС и сопоставление их с данными ЭМИ СШП зондирования.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и пяти приложений. Текст изложен на 394 страницах и дополнен 187 рисунками, 14 таблицами. Список литературы включает 531 наименование, в том числе 123 работы на иностранных языках.

## І ОСНОВЫ ЭМИ СШП ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Объектом исследований ЭМИ СШП зондирования является подстилающая среда. Аномалии электрофизических свойств почв, грунтов, горных пород в радиочастотном диапазоне являются их характерной особенностью. Частотную дисперсию принято связывать с существованием нескольких релаксационных процессов, описываемых законом П. Дебая [301], с различными временами релаксации. В этой модели частотная характеристика рассчитывается путем усреднения с использованием функции распределения времени релаксации.

Характеристики электрической релаксации определяются с помощью уравнений, описывающих изменения электрических свойств грунтов в зависимости от частоты и температуры.

Электропроводность  $\sigma(\omega)$  и диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon(\omega)$  гетерогенной среды определяют как

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_1 + j\sigma_2(\omega), \quad (1.1)$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_1 - j\varepsilon_2(\omega), \quad (1.2)$$

где действительная часть электропроводности  $\sigma_1(\omega)$  и мнимая часть диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_2(\omega)$  характеризуют синфазную с приложенным напряжением составляющую тока в среде, а мнимая часть электропроводности  $\sigma_2(\omega)$  и действительная часть проницаемости  $\varepsilon_1(\omega)$  - квадратурную (емкостную) составляющую.

Подставляя выражение (1.1) и (1.2) в уравнения Максвелла для полного тока получим [274]

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} = [\sigma^*(\omega) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon(\omega)] \cdot \vec{E} = \\ &= \sigma_3^* \cdot \vec{E} = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_3^* \cdot \vec{E} = [\sigma_3(\omega) + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_3(\omega)] \cdot \vec{E}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

где  $\sigma_3^*(\omega) = \sigma_1' + j\sigma_2''(\omega)$ ,  $\varepsilon_3(\omega) = \varepsilon_1' - j\varepsilon_2''(\omega)$ ,

$$\sigma_3(\omega) = \sigma_3'(\omega) = \sigma_1(\omega) + \omega\varepsilon_0\varepsilon_2(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon_3''(\omega), \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned}\sigma''_3(\omega) &= \sigma_2(\omega) + \omega\varepsilon_0\varepsilon_1(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon'_3(\omega), \\ \varepsilon''_3(\omega) &= \varepsilon'_3(\omega) = \varepsilon_1(\omega) + \frac{\sigma_2(\omega)}{\omega\varepsilon_0} = \frac{\sigma''_3(\omega)}{\omega\varepsilon_0}, \\ \varepsilon''_3(\omega) &= \varepsilon_2(\omega) + \frac{\sigma_1(\omega)}{\omega\varepsilon_0} = \frac{\sigma'_3}{\omega\varepsilon_0}.\end{aligned}\tag{1.5}$$

Выражения (1.4) и (1.5) характеризуют эффективные значения электропроводности и диэлектрической проницаемости среды<sup>1</sup>. Величина  $\varepsilon''_3$  большинства сред имеет максимум, соответствующий определенной частоте для некоторой температуры. Эти величины определяются соотношением  $\omega = \frac{2\pi}{\theta_3(t^{\circ}\text{C})}$ . Зная координату максимума  $\varepsilon''_3$ , можно определить эффективное (наиболее вероятное) время релаксации  $\theta_3(t^{\circ}\text{C})$  при отдельных фиксированных температурах. Последнее соотношение будет более точным, если  $\varepsilon''_3$  удовлетворяет одному из уравнений моделей частотной дисперсии (табл. 1.1).

На рис. 1.1 представлено решение уравнений Максвелла через преобразования Лапласа при переходе среды от идеального диэлектрика  $\sigma^*(\omega) = 0$  к реальному диэлектрику  $\sigma^*(\omega, \vec{r}) = \sigma(\omega; x, y, z)$ .

При получении оригинала использована формула Меллина, интеграл  $J(\vec{r}, t)$  есть изображение  $\nabla^2 E(\vec{r}, t)$  и представляет собой произведение двух оригиналов.

Представленные в табл. 1.1 модели характеризуют частотную дисперсию электрических свойств при фиксированном состоянии среды, когда времена релаксации неизменны.

---

<sup>1</sup> На высоких частотах, когда в среде преобладают токи смещения  $\sigma'_3(\omega) \approx \omega\varepsilon_0\varepsilon_2(\omega)$ ,  $\varepsilon'_3(\omega) \approx \varepsilon_1(\omega)$  величина эффективной электропроводности среды будет определяться механизмом неидеальной поляризации; на достаточно низких частотах  $\sigma'_3(\omega) \approx \sigma_1(\omega)$ ,  $\varepsilon'_3(\omega) \approx \sigma_2(\omega) / \omega\varepsilon_0$  оба эффективных параметра определяются неидеальной электропроводностью гетерогенной среды. Значения  $\varepsilon'_3$  будут тем больше, чем сильнее затруднено свободное движение ионов и неоднороднее энергетическая структура порового раствора, а также чем больше число процессов проводимости с разными временами релаксации.

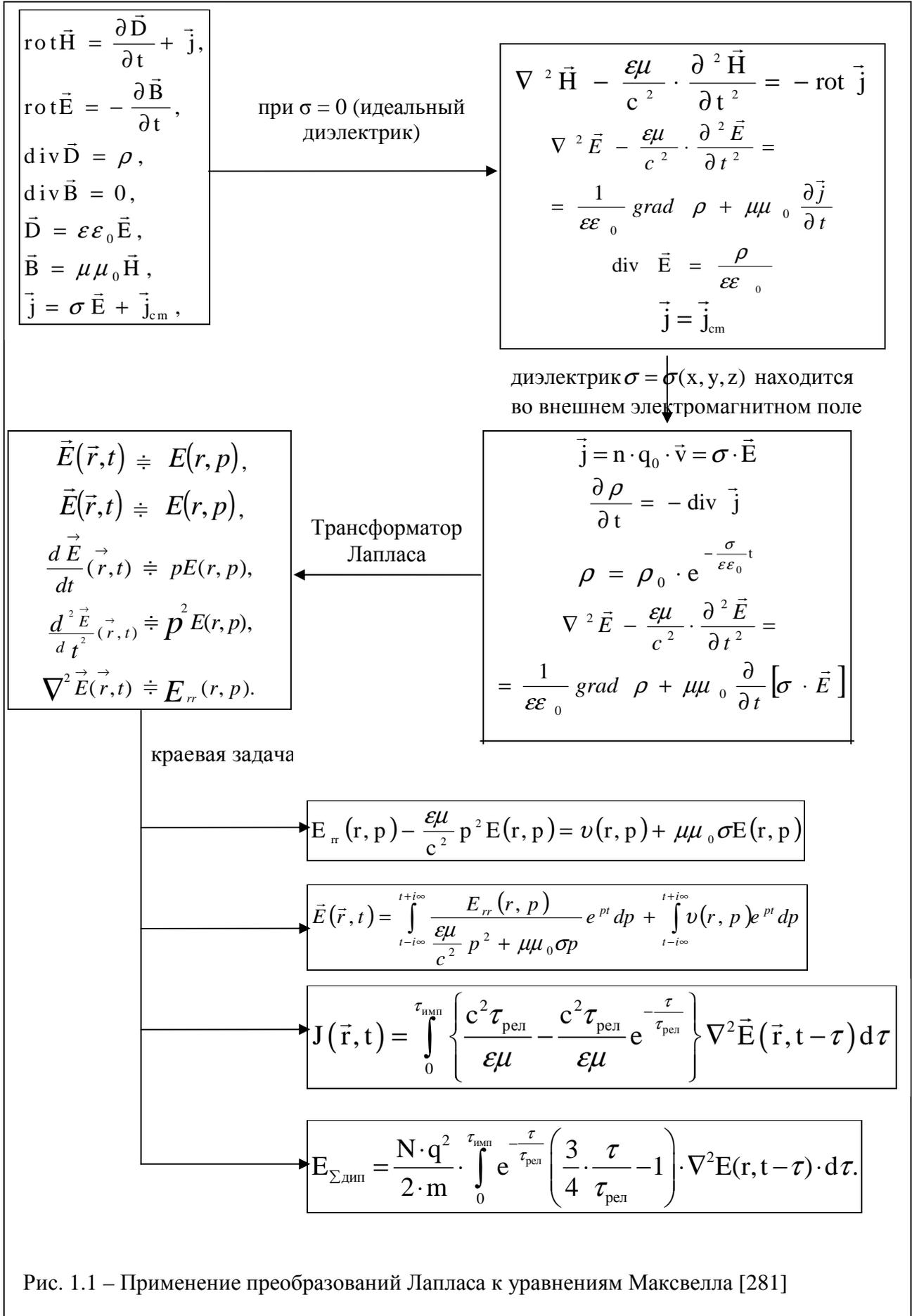


Таблица 1.1

Модель частотной дисперсии	Уравнение дисперсии
1) <i>Одно время релаксации</i> (модель Дебая): $\alpha=0, \beta=1$	$A^*(\omega) = A_d + \frac{A_s - A_d}{1 + j\omega\theta} = A' - jA''(\omega)$
2) <i>Симметричное распределение времен релаксации</i> (модель Коул – Коула): $\alpha=0, 0 < \beta < 1$	$A''(\omega) = \frac{(A_s - A_d)(\omega\theta)^{1-\alpha} \cdot \cos \frac{\alpha\pi}{2}}{1 + 2(j\omega\theta)^{1-\alpha} \cdot \sin \frac{\alpha\pi}{2} + (j\omega\theta)^{2(1-\alpha)}}$
3) <i>Несимметричное («простое») распределение времен релаксации</i> (модель Коул – Девидсона): $0 < \alpha < 1, \beta=1$	$A''(\omega) = A_d + \frac{A_s - A_d}{1 + (j\omega\theta)^\beta}$
4) <i>Несимметричное («сложное») распределение времен релаксации</i> (модель Хаврильяка – Негами): $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$	$A^*(\omega) = A_d + \frac{A_s - A_d}{[1 + (j\omega\theta)^{1-\alpha}]^\beta}$

В области теоретических исследований в инженерной геологии формально можно выделить ряд направлений развития теоретической петрофизики<sup>2</sup>, которые классифицируются по типу модели среды и описываемым характеристикам. Довольно условно можно соотнести эти направления развития с авторами, предложившими впервые или более последовательно выразившими соответствующие идеи. Условно можно определить дату рождения петрофизики по первой публикации Г. А. Арчи (1942).

После работ В. Н. Дахнова [233] и Г. А. Арчи [247] по сопротивлению сред число предложенных уравнений, описывающих электропроводимость, продолжает нарастать, но теоретическое описание укладки частиц и решёток

<sup>2</sup> Физические свойства твердой фазы - плотность, магнитные, электрические, упругие, тепловые, ядерные, определяемые, в основном, атомным строением химических элементов минералов, из которых состоит порода

капилляров часто подменяется на практике чисто эмпирическими или полуэмпирическими аппроксимациями [246].

Начиная с работ Г. А. Арчи (1942), В. Ю. Вендельштейна [235], Serra, Nesham [234] стало развиваться направление, связанное с учетом состава и структуры цементирующего материала.

Вслед за работами Petitgon, Ханина, Fetta, Энгельгардта значительные усилия были направлены на изучение свойств сетевых и фрактальных моделей горных пород в зависимости от характеристик их компонент. Модели эффективного изолированного извилистого капилляра, видимо, целесообразно рассматривать как устаревшие.

В модели Теорелл-Шапиро-Вендельштейна В.Ю. [236] основное внимание уделяется поверхностным свойствам пород, а в рамках модели Doll-Wyllie-Еникеева-Barlai [236] рассмотрены и другие доминирующие механизмы. В работах Faust, Gassman, Wyllie, Добрынина, Hant-Gardner предложен целый ряд различных моделей.

В целом проблематика построения адекватных моделей далеко не исчерпана.

В работах В. Л. Миронова [237÷241], М. К. Добсона [242, 243], К. Х. Кауппа [239], П. П. Боброва [237, 239, 244] и группы сотрудников основное внимание сосредоточено на разработке «спектроскопической модели диэлектрической проницаемости влажных почвогрунтов» [243, 244].

Этими авторами предложена спектроскопическая модель КДП влажных почвогрунтов пока лишь в микроволновом диапазоне. В настоящее время ими предложен метод определения диэлектрической проницаемости связанной воды, находящейся непосредственно в почвогрунте, и способ измерения относительной доли этого компонента влаги.

Известные модели КДП почвогрунтов, которые используются в алгоритмах радарного и радиометрического зондирования Земли, не учитывают спектроскопические свойства связанной воды, которая присутствует во влажной почве как отдельный компонент.

В табл. 1.2 приведена классификация существующих моделей<sup>3</sup>.

Таблица 1. 2

Авторы	1	2	3	4	5
Арчи	В	В	В		
Дахнов-Кобранова	С	В	С	А	С
Doll	А			А	
Wyllie	Е		С	Е	Е
Pirson	С	С	С		С
Шапиро	С		С	С	
Fatt	Д		Д		
Вендельштейн	С		С	С	
Буряковский	С	С	С		
Добрынин		Д	Д		Д
Ханин	С	С	С		
Элланский	Д	В	Д	В	
Schopper	Е		Е		
Serra	В	В	В		
Dumanouir-Coates	А		А	А	
Еникеев	Е	Е	Е	Е	
Korvin	Е	Е	Е		
Ефимов	Е	Е	Е		
Sen	Е			Е	
Pope	Е		Е		
Dvorkin		Е			Е
Lycia		Е	В		

Показано, что, используя КДП связанной и свободной воды, измеренные с помощью разработанного метода для двух частот, можно найти параметры релаксации Дебая для этих компонентов влаги и осуществить прогнозирование КДП почвогрунтов во всем микроволновом диапазоне.

Они позволяют по экспериментальным данным построить вероятностную модель распределения характеристики процессов релаксации  $F(\theta)$  в данном

<sup>3</sup> Строки таблицы упорядочены в квазихронологическом порядке и условно отнесены к тому или иному автору. Содержание ячеек отвечает последней редакции разрабатываемого подхода. Столбцы таблицы отвечают применяемому методу. В ячейках таблицы также используются числовые коды: А-полуэмпирический метод; В-эмпирические типологии; С- укладка частиц и одиночный капилляр; Д - пересекающиеся капилляры с заданной геометрией; Е-смеси частиц, вариационный принцип, фракталы; (1. Сопrotивление – пористость-насыщенность-глинистость; 2. Связанная вода - пористость, компонентный и гранулометрический состав, глубина; 3. Проницаемость - пористость-состав-глубина; 4. Диффузионно-адсорбционные потенциалы; 5. Интервальное время – пористость-состав-глубина).

материале  $(\theta, F(\theta), \alpha, \beta)$  и получить информацию об особенностях их протекания, а следовательно, о строении и составе исследуемых материалов [184, 296, 300, 301,].

Рассмотренный выше способ решения уравнений Максвелла позволяет с единых позиций подойти к пониманию экспериментальных результатов, в частности объяснить аномальные электрические свойства влажных грунтов.

Комплексность и взаимосвязанность параметров электрических свойств следуют не просто из формального преобразования Лапласа применительно к уравнениям Максвелла, приведенным на рис. 1.1, а вызваны физическими особенностями протекания в грунтах процессов проводимости и поляризации.

В зависимости от вида приложенного поля (импульсного или непрерывного) и особенностей среды можно получить значения её эффективных параметров, которые определяются либо проводимостью, либо поляризуемостью. При этом значения эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_e$  будут определяться следующими факторами:

- торможением свободного движения ионов, обусловленным вязкостью раствора;
- неоднородной энергетической структурой порового раствора;
- числом процессов проводимостей (с разными временами релаксаций), участвующих в переносе заряда.

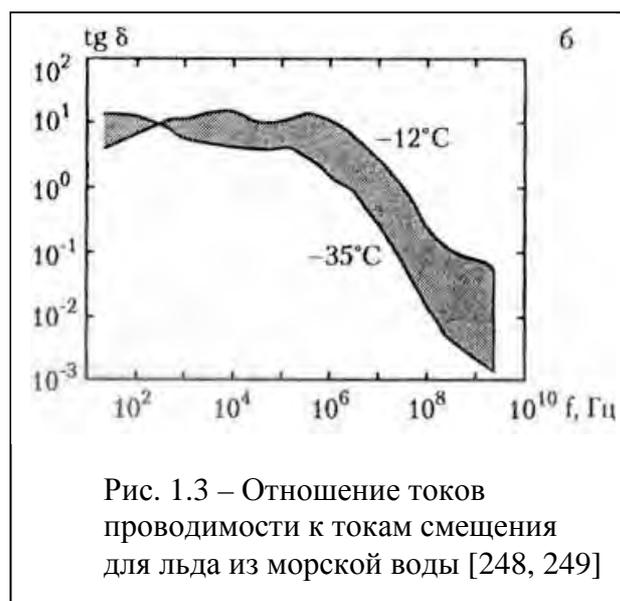
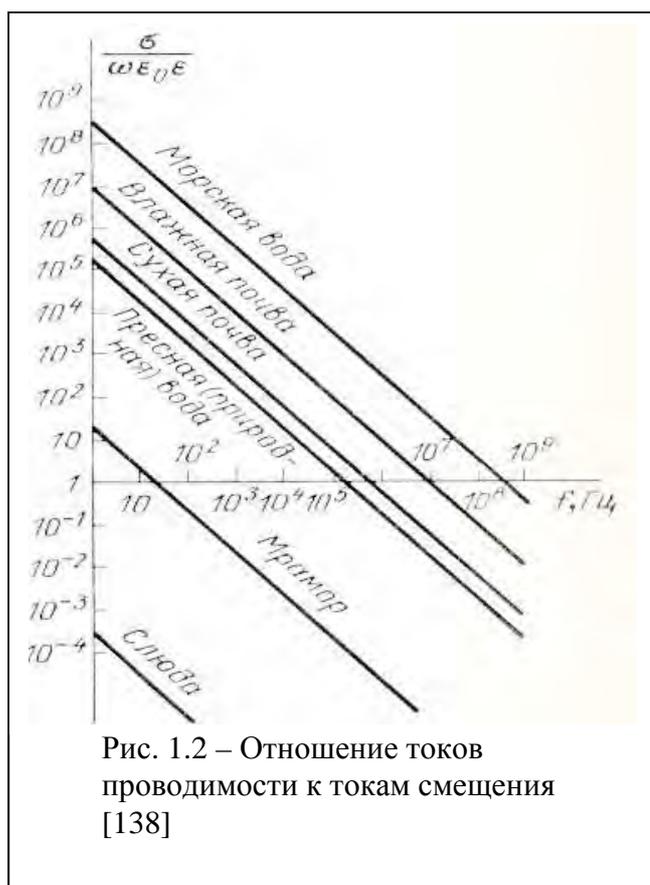
Основной практической задачей, решаемой при использовании любого вида радиозондирования при идентификации подповерхностных структур, является определение глубины залегания слоя или объекта. Она определяется формулой

$$R = \frac{V_\phi \cdot \Delta t}{2},$$

где  $\Delta t$  – задержка зондирующего сигнала;  $V_\phi$  – фазовая скорость в среде с конечной проводимостью [291]:

$$V_\phi = 1 / \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \epsilon_a}{2} \cdot (\sqrt{1 + \sigma_s^2 / \omega^2 \cdot \epsilon_a^2} + 1)}, \quad (1.6)$$

где  $\sigma_s^2 / \omega^2 \cdot \epsilon_a^2 = \operatorname{tg}^2 \delta(\omega)$  - формализованное представление тангенса угла диэлектрических потерь;  $\sigma_s$  - удельная электрическая проводимость (См/м);  $\epsilon_a$  и  $\mu_a$  - абсолютные диэлектрическая (Ф/м) и магнитная (Гн/м) проницаемости среды. Вид идеализированной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для некоторых сред представлен на рис.1.2, реальная зависимость – на рис.1.3.



В пористой влажной подстилающей среде нет идеально свободных либо идеально связанных носителей зарядов. Эти носители (ионы, группы и комплексы) скорее полусвободны (полусвязаны) в зависимости от энергетической структуры и ионного состава порового раствора. Физически это означает наличие некоторого набора процессов проводимости и поляризации, характеризующихся

- разным временем релаксации;
- сдвигом по фазе между этими процессами;

- взаимным влиянием этих процессов друг на друга.

Выражения (1.4) и (1.5) характеризуют эффективные значения  $\sigma(\omega)$  и  $\varepsilon(\omega)$  среды. Эти особенности полностью соответствуют экспериментальным данным для талого и мёрзлого состояния [67, 71÷74].

При очень больших частотах ( $\sigma_s^2 / \omega^2 \cdot \varepsilon_a^2 \ll 1$ ) фазовая скорость стремится к скорости распространения в диэлектрической среде ( $\sigma_s = 0$ ) с параметрами  $\mu_a$  и  $\varepsilon_a$ :  $V_\phi \rightarrow 1 / \sqrt{\mu_a \cdot \varepsilon_a}$ .

Выражение для групповой скорости имеет вид [262]

$$V_{\text{ГР}} = V_\phi - \lambda \cdot \frac{\partial V_\phi}{\partial \lambda},$$

где  $\lambda$  – длина волны в среде<sup>4</sup>.

Электрофизические свойства, описываемые КДП  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega)$  и  $\text{tg} \delta$ , в подстилающей среде обусловлены всеми видами структурной, дипольно-релаксационной и ионно-релаксационной поляризации.

## **1.1 Общие закономерности изменения электрофизических параметров почв**

Инженерно – геологические особенности почв отличны от особенностей подстилающих их почвообразующих горных пород, что существенно при георадиолокационных измерениях. При характеристике почв как грунтов в первую очередь следует учитывать особенности, свойственные всем их типам[44]:

- своеобразие состава, выражающееся в тесном сочетании минеральных и высокодисперсных органических соединений;
- наличие чётко выраженных генетических горизонтов в вертикальном разрезе (профиле);
- наличие выраженной макроструктуры.

---

<sup>4</sup> Однако при наличии существенного поглощения введение понятия групповой скорости вообще невозможно, так как в поглощающей среде волновые пакеты не распространяются, а подвергаются быстрому размыванию [262].

Классификация почв по гранулометрическому составу (по Н.А. Качинскому) приведена в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Содержание физической глины (частицы меньше 0,01 мм), %			Содержание физического песка (частицы больше 0,01 мм), %			Краткое название почвы по механическ ому составу
Почвы						
подзол. типа	степного типа, крас- ноземы и желто- земы	солонцы и сильно солонце- ватые почвы	подзо- листого типа почво- образо- вания	степного типа, крас- ноземы и желто- земы	солонцы и сильно солонце- ватые почвы	
0-5	0-5	0-5	100-95	100-95	100-95	песок рыхлый
5-10	5-10	5-10	95-90	95-90	95-90	песок связанный
10-20	10-20	10-15	90-80	90-80	90-85	супесь
20-30	20-30	15-20	80-70	80-70	85-80	суглинок легкий
30-40	30-45	20-30	70-60	70-55	80-70	суглинок средний
40-50	45-60	30-40	60-50	55-40	70-60	суглинок тяжелый
50-65	60-75	40-50	50-35	40-25	60-50	глина легкая
65-80	75-85	50-65	35-20	25-15	50-35	глина средняя
≥80	≥85	≥ 65	≤20	≤15	≤ 35	глина тяжелая

Первой составляющей электрофизических свойств почв являются  $\varepsilon'_3(\omega)$  и  $tg\delta$ , характеризующие почвенно - поглощающий комплекс (ППК) – «совокупность высокодисперсных минеральных, органоминеральных и органических частиц, обладающих ионообменной способностью» [16, 17, 41].

Для почвы преобладание отрицательного поверхностного заряда приводит к более яркой способности поглощать катионы, чем анионы. Находящиеся на поверхности почв обменные катионы обуславливают такие свойства, как рН (кислотно – щелочные свойства) среды и солевой состав почвенного раствора.

Для дисперсных систем увеличение плотности сложения, количества контактов твердых частиц между собой, увеличение объёмного содержания компонентов с большей  $\varepsilon$  приводит к возрастанию  $\varepsilon(\omega)$  системы в целом.

Электропроводность почвы и контактная разность потенциалов, формирующаяся на поверхности раздела фаз двойных электрических слоёв (ДЭС)<sup>5</sup>, во многом обусловлена содержанием илистой фракции, гумуса и ёмкостью поглощения, которая зависит от свойств и объёмной концентрации зарядов ДЭС. Её увеличение приводит к возрастанию электрической ёмкости системы и доли структурной поляризации. Например, в солончаках, которые являются сильно электропроводными, учитывается илистая фракция, фракция физической глины, гумус, ёмкость поглощения и реакция среды.

Почвенная структура, образуемая под воздействием сил Ван-дер-Ваальса и остаточных валентностей, в результате химического закрепления агрегатов определяется электростатическим взаимодействием поглощённых катионов с поглощающей поверхностью, которое, в свою очередь, обусловлено типом адсорбированных катионов.

Свойства и спектральный состав поглощения поля электромагнитной волны (ЭМВ) в подстилающей среде определяются:

- разностью потенциалов на границе раздела фаз;
- энергетическим состоянием обменных катионов, обуславливающим их подвижность в электромагнитном поле.

Изменение типа насыщающего катиона сопровождается изменением его потенциальной энергии [16, 17]. Её уменьшение определяет возрастание подвижности поглощенных катионов в электромагнитном поле и обуславливает наибольшие значения  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  в солонцах и солончаках, насыщенных одновалентными катионами натрия.

---

<sup>5</sup> ДЭС - особое распределение электрических зарядов в приграничных областях. ДЭС бывает трех видов: ионный, адсорбционный и ориентационный. Ионный создается за счет остаточных электрических сил на поверхности твердого компонента пород. Адсорбционный возникает в результате избирательной адсорбции ионов индифферентного электролита на незаряженной поверхности твердой фазы. Ориентационный ДЭС формируется из дипольных молекул воды. Часть из них ориентируется и удерживается в поровом пространстве около положительных и отрицательных зарядов на поверхности твердой фазы пород, образуя слой прочносвязанной воды.

Согласно К.К.Гедройцу, наибольшую степень поглощения имеют катионы водорода (эквивалентная электропроводность  $H^+ \approx 225(0^{\circ}C) \div 630(100^{\circ}C)$ ;  $Na^+ \approx 26.5(0^{\circ}C) \div 145(100^{\circ}C)$ ,  $dim = cm^2 / (Om \cdot g \cdot экв)$ ). Поэтому наименьшие значения  $\epsilon$  и  $tg\delta$  имеют серые лесные почвы, насыщенные катионами водорода и алюминия<sup>6</sup>.

Так, наличие в среде двухвалентных катионов кальция и магния обуславливает релаксационные процессы (для краснозёмов  $Ca^{++} + Mg^{++} \sim 55\%$ ); высокое содержание обменного натрия приводит к резкому увеличению дисперсности среды, увеличению плотности поверхностного заряда и контактной разности потенциалов. Поглощение поля ЭМВ приводит к появлению в среде релаксационных колебаний, которые определяются:

- величиной поверхностной проводимости [13, 14];
- ёмкостью поглощения органических коллоидов [41];
- возрастанием доли дипольной поляризации за счёт ориентации в сильном электрическом поле органических коллоидов.

Электропроводность подстилающей среды определяется подвижностью легкорастворимых солей и электродвижущей силой (э.д.с) почвенного раствора [6]. Например, своеобразие солончаков, занимающих территориальное положение вдоль Мёртвого и Красного морей (по Иорданскому разлому) [250], обусловлено высокой степенью подвижности всех заряженных частиц [8, 16], т.е. широким спектром значений энергии активации процессов релаксации [27, 29]<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup>Влияние свойств поглощающего комплекса на величины  $\epsilon$  и  $tg\delta$  определялось при вытеснении поглощенных оснований раствором соляной кислоты [17]. Для опыта были взяты образцы чернозёма обыкновенного, тёмно-каштановой почвы и солонца каштанового [50]. Вытеснение поглощенных оснований из почвенного ППК привело к значительному уменьшению  $\epsilon$  и  $tg\delta$ . Диэлектрическая проницаемость чернозёма обыкновенно уменьшалась в 1.5-1.7 раза,  $tg\delta$  в 15-20 раз; в тёмно-каштановой почве  $\epsilon$  уменьшилось в 1.04-1.5 раза,  $tg\delta$  в 8-11 раз. Особенно сильные изменения электрофизических параметров наблюдались при вытеснении объёмных оснований из ППК солонца каштанового, в котором  $\epsilon$  уменьшилась в 1.5-2.5 раза,  $tg\delta$  – в 8 - 40 раз.

<sup>7</sup> Высокое содержание обменного натрия приводит к резкому увеличению дисперсности среды, увеличению плотности поверхностного заряда и контактной разности потенциалов [17, 39].

Для гидроморфных (активных к воде) солончаков характерен максимум  $tg\delta$  на 1 МГц с последующим его падением при увеличении частоты.

### 1.1.1 Классификация почв по изменениям электрофизических параметров

Изменение электрофизических параметров почв ( $\varepsilon$ ,  $tg\delta$ ) в области релаксационного максимума обусловлено: содержанием высокодисперсных составляющих твердой фазы (ТФ) [44, 50] ( гумуса; илистой фракции и фракции физической глины); ёмкостью поглощения -  $C_{\text{погл}}$ ; типом насыщающего катиона ППК -  $T_{\text{катион}}$ ; наличием карбонатов -  $CaCO_3$ ; величиной рН среды; концентрацией высокорастворимых солей -  $C\%_{\text{NaCl}}$ ; площадью удельной поверхности –  $S$ ; плотностью –  $\rho$ ; гигроскопичностью материала - ГМ

$$\varepsilon\{\theta_3(t^0, C)\} = f(TФ_{\text{дисп}}, C_{\text{погл}}, T_{\text{катион}}, CaCO_3, pH, C\%_{\text{NaCl}}, S, \rho, ГМ).$$

Основным фактором, определяющим изменение электрофизических параметров в профиле почв, является перераспределение органической и минеральной составляющих вниз по глубине в почвенном профиле. Количество карбонатов (соли угольной кислоты  $H_2CO_3$  - известняк, доломит, мел, мергель) и величина рН среды обуславливают возрастание  $\varepsilon$  и  $tg\delta$  по глубине почвенного профиля.  $\varepsilon\{\tau(t^0, C)\} = f(\dots, CaCO_3, pH, \dots)$ .

Наложение солонцового процесса на дерновый процесс в тёмно-каштановых и каштановых почвах и значительное преобладание солонцового процесса в солонцах каштановых определяют возрастание электрофизических параметров в следующем ряду почв:

- тёмно-каштановые  $\varepsilon = (5 - 10) \div (35 - 40)$ ,  $tg\delta = 0.2 \div 1.4$ ;
- каштановые  $\varepsilon = (5 - 10) \div (35 - 40)$ ,  $tg\delta = 0.5 \div 5.0$ ;
- солонцы каштановые  $\varepsilon = 10 \div 45$ ,  $tg\delta = 0.5 \div 4.5$ ;
- солончаки  $\varepsilon = 15 \div 50$ ,  $tg\delta = 0.2 \div 7.0$ .

Переход от дёрнового процесса к солонцовому резко изменяет профильное распределение  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . При переходе от солонцеватых каштановых почв к солонцам каштановым профиль чётко дифференцируется:

- по содержанию ила и обменного натрия (Na);
- по скачку ёмкости поглощения.

Фактором, максимально определяющим профильные изменения  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  солончаков, является концентрация легкорастворимых солей  $\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(\dots, C_{\text{погл}}, T_{\text{катион}}, \dots, C\%_{\text{NaCl}})$ .

### 1.1.2 Влияние гумуса на изменение электрофизических параметров почв

Характерной особенностью почв является влияние гумуса на изменение  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . Нарастание процесса гумусонакопления характеризуется увеличением электрофизических параметров в следующем ряду почв:

- светло-серые лесные;
- серые-лесные;
- тёмно-серые лесные;
- чернозёмы южные;
- чернозёмы обыкновенные.

$$\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(\text{ТФ}_{\text{дисп}}, \dots, \dots, \dots, \dots, \dots).$$

Приведенный выше ряд почв характеризуется увеличением содержания органического вещества в гумусовых горизонтах [23, 29, 31, 55] и изменением качественного состава гумуса [42, 43, 45].

Уменьшение значений электрофизических параметров в серых лесных почвах определяется наличием фульвокислот<sup>8</sup> и более подвижных гуминовых

<sup>8</sup> Фульвокислоты – жидкости светло-желтой, светло-бурой окраски, растворимые в воде и щелочах, образуя фульваты. Они содержат углерод (41÷46%), водород (4÷5%), азот (3÷4%), кислород (44÷48%), отличаются соотношением ядра и периферийной части в молекуле (слабо выраженное ядро и большая часть периферии). Водные растворы фульвокислот сильно кислые (рН = 2,6÷2,8), молекулярная масса колеблется от 2 до 500 тыс. ат. ед, энергично разрушают минеральную часть почвы.

кислот<sup>9</sup>; возрастание доли гуматного гумуса (продукта нейтрализации гуминовых кислот) в чернозёмах [31, 54] приводит к увеличению  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ .  $\varepsilon \{ \tau(t^0, C) \} = f(\dots, \dots, \dots, \dots, \text{CaCO}_3, \text{pH}, \dots)$ .

Возрастание электрофизических параметров при увеличении содержания гумуса происходит из – за увеличения полидисперсности гумусовых веществ и роста удельной поверхности органических коллоидов<sup>10</sup>, что в физике диэлектриков тождественно увеличению поверхностного заряда, поверхностной проводимости и доли структурной поляризации. Содержание органического вещества в гумусовых горизонтах почв определяет величину ёмкости поглощения, которая намного превышает ёмкость поглощения минеральных компонентов [17, 41].

Однако, несмотря на увеличение удельной поверхности и величины ёмкости поглощения, гумусово-аккумулятивные горизонты<sup>11</sup> почв характеризуются более низкими значениями  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  [50]. Увеличение доли минеральной составляющей твёрдой фазы вниз с глубиной определяет возрастание  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ . В то же время увеличение содержания органического вещества в погребённом гумусовом горизонте чернозёмов приводит к характерному уменьшению  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  [50].

Более низкие значения электрофизических характеристик верхних горизонтов определяются невысокой удельной проводимостью растворов гумусовых кислот (гуминовых, гиматомелановых и фульвокислот) [57]. Образование органо-минеральных комплексов в верхних горизонтах [3, 21]

<sup>9</sup> Гуминовые кислоты - сложная смесь природно - органических соединений, образующихся при разложении отмерших растений и их гумификации (биохимические превращения продуктов разложения органических остатков в гумус при участии микроорганизмов, влаги и кислорода атмосферы). В сухом состоянии - неплавкий аморфный темно-бурый порошкообразный продукт. Гуминовые кислоты входят в состав органической массы торфов (25÷50%), землистых и блестящих бурых углей (соотв. 45÷60 и 5÷15%), окисленных каменных углей (до 60%), некоторых почв (до 10%). При нейтрализации гуминовые кислоты выпадают в виде темно - окрашенного объемистого осадка.

<sup>10</sup> Л.Н.Александровой [2,3] было установлено, что почвенные коллоиды подразделяются на электроотрицательные гели и изоэлектрические осадки. Только на поверхности электроотрицательных гелей происходят реакции катионного обмена.

<sup>11</sup> Гумусово – аккумулятивный горизонт формируется в верхней части профиля при трансформации органического вещества растений. В нем не выражены процессы выщелачивания минеральных веществ, он более тёмной окраски.

снижает величину электрического потенциала [66] и способствует уменьшению значений  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$ .

Большое влияние на изменение электрофизических параметров почв оказывает ёмкость поглощения, тесно связанная с содержанием органического вещества.  $\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(\dots, C_{\text{погл}}, \dots, \dots, \dots)$ . Её увеличение определяет возрастание:

- объёмного заряда;
- электрической ёмкости диполей почвенных коллоидов;
- градиента потенциала на межфазовых поверхностях.

Процессы поляризации и релаксации обусловлены не только величиной ёмкости поглощения, но и качественным составом поглощенных оснований, который определяется механической, физической, химической, биологической и физико-химической (обменной) поглотительной способностью почвы [16].

Говоря о поглотительной способности, или ёмкости катионного обмена (ЕКО)<sup>12</sup>, имеют в виду физико-химическую, или обменную поглотительную способность.  $\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(\dots, T_{\text{катион}}, \dots, \dots, \dots)$ .

Состав ППК существенно влияет на многие физико-химические свойства почв [17]:

- увеличение содержания обменного натрия в ППК приводит к резкому увеличению степени дисперсности почвы, величины удельной поверхности и плотности поверхностного заряда [17, 53];
- величина электрокинетического потенциала ( $\xi$ -потенциала) находится в прямой зависимости от свойств ППК [28]; с увеличением валентности адсорбированного катиона величина  $\xi$ -потенциала уменьшается [6, 15, 33, 40].

---

<sup>12</sup> Ёмкость катионного обмена почв связана с различными почвенными характеристиками, в том числе с их механическим составом, преобладающей группой глинистых минералов, содержанием гумуса и реакцией почвенного раствора - его рН [16, 18, 29, 41]. По отношению к различным катионам адсорбционные свойства почв зависят от сочетания в их составе органического вещества, минералов группы слюд монтмориллонита, механического раздробления минералов, т.е. поглотительная способность различных носителей почв избирательна. Так, органическое вещество избирательно адсорбирует Са или Н, монтмориллонит - Mg, а минералы группы слюд - аммоний. Кроме того, наблюдающаяся селективность связана с собственными свойствами катионов и реакцией среды. Значительно большей энергией поглощения обладают, как правило, катионы с более высоким зарядом, а при равных зарядах - с большей атомной массой [16, 20, 26, 41].

Максимальным значениям  $\xi$ -потенциала в профиле солонцов соответствуют максимальные значения  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ .

Таким образом, уменьшение значений электрофизических параметров почв происходит пропорционально:

- величине ёмкости поглощения (в чернозёме обыкновенном);
- содержанию в ППК обменного натрия (в солонце).

$$\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(\dots, C_{\text{погл}}, \dots, C\%_{\text{NaCl}}, \dots).$$

С составом ППК тесно связана величина рН среды, увеличение которой определяет возрастание электрофизических параметров почвы [58]. Серые лесные почвы с кислой реакцией среды характеризуются наименьшими значениями  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$ , возрастание величины рН в чернозёмах и тем более в солонцах и солончаках определяет повышение  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  в этих почвах. При кислой реакции среды в результате присоединения к кислороду протона и образования гидроксильной группы понижается отрицательный заряд решётки слоистых минералов и, следовательно, снижается ЕКО; очень сильное подкисление может снизить ёмкость обмена слоистых минералов до нуля. При щелочной реакции среды в результате обратного процесса возрастает отрицательный заряд решётки кристаллита, а значит, и ЕКО [34].

Существенное влияние на изменение электрофизических параметров оказывает содержание в профиле карбонатов. Изменение состава и концентрации почвенного раствора, высокая щёлочность карбонатных горизонтов значительно увеличивают значение КДП [34].

Характерная для солончаков высокая концентрация легкорастворимых солей определяет максимальные значения электрофизических параметров и высокую степень их взаимосвязи со всеми свойствами солончаков. Подтверждением влияния легкорастворимых солей на величины  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  является уменьшение их значений в почвах, подверженных длительному орошению [60].

В табл. 1.4 (по К. К. Гедройцу) представлено влияние поглощённых катионов на электрофизические параметры почв.

Таблица 1.4

Глубина, см	E <sub>погл</sub> , мг-экв. на 100 г почвы	Na <sub>погл</sub> , % от E <sub>погл</sub>	Σ солей, %	Значения $\varepsilon$ и $\text{tg } \delta$			
				До промывки 0.05n · HCl		После промывки 0.05n · HCl	
				$\varepsilon$	$\text{tg } \delta$	$\varepsilon$	$\text{tg } \delta$
Чернозем обыкновенный							
0-7	45.5	-	0.16	12.8	0.12	8.5	0.008
35-45	23.0	-	0.19	20.0	0.72	12.6	0.040
115-125	18.0	-	-	23.6	0.62	13.7	0.040
Темно-каштановая почва							
0-13	20.5	3.6	0.11	11.5	0.10	10.8	0.011
37-47	18.0	2.7	0.15	15.3	0.22	13.8	0.028
185-195	6.5	4.1	0.09	15.9	0.25	10.6	0.025
Солонец каштановый							
0-10	15.5	11.9	0.07	18.2	0.56	12.1	0.070
10-18	26.1	51.0	0.35	34.5	2.10	13.8	0.060
70-80	12.7	13.0	0.95	30.9	2.25	12.4	0.060

Влияние высокодисперсных фракций ила и физической глины на изменение  $\varepsilon$  и  $\text{tg } \delta$  является характерным для всех почв.

Одним из важнейших факторов ЕКО является дисперсность. В [16] указано, что поглотительная способность резко возрастает при диаметре почвенных частиц менее 0.001 мм, т.е. обменная способность почвы сосредотачивается, главным образом, в её илистой части. Так особенно отчетливо тонкодисперсные фракции проявляются в профиле серых лесных почв (максимальные значения  $\varepsilon$  и  $\text{tg } \delta$  соответствуют наибольшему содержанию ила) и в профиле солонцов, максимальные значения  $\varepsilon$  и  $\text{tg } \delta$  которых наблюдаются в иллювиальном (намывном) горизонте.

Каолинит, образующийся непосредственно из полевого шпата, практически не имеющий ёмкости поглощения, растертый до высокой степени

дисперсности, имеет ёмкость, превышающую ёмкость вермикулита и монтмориллонита [21].

Влияние ила и физической глины определяется изменением физико-минералогического состава илистой фракции [20] и значительным увеличением влияния следующих факторов:

- удельной поверхности<sup>13</sup> [13, 61];
- количества ДЭС межфазовых поверхностей;
- поверхностей проводимости;
- структурной поляризации.

$$\varepsilon\{\theta_s(t^0, C)\} = f(T\Phi_{\text{ДИСП}}, C_{\text{ПОГЛ}}, T_{\text{КАТИОН}}, \text{CaCO}_3, \text{pH}, C\%_{\text{NaCl}}, S, \rho, \text{ГМ}).$$

Полное представление о природе максимумов поглощения возможно получить, учитывая вклад каждого фактора в процессы релаксационной поляризации. Однако сложные взаимосвязи электрофизических параметров со свойствами почв не позволяют провести такую оценку по значениям коэффициентов корреляции.

### 1.1.3 Изменение электрофизических параметров почв при различных формах почвенной влаги

Различия механического состава, удельной поверхности, вида насыщающего катиона, определенная структура организации твердой фазы почвы обуславливают различия термодинамического потенциала почвенной влаги. Более корректное представление о характере и механизме поглощения почвой электромагнитной энергии может быть получено лишь при одном и том же энергетическом состоянии влаги в каждой почве. Поэтому частотные зависимости  $\varepsilon$  и  $\text{tg}\delta$  известны при определенных формах почвенной влаги – абсолютно сухом состоянии, гигроскопической, максимальной гигроскопической, максимальной молекулярной влагоёмкости и наименьшей влагоёмкости, каждая из которых соответствует определенному

<sup>13</sup> Суммарная площадь поверхности единицы массы породы S, измеряемая в квадратных метрах на 1 г.

энергетическому состоянию, определенной степени связи влаги с поверхностью частиц твердой фазы.

Исследования частотной дисперсии КДП чернозёма обыкновенного, тёмно-каштановой почвы, каштанового солонца и солонца обыкновенного, солончака показали наличие трёх частотных областей, в которых наблюдается максимальное поглощение почвой энергии переменного электромагнитного поля: область низких частот ( $\approx 10^3$  Гц), область высоких частот ( $10^4 - 10^6$  Гц), диапазон СВЧ ( $\leq 10^{10}$  Гц).

Во всех исследованных почвах релаксационные максимумы поглощения проявляются лишь при увлажнении. Очевидно, только наличие влаги создает такие оптимальные условия, при которых возможно проявление поверхностной проводимости, межфазовых переходов и при которых гидратированные почвенные частицы принимают участие в процессах проводимости и релаксации [48].

На низких частотах максимум поглощения проявляется в области отрицательных температур при увлажнении до максимальной молекулярной влагоёмкости. Это дает возможность считать, что данный максимум соответствует релаксационному максимуму поглощения льда, который находится в области частот порядка  $10^3 \div 10^4$  Гц.

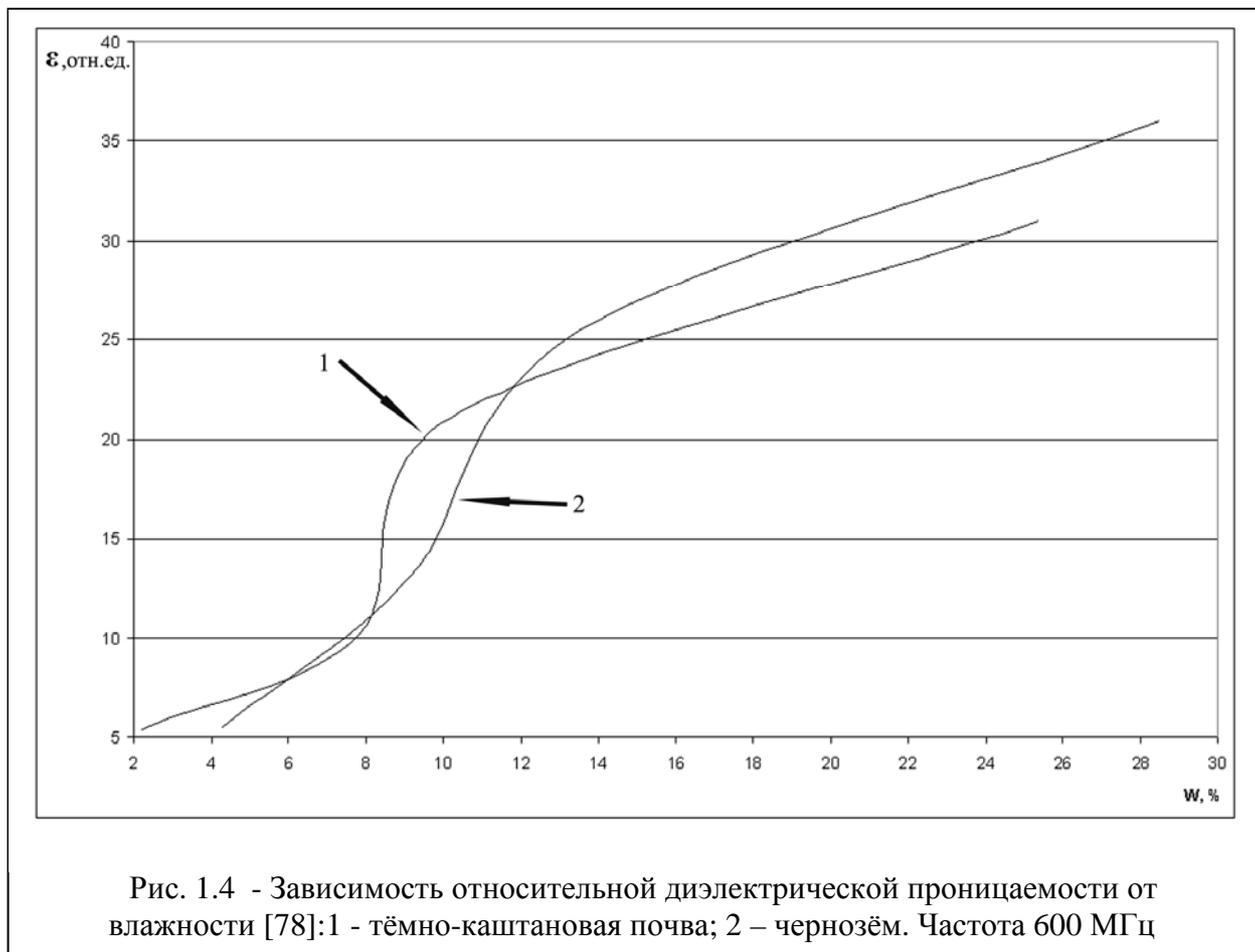
Релаксационный максимум поглощения в диапазоне СВЧ проявляется при всех исследуемых формах почвенной влаги, его положение на шкале частот не зависит от свойств почв и объёмного содержания влаги.

Физическая сущность СВЧ поглощения состоит в том, что в см- диапазоне радиоволн коэффициент поглощения СВЧ энергии диполями воды во много раз превышает поглощение сухим веществом [12]. Величина поглощения электромагнитной энергии в диапазоне СВЧ пропорциональна общему количеству воды, содержащейся в единице объема [5, 36, 37].

Изменение энергетического состояния почвенной влаги оказывает закономерное влияние на величину  $\text{tg} \delta$ . Уменьшение потенциала почвенной влаги при ее переходе от прочносвязанной воды к рыхлосвязанной и свободной

сопровождается увеличением значений  $\operatorname{tg} \delta$ , который определяется свойствами почв [49].

На рис. 1.4 приведено изменение относительной диэлектрической проницаемости от влажности для тёмно-каштановых почв и чернозёма. Измерения проводились на частоте 600 МГц.



В то же время  $\varepsilon$  в области максимума СВЧ поглощения характеризуется лишь наличием определенной формы почвенной влаги и практически не зависит от типа почв, ее химических и физико-химических свойств. Для таких типов почв, как луговой солончак, каштановые солонцы, чернозём обыкновенный и тёмно-каштановая почва, при  $t^{\circ} = +20^{\circ}\text{C}$  значения  $\varepsilon$  составляют:

- при гигроскопической влажности  $-\varepsilon_{\Gamma} = 5.3 \div 6.0$ ;
- при максимальной гигроскопической влажности  $-\varepsilon_{\text{МГ}} = 9.8 \div 11.4$ ;
- при максимальной молекулярной влагоемкости  $-\varepsilon_{\text{ММВ}} = 16.5 \div 19.0$ ;

- при наименьшей влагоемкости –  $\varepsilon_{\text{нв}} = 24.7 \div 27.5$ .

#### **1.1.4 Исследование высокочастотного релаксационного максимума поглощения почв**

Наиболее простым для исследования влияния переменного электромагнитного поля на почву представляется изучение высокочастотного релаксационного максимума поглощения. Согласно исследованиям [9], в области частот 0.1 ÷ 5.0 МГц наблюдается «наибольшая поляризуемость почвы».

Исследования Перфильевой В. Д. [44, 50, 60] показали, что высокочастотный релаксационный максимум поглощения полностью определяется основными физическими, химическими и физико-химическими свойствами почв [60]. При этом в процессах релаксационной поляризации и электропроводности принимают участие:

- гидратированные частицы твёрдой фазы почвы;
- диполи почвенных коллоидов;
- диффузные катионы ДЭС;
- ионы почвенного раствора;
- диполи воды.

При всех исследуемых формах влаги для каждой почвы характерны:

- величина максимума поглощения;
- энергия активации процесса релаксации.

Наибольшую величину максимума поглощения имеют каштановый солонец и луговой солончак; для этих почв релаксационный максимум наблюдается на более высоких частотах, нежели для обыкновенного чернозёма и тёмно-каштановой почвы.

Согласно теории [24, 51], чем больше величина электропроводности, тем на более высоких частотах наблюдается релаксационный максимум поглощения. Величина электропроводности  $\sigma$ , в свою очередь, определяется концентрацией

проводящих электронов  $N_n$ , дырок  $N_p$ , их подвижностью  $\eta_p$  и  $\eta_n$ , электрическим зарядом  $e$ :  $\sigma = e \cdot (N_n \cdot \mu_n + N_p \cdot \mu_p)$ .

Для засоленных почв величина электропроводности прямо пропорциональна содержанию легкорастворимых солей и поглощенного натрия [7, 8, 10, 11, 22, 46]<sup>14</sup>, что и определяет значительные концентрации проводящих частиц, высокие значения  $\varepsilon$  и  $\text{tg} \delta$  этих почв и сдвиг максимума поглощения в сторону более высоких частот.

Подвижность проводящих частиц в электрическом поле характеризуется величиной потенциальной энергии [62, 63]. Величина потенциальной энергии  $U$  определяется силой  $F$ , действующей на единицу заряда (напряженностью внутреннего электрического поля), величиной заряда  $q$  и диаметром частицы  $d$ :

$$U = -q \cdot \partial F.$$

Следовательно, чем выше валентность ионов, тем большей потенциальной энергией они обладают [16, 20], т.е. тем более высокий барьер им необходимо преодолеть для участия в процессах проводимости и релаксации [1, 4, 32, 47], следовательно, тем меньше их подвижность в электромагнитном поле [64].

Очевидно, что гидратированные двухвалентные катионы имеют большие, по сравнению с одновалентными, размеры  $d$ , что обуславливает увеличение времени релаксации для чернозёма и тёмно-каштановой почвы и сдвиг максимума поглощения для этих почв при всех исследуемых формах почвенной влаги в область более низких частот.

Влага оказывает большое влияние на поляризацию и релаксационные процессы, протекающие в почве при воздействии на неё внешних электромагнитных полей. Вода обладает целым рядом особенностей строения и физико-химических свойств; одной из ее аномалий является высокая диэлектрическая проницаемость свободной воды. В то же время связанная вода,

---

<sup>14</sup> А.Ф. Вадюниной [7÷11] были поставлены эксперименты по изучению зависимости электропроводности почв и песка от концентрации раствора, увлажнения и плотности. Выделены 11 типов и подтипов почв в области гигроскопической влаги.

адсорбированная на поверхности твердых частиц, обладает свойствами, резко отличающимися от свойств свободной (несвязанной) воды. Прочносвязанная вода имеет малую подвижность в электромагнитном поле, её  $\varepsilon$  уменьшается по мере увеличения энергии связи. Для наиболее прочносвязанной воды в почвах  $\varepsilon = 4.5 - 5.8$  [38]. Значения  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  почв, содержащих прочносвязанную гигроскопическую и максимальную гигроскопическую влагу, невысоки.

Рыхлосвязанная и свободная почвенная влага значительно увеличивает значения электрофизических параметров почвы, особенно при наименьшей влагоёмкости, что приводит к возрастанию доли сквозной проводимости [65].

Увеличение содержания почвенной влаги приводит к возрастанию электропроводности почвы [19, 48]. В результате этого происходит возрастание  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg}\delta$  и значительный рост величины максимума поглощения.

Возрастание электропроводности при увеличении содержания почвенной влаги должно приводить к сдвигу максимума поглощения в область более высоких частот [24, 51, 56]. Однако изменение формы почвенной влаги при увеличении её содержания приводит к сдвигу максимума в область более низких частот. Такое поведение максимума является характерным для всех исследуемых почв и может быть объяснено увеличением размеров релаксирующих частиц и уменьшением их потенциальной энергии в результате гидратации [16, 17], что приводит к увеличению значений времени процесса релаксации  $\theta_3(t^0, C)$  согласно выражению П. Дебая [307]:

$$\theta_3(t^0, C) = \frac{4 \cdot \pi \cdot \vartheta \cdot r^3}{k \cdot T},$$

где  $\vartheta$  - коэффициент макроскопической вязкости, зависящий от концентрации частиц;  $r$  - радиус частицы;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура.

Форма кривой максимума поглощения для каждой почвы не имеет острого пика; это свидетельствует о том, что в процессе релаксации участвует несколько видов релаксаторов, каждый из которых вносит определенный вклад

в величину максимума и характеризуется определенной частотой релаксации и временем релаксации.

При увеличении содержания влаги в почве происходит:

- увеличение площади удельной поверхности;
- возрастание концентрации релаксирующих частиц;
- увеличение активности релаксирующих частиц.

Характерной особенностью релаксационной поляризации является её сильная зависимость от температуры. Изменение температуры определяет энергетическое состояние:

- диполей почвенной влаги;
- гидратированных частиц твердой фазы;
- поглощенных катионов;
- ионов почвенного раствора.

Увеличение температуры  $\Rightarrow$  уменьшение потенциальной энергии  $\Rightarrow$  увеличение подвижности и величины электропроводности  $\Rightarrow$  увеличение  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta \Rightarrow$  сдвиг максимума поглощения в область более высоких частот. Такая цепочка справедлива для всех исследуемых форм почвенной влаги.

С увеличением температуры время активации процесса релаксации уменьшается согласно выражению [307]:

$$\theta_3(t^0, C) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \cdot \exp(-U/kT)^{.15}$$

Значения энергии активации процесса релаксации в почвах определяются различиями химико-минералогического состава, свойствами ППК, различной степенью дисперсности, различием термодинамического потенциала почвенной влаги.

Важным фактором, определяющим величину энергии активации, являются свойства поглощенных катионов и ионов почвенного раствора. Двухвалентные

---

<sup>15</sup>  $U$  – энергия активации процесса релаксации (глубина потенциальной ямы);  $T$  – температура, градусы Кельвина;  $k$  – постоянная Больцмана,  $k = 0.8556$  эВ;  $f_0$  – собственная частота колебаний вокруг положения равновесия, Гц.

катионы имеют большую, по сравнению с одновалентными, потенциальную энергию [2]. Она, в свою очередь, определяет активность поглощенных катионов и ионов почвенного раствора и их электропроводность.

Увеличение концентрации одновалентных катионов приводит к увеличению электропроводности [35], а следовательно, и энергии активации процесса релаксации для почв, насыщенных катионами Na. Рост количества двухвалентных катионов увеличивает число частиц с большей энергией закрепления. Это ведет к уменьшению энергии активации для чернозёма обыкновенного и тёмно-каштановой почвы. Увеличение энергии активации процесса релаксации в засоленных почвах определяется также величиной поверхностной проводимости, которая возрастает в почвах, насыщенных Na [53].

Вклад в релаксационные процессы диполей воды обуславливается различным энергетическим состоянием определенных форм почвенной влаги. В состоянии гигроскопической влажности энергия активации невелика; переход к максимальной гигроскопической влажности сопровождается небольшим увеличением энергии активации, так как прочносвязанные диполи воды принимают незначительное участие в процессах релаксации.

Первые слои адсорбированной влаги повторяют структуру поверхности твердых частиц, почвенных минералов [14] и обладают повышенными вязкостью и плотностью.

Такие свойства обуславливают малую подвижность гигроскопической влаги в электромагнитном поле, а уменьшение толщины водной пленки ведет к вырождению диполь - дипольного взаимодействия. Всё это определяет малый вклад гигроскопической влаги в процессы релаксации и, следовательно, небольшие значения энергии активации.

Рыхлосвязанная и свободная почвенная влага при максимальной молекулярной влагоёмкости и наименьшей влагоёмкости вносят существенный вклад в дипольно-релаксационные процессы, определяя высокие значения энергии активации.

В почвах тяжёлого механического состава (каштановые солонцы, луговой солончак) увеличение поверхностной проводимости, количества релаксирующих диполей воды, высокая концентрация поглощенных катионов Na и подвижных ионов легкорастворимых солей обуславливают наибольшие значения энергии активации.

Чернозём обыкновенный, тяжёлосуглинистый по механическому составу, также имеет довольно высокую концентрацию п релаксирующих диполей воды и значительную поверхностную проводимость. Однако значения энергии активации процесса релаксации для чернозёма ниже, чем для солонца и солончака. Это объясняется различием энергетического состояния насыщающих двухвалентных катионов  $Ca^{++}$  и  $Mg^{++}$ , имеющих более высокие значения потенциальной энергии.

## **1.2 Общие закономерности изменения электрофизических параметров грунтов**

По характеру происхождения грунты делятся на естественные - напластования земной коры, находящиеся в естественном уплотненном и увлажненном состоянии, образовавшиеся за миллионы лет в результате разрушения древних горных или морских (озерных, илистых, наносных и пр.) пород, и насыпные - результат деятельности человека. Естественные грунты делятся на крупнообломочные, песчаные и пылевато-глинистые.

В. Р. Вильямс<sup>16</sup> ещё в 1893 г. отметил у частиц грунтов  $\leq 1$  мкм наличие броуновского движения в водной среде. В дальнейшем С. С. Морозов [196] установил резкое изменение минерального состава, физических и физико – химических свойств частиц  $\leq 1$  мкм, что послужило основанием выделить эти

---

<sup>16</sup> «Опыт исследования механического анализа почв», Петровская академия, 1893 г., ноябрь, 24. Избранные сочинения академика В. Р. Вильямса издаются Академией Наук СССР в трех томах. Первый том включает работы В. Р. Вильямса в области почвоведения, начиная с 1893 г. по 1938 г.

частицы в отдельную фракцию, называемую глинистой, поскольку преобладающими в ней, как правило, являются глинистые минералы.

Выделение верхней границы пылеватой фракции – 0.05 мм, по И. В. Попову [197], обосновывается тем, что: 1) частицы крупнее 0.05 мм обнаруживаются визуально, как и остальные песчаные фракции; 2) прибавление к песку частиц менее 0.05 мм резко меняет многие его характеристики (уменьшает пористость, фильтрационную способность и др.); 3) фракция менее 0.05 мм слабо водопроницаема. Выделение верхней границы песчаной фракции - 2 мм обосновывается тем, что частицы крупнее 2 мм не обладают капиллярным поднятием и водоудерживающей способностью. Более дробное деление фракций указано в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Слагающие элементы		Размер слагающих элементов, мм
Классы	Фракции	
Валуны	крупные	более 800
	средние	400-800
	мелкие	200-400
Галька и щебень	крупные	100-200
	средние	60-100
	мелкие	40-60
Гравий и дресва	очень крупные	20-40
	крупные	10-20
	средние	4-10
	мелкие	2-4
Песчаные частицы	грубые	1-2
	крупные	0.5-1
	средние	0.25-0.5
	мелкие	0.10-0.25
	тонкие	0.05-0.10
Пылеватые частицы	крупные	0.01-0.05
	мелкие	0.001-0.01
Глинистые частицы		< 0.001

В зарубежных странах используются иные размеры. В США (номенклатура Public Road Administration) и в ряде стран Западной Европы выделяются: глинистая фракция размером < 0.002 мм; пылеватая фракция (silt) размером 0.02

– 0.002 мм; тонкопесчаная фракция 0.02 – 0.1 мм; песчаная 0.1 – 0.2 мм и гравелистая фракция крупнее 2 мм.

Поверхностная проводимость грунтов обусловлена подвижностью избыточных ионов ДЭС, а удельная электропроводность внутриводящего раствора ( $\sigma$ ) складывается из удельной электропроводности раствора электролита ( $\sigma_v$ ) и поверхностной проводимости ( $\sigma_s$ ).

Введённое Д. А. Фридрихсбергом [198] отношение

$$\sigma/\sigma_v = (\sigma_v + \sigma_s)/\sigma_v = \alpha - \text{коэффициент эффективности, характеризует}$$

повышение общей удельной электропроводности порового раствора за счёт поверхностной проводимости.

Таким образом, явление «сверхпроводимости» глин заключается в том, что образец глины, насыщенный раствором, обладает меньшим электрическим сопротивлением, чем равновеликий слой равновесного с ним раствора электролита, за счёт поверхностной проводимости, несмотря на то, что в состав образца глины входят и непроводящие частицы её скелета, которые в  $\beta$  раз уменьшают её электропроводность; при этом имеет место неравенство  $\alpha \geq \beta$ . Так, в грунтах, где ионы ДЭС составляют незначительную долю от всех имеющихся ионов,  $\alpha \approx 1$ . С увеличением дисперсности и плотности грунтов, а также с разбавлением порового раствора (уменьшение  $\sigma_v$ ) коэффициент  $\alpha$  возрастает, достигая во многих случаях высоких значений ( $\alpha \geq 10$  и даже более 200, как, например, в Na - монтмориллоните).

Параметр  $\beta$  называется коэффициентом структурного сопротивления грунта и рассчитывается из соотношения

$$\beta = \sigma_v^0 / \sigma_d^0,$$

где  $\sigma_v^0$  и  $\sigma_d^0$  - соответственно электропроводность порового раствора и грунта в отсутствии поверхностной проводимости.

Соотношение  $\alpha \geq \beta$  характеризует режим сверхпроводимости. Поверхностная проводимость зависит от химико – минерального состава и связанной с ним дисперсности, плотности - влажности грунта, концентрации и состава электролита порового раствора, температуры и др. Значения поверхностной проводимости и связанных с ней параметров ДЭС некоторых глинистых грунтов разного минерального состава [309] представлены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Грунт	Влажность, w, %	Концентрация порового раствора, $C_v$ , моль/л	Электропроводность грунта, $\sigma_d$ , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>	Поверхностная проводимость, $\sigma_{ss}$ , Ом <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>	Коэффициент структурно го сопротивления,	Коэффициент эффективности, $\alpha$	$\alpha/\beta$
Каолин положский	52	0.0005	0.00023	0.00069	3.25	14.90	4.60
	59	0.0037	0.00034	0.00088	3.73	3.26	0.87
	63	0.0110	0.00063	0.00088	3.14	1.81	0.58
	54	0.1150	0.00410	0.00030	3.48	1.36	0.39
На- каолинит (глуховец- кий)	50	0.0003	0.00064	0.00138	2.2	48.50	22.30
	50	0.0010	0.00070	0.00142	2.2	13.20	6.00
	50	0.0050	0.00085	0.00137	2.2	3.78	1.72
	50	0.0100	0.00109	0.00130	2.2	2.17	0.98
	50	0.0500	0.00230	0.00010	2.2	1.02	
Са- каолинит (глуховец- кий)	50	0.0003	0.00044	0.00078	1.85	22.20	12.0
	50	0.0010	0.00044	0.00072	1.85	8.10	4.4
	50	0.0050	0.00065	0.00070	1.85	2.40	1.3
	50	0.0100	0.00089	0.00064	1.85	1.64	0.9
	50	0.0400	0.00182	0	1.85	0.92	0.5
Гидро- слюдистая (кембрий- ская)	40	0.0012	0.00042	0.00106	2.785	8.90	3.12
	33	0.0038	0.00059	0.00147	3.16	4.67	1.48
	40	0.0115	0.00079	0.00096	2.66	1.81	0.68
	39	0.1070	0.00350	-	2.90	1.00	0.34

глина							
Аскангель	352	0.0032	0.00269	0.00333	1.36	11.20	8.20
	300	0.0100	0.00263	0.00271	1.40	3.76	2.70
	238	0.0150	0.00300	0.00338	1.53	3.25	2.12
	204	0.1050	0.00792	0.00304	1.62	1.31	0.81
Na- монтморил -лонит	350	0.0003	0.00375	0.00541	1.44	180.00	125.0
	300	0.0010	0.00352	0.00542	1.54	57.00	37.0
	300	0.0090	0.00470	0.00630	1.54	8.00	5.2
	300	0.0100	0.00593	0.00525	1.54	2.30	1.5
	300	0.0700	0.00680	0.00375	1.54	1.56	1.0
Ca- монтморил -лонит	100	0.0003	0.00303	0.00480	1.6	121.0	80.5
	100	0.0010	0.00236	0.00370	1.6	39.5	24.7
	100	0.0050	0.00281	0.004000	1.6	9.0	5.6
	100	0.0080	0.00288	0.00380	1.6	5.7	3.0
	100	0.0600	0.00546	0.00340	1.6	1.6	1.0

Из табл. 1.6 следует, что наибольшая поверхностная проводимость отмечается у монтмориллонитовых глин, а наименьшая – у каолиновых (при прочих одинаковых условиях).

Анализ имеющихся данных позволяет сделать ряд заключений:

- критическая концентрация порового раствора должна увеличиваться с повышением степени дисперсности и глинистости грунта, содержания в грунте монтмориллонита, органических веществ, а также при изменении состава засоления от хлоридного к карбонатному и сульфатно – кальциевому;

- критическая концентрация порового раствора должна быть связана с обменной ёмкостью грунтовой матрицы. Если исходное эквивалентное содержание ионов порового раствора < обменной ёмкости скелета грунта, то они взаимодействуют в основном с поверхностями минеральной матрицы.

Наименьшее значение концентрации порового раствора, установленное для кварцевых песков, имеет вполне определённое физико – химическое обоснование [142, 245]. Этой концентрации соответствуют:

- предельный закон Дебая – Хюккеля - Онзагера<sup>17</sup>, устанавливающий связь коэффициентов активности с ионной силой растворов (мерой интенсивности создаваемого ионами электрического поля в растворе - полусумма произведений из концентрации всех ионов в растворе на квадрат их заряда);

- явление изоэлектропроводности влагонасыщенных дисперсных сред;

- начало возрастания энергии активации вязкого течения сорбционного слоя раствора;

- возрастание в ряду солей  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{NO}_3 - \text{KCl} - \text{NaCl}$ <sup>18</sup> количества жидкой фазы (ионного состава порового раствора).

В глинистых грунтах значительное влияние на структуру и энергетическое состояние порового раствора оказывают свойства поверхностей частиц и состав минеральной матрицы, а также гетеропористость среды [79, 80].

В зависимости от минерального состава при прочих одинаковых условиях наибольшая поверхностная проводимость определяется исходной концентрацией порового раствора. Поровое пространство глинистых пород с ячеистой микроструктурой представлено четырьмя категориями пор со средними эквивалентными диаметрами 0.06; 0.22; 5.3 и 11.6 мкм.

---

<sup>17</sup> Основная идея состоит в том, что вследствие электростатического притяжения между положительными и отрицательными ионами вблизи каждого иона находятся главным образом ионы противоположного знака, т.е. ион как бы окружен ионной атмосферой. Суммарный заряд этой атмосферы по абсолютной величине равен заряду центрального иона, но противоположен ему по знаку. Тормозящее действие ионной атмосферы на передвижение ионов проявляется таким образом, что все свойства, зависящие от концентрации ионов (такие, как электрическая проводимость, осмотическое давление и т.д.), отвечают заниженной степени диссоциации – кажущейся степени диссоциации.

<sup>18</sup> Ряд водорастворимых минеральных солей. Характерны для засоленных почвогрунтов (солончаков, солонцов, солоди). Это возрастание неравномерно: например, для первого звена ряда оно составляет 10-15 %, а в случае преобладания NaCl в поровом растворе содержание жидкой фазы может возрасти более чем в 2 раза [251]. Основные тенденции – уменьшение толщины диффузной составляющей ДЭС, т. е. ослабление влияния поверхностных частиц минеральной матрицы грунта на структуру и энергетическое состояние жидкой фазы и переход всё большей её части в домены (ячейки) «объёмного» порового раствора.

В лёссах, супесях и суглинках вклад поверхностной проводимости в электропроводность невелик или вообще отсутствует.

### 1.2.1 Особенности порового и микроструктурного пространства глин

Материалы представлены по [87÷89, 91], в которых использовалась растровая электронная микроскопия [90].

**Особенности микроструктурного пространства глин [80].** У глин в ячеистой микроструктуре преобладают изометричные микропоры: мелкие со средним эквивалентным диаметром ( $D_p$ ) 5.3 мкм, площадью ( $S_p$ ) 20 мкм<sup>2</sup> и периметром ( $P_p$ ) 22.5 мкм; крупные  $D_p \approx 11.6$  мкм,  $S_p \approx 100$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 62.5$  мкм; межчастичные, наиболее многочисленны ультрамикропоры ( $D_p \approx 0.06$  мкм,  $S_p \approx 0.004$  мкм<sup>2</sup>,  $P_p \approx 0.6$  мкм). Анизометричны - результат неплотного прилегания пластинчатых глинистых частиц базальными плоскостями; между ультрамикроагрегатными тонкие ( $D_p \approx 0.22$  мкм,  $S_p \approx 0.038$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 2.6$  мкм).

Поры (с  $D_p \approx 4 \div 12$  мкм), составляют основную часть порового пространства в ячеистой микроструктуре. Суммарная площадь этих пор может достигать 97 % общей измеренной пористости (абсолютные значения 57.1 %). Ориентация преимущественно изотропная.

#### А) матричная микроструктура

Основная особенность микроструктуры — наличие однородной тонкодисперсной матрицы с хаотически расположенными микроагрегатами и отдельными пылеватыми зёрнами, а также обломками погруженной в нее микрофауны. Основными твердыми структурными элементами матричной микроструктуры являются микроагрегаты. Встречаются крупные изометричные микроагрегаты с размерами 4÷15 мкм и более мелкие

удлиненные, толщина которых может достигать 2 мкм, а длина — 6 мкм. Микроагрегаты имеют сложное строение и состоят из ультрамикроагрегатов глинистых частиц, контактирующих по типу базис - базис и базис—скол. Ультрамикроагрегаты имеют анизометричную форму и сложены глинистыми частицами, контактирующими базисными плоскостями. Толщина ультрамикроагрегатов изменяется от 0.3 до 0.6 мкм, длина ~ 2— 3 мкм. Пылеватые зерна обычно имеют изометричную форму, а их поверхность покрыта глинистыми «рубашками». Размер зерен колеблется ~ 5÷15 мкм. Обломки микрофауны имеют различную сохранность. Их размер изменяется в пределах 10 ÷ 30 мкм.

Поровое пространство глинистых пород с матричной микроструктурой представлено четырьмя размерами пор с  $D_p \approx 0.06; 0.42; 3.3; 12.3$  мкм. Поровое пространство в основном формируется межмикроагрегатными порами, на долю которых приходится до 93.8 % общей измеренной пористости (абсолютное значение 45.1 %). Среди межмикроагрегатных пор выделяют мелкие и крупные микропоры<sup>19</sup>.

### Б) скелетная микроструктура

Основными твердыми структурными элементами являются полуокатанные, реже неокатанные пылеватые зерна преимущественно кварцевого состава, покрытые глинистыми «рубашками». Зерна имеют изометричную форму, а их

---

<sup>19</sup> Мелкие имеют изометричную или анизометричную форму и характеризуются следующими средними размерами:  $D_p \approx 3.3$  мкм,  $S_p \approx 7.5$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 21.6$  мкм. Эти поры преобладают среди межмикроагрегатных. Реже встречаются крупные изометричные микропоры со следующими средними размерами:  $D_p \approx 12.3$  мкм,  $S_p \approx 118.8$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 103.2$  мкм. Подчиненное значение в матричной микроструктуре имеет внутримикроагрегатная пористость, представленная межчастичными и межультрамикроагрегатными порами. В сумме эти поры составляют 6,2 % общей пористости. Наиболее многочисленны в матричной микроструктуре межчастичные анизометричные ультрамикропоры. Средние размеры таких пор следующие:  $D_p \approx 0.06$  мкм,  $S_p \approx 0.0036$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 0.72$  мкм. Менее распространены межультрамикроагрегатные тонкие анизометричные микропоры, имеющие средний  $D_p \approx 0.42$  мкм,  $S_p \approx 0.125$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 1.68$  мкм. Результаты исследования указывают на изотропный характер ориентации в матричной микроструктуре и отсутствие преимущественного направления ориентации структурных элементов.

размер изменяется  $\sim 15 \div 30$  мкм. Реже встречаются изометричные глинисто-пылеватые микроагрегаты с размерами  $10 \div 15$  мкм. Пылеватые зерна контактируют друг с другом через глинистые «рубашки» («мостики»). В местах контакта находятся скопления наиболее тонкодисперсных пылеватых зерен и микроагрегатов глинистых частиц.

В скелетной микроструктуре межультрамикроагрегатная пористость имеет долю 16.5% измеренной пористости. Она представляет собой внутримикроагрегатные тонкие анизометричными (реже изометричными) микропоры, с  $D_p \approx 0.2 \div 0.8$  мкм. Средние размеры межультрамикроагрегатных пор:  $D_p \approx 3.3$  мкм,  $S_p \approx 7.5$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 21.6$  мкм. Это наиболее многочисленная категория пор в скелетной микроструктуре.

#### В) турбулентная микроструктура

Наиболее характерная особенность такой микроструктуры — присутствие листообразных изогнутых микроагрегатов глинистых частиц, обтекающих пылеватые зерна подобно турбулентному потоку. Основные твердые структурные элементы турбулентной микроструктуры — ориентированные по напластованию микроагрегаты с характерной анизометрией, микроагрегаты изгибаются, повторяя форму обтекаемых ими пылеватых зерен<sup>20</sup>.

В глинистых породах с турбулентной микроструктурой поровое пространство представлено четырьмя категориями пор с  $D_p \sim 0.06; 0.26; 3.3$  и  $11.7$  мкм. Большая часть порового пространства образована межмикроагрегатными и межмикроагрегатно-зернистыми порами, на долю

<sup>20</sup> Длина таких микроагрегатов может достигать 20 мкм, а толщина составляет 2—3 мкм. Микроагрегаты имеют сложное строение и состоят из ультрамикроагрегатов пластинчатой и листообразной формы, контактирующих базисными плоскостями и по типу базис—скол под малым углом. Длина ультрамикроагрегатов может достигать 3 мкм, а толщина изменяется от 0,2 до 0,6 мкм. Ультрамикроагрегаты состоят из частиц глинистых минералов, контактирующих базальными плоскостями. Помимо микроагрегатов и ультрамикроагрегатов в турбулентной микроструктуре содержится довольно большое число пылеватых преимущественно изометричных зерен, размер которых может изменяться в довольно широких пределах — от 5 до 20 мкм. Поверхность зерен обычно покрыта глинистыми «рубашками».

которых приходится 93.7 % общей измеренной пористости (абсолютное значение 28.7%). Среди данных пор можно выделить мелкие и крупные микропоры. Межмикроагрегатные поры имеют изометричную, реже анизометричную форму и размер от 2 до 6 мкм. Средние значения размеров:  $D_p \approx 3.3$  мкм,  $S_p \approx 8.7$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 12.5$  мкм<sup>21</sup>.

Анализ турбулентной микроструктуры показал, что она относится к категории высокоориентированных с преимущественной ориентацией структурных элементов по напластованию.

#### Г) ламинарная микроструктура

Отличительная особенность ламинарной микроструктуры — высокая степень ориентации структурных элементов в плоскости напластования. Это пример типичной однородной и анизотропной микроструктуры. Основными твердыми структурными элементами ламинарной микроструктуры являются анизометричные микроагрегаты, ориентированные по напластованию. Длина микроагрегатов изменяется от 7 до 15 мкм, а толщина составляет примерно 1—2 мкм. Микроагрегаты имеют сложное строение и состоят из листообразных ультрамикроагрегатов контактирующих базисными поверхностями. Длина ультрамикроагрегатов составляет 2—3 мкм, а толщина — 0,2- 0,5 мкм. Ультрамикроагрегаты образованы глинистыми частицами, контактирующими по типу базис—базис. Помимо микроагрегатов и ультрамикроагрегатов в ламинарной микроструктуре присутствует небольшое число тонкопылеватых преимущественно изометричных зерен, поверхность которых покрыта

---

<sup>21</sup> Они составляют вторую по многочисленности в данной микроструктуре категорию пор. Крупные межмикроагрегатно-зернистые микропоры имеют изометричную форму. Средние размеры таких пор следующие:  $D_p \approx 11.7$  мкм,  $S_p \approx 8.7$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 107.5$  мкм. Это самая малочисленная категория пор. Подчиненное значение в турбулентной микроструктуре имеют внутримикроагрегатные поры, представленные межчастичными и межультрамикроагрегатными порами, на долю которых приходится 6,3 % общей пористости. Наиболее многочисленны межчастичные ультрамикропоры щелевидной формы со следующими средними размерами:  $D_p \approx 0.06$  мкм,  $S_p \approx 0.0035$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 0.66$  мкм. Менее распространены межультрамикроагрегатные тонкие анизометричные микропоры, имеющие средний эквивалентный диаметр 0.26 мкм; площадь 0,06 мкм<sup>2</sup> и периметр 1,98 мкм.

глинистыми «рубашками». Размер зерен, как правило, не превышает 10 мкм. **Поровое пространство** микроструктуры представлено четырьмя категориями с  $D_p \sim 0.06; 0.22; 3.3$  и  $10$  мкм<sup>22</sup>. Изучение ламинарной микроструктуры показывает, что она относится к микроструктурам с высокой степенью ориентации структурных элементов. Это также подтверждается сильно вытянутой эллипсоидной формой и высоким значением коэффициента анизотропии.

**Поровое пространство в глинистых породах со скелетной микроструктурой. Морфометрические и геометрические особенности.**

Различия в степени ориентации структурных элементов:

- изотропные с кругообразной формой роз ориентации структурных элементов и малой (менее 5 %) величиной коэффициента анизотропии (ячеистая, матричная и скелетная микроструктуры);

- турбулентная и ламинарная микроструктуры отличаются высокой степенью ориентации в направлении напластования, что подтверждается эллипсоидным характером розы ориентации и большими значениями коэффициента анизотропии (более 36 %).

---

<sup>22</sup> Основная часть порового пространства образована межмикроагрегатными порами, на долю которых приходится 95,2 % общей измеренной пористости (абсолютное значение 48,3%). Среди этих пор можно выделить мелкие и крупные микропоры. Большинство мелких межмикроагрегатных микропор имеет анизометричную (реже изометричную) форму. Средние размеры этих пор следующие:  $D_p \approx 3.3$  мкм,  $S_p \approx 9$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 17.5$  мкм. Крупные межмикроагрегатные поры имеют изометричную форму и следующие средние размеры: эквивалентный  $D_p \approx 10$  мкм,  $S_p \approx 76$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 117.5$  мкм. Общее число мелких и крупных межмикроагрегатных пор невелико. Подчиненное значение в ламинарной микроструктуре имеет внутримикроагрегатная пористость, представленная межчастичными и межультрамикроагрегатными порами, на долю которых приходится 4,8 % общей измеренной пористости. Наиболее многочисленны межчастичные щелевидные ультрамикропоры с  $D_p \approx 0.06$  мкм,  $S_p \approx 0.004$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 0.72$  мкм. Межультрамикроагрегатные тонкие микропоры менее распространены в ламинарной микроструктуре. Они имеют анизометричную форму и характеризуются следующими средними размерами:  $D_p \approx 0.22$  мкм,  $S_p \approx 0.039$  мкм<sup>2</sup> и  $P_p \approx 2.06$  мкм.

Анализ морфометрических характеристик [80] указывает на присутствие во всех изученных микроструктурах (за исключением скелетной) четырех категорий пор<sup>23</sup>:

- межчастичных анизометричных (щелевидных) ультрамикропор;
- межультрамикроагрегатных тонких анизометричных микропор;
- мелких межмикроагрегатных микропор;
- крупных межмикроагрегатных (межзернистых) или межмикроагрегатно-зернистых микропор.

Общей чертой микроструктур глинистых пород является наличие на всех кривых распределения пор по эквивалентным диаметрам максимума, обусловленного присутствием межчастичных ультрамикропор с эквивалентным диаметром примерно 0.06 мкм. Эта особенность обусловлена тем, что основные структурные элементы в глинистых породах — частицы глинистых минералов пластинчатой формы. Неплотное прилегание базисных плоскостей таких частиц при формировании ультра- и микроагрегатов приводит к образованию в глинах многочисленных межчастичных ультрамикропор. Подобная категория пор является диагностическим признаком глинистой породы. Размер межультрамикроагрегатных и межмикроагрегатных пор определяется условиями формирования отложений и, частично, размером твердых структурных элементов. В пределах группы пород одного генетического возраста среди тонкодисперсных микроструктур (турбулентная и ламинарная) наблюдается закономерное уменьшение размера пор по мере увеличения интенсивности процесса литификации<sup>24</sup>.

---

<sup>23</sup> Основная часть порового пространства (83—97 % общей пористости) обычно представлена межмикроагрегатными порами (в скелетной микроструктуре — межзернистыми). Подчиненное значение (3—17 % общей пористости) имеет межчастичная и межультрамикроагрегатная пористость.

<sup>24</sup> ЛИТИФИКАЦИЯ (от греческого lithos — камень и латинского facio — делаю) — процесс превращения рыхлых осадков в твердые горные породы. Может происходить в различных стадиях преобразования осадков.

### 1.2.2 Макродипольная электрическая поляризация грунтов

Макродипольная электрическая поляризация грунтов появляется как результат взаимодействия поля и среды. Для пористой среды с заметной разницей в сечении пор и капилляров характерен ДЭС с разной толщиной диффузной части (слоя Гуи - Чепмена). Для этого слоя заметно отличаются подвижность и условия перемещения ионов. Направленная миграция ионов под воздействием внешнего электромагнитного поля (электропроводности) будет обуславливать накопление избыточного заряда у границ неоднородностей. Изменчивость пор как «токовых путей» и неравнозначность проницаемости их отдельных участков для носителей с разными по величине и знаку зарядами также приведут к накоплению избыточных зарядов разного знака у границ раздела этих участков (доменов), следовательно, в среде возникает объёмная эффективная макродипольная электрическая поляризация, дополнительная к молекулярной (микродипольной) поляризации её компонентов.

При воздействии внешнего импульсного электромагнитного поля макродипольный эффект будет более значителен по величине, если среднее время переноса (направленной миграции) носителя заряда к полупроницаемой поверхности раздела будет заметно меньше половины длительности импульса приложенного поля  $\delta t \leq T/2$ , тогда за время  $\Delta t \cong T/2 - \delta t$  происходит создание некоторого избыточного заряда у поверхностей, ограничивающих домены.

В свою очередь, величина  $\delta t$  зависит от средней подвижности носителей зарядов и от среднего эффективного линейного размера  $d$ , ячейки (домена), образующей макродиполь.

Грубые оценки показывают, что в среднем максимальное дипольное смещение  $S_{\max} \geq 30 \div 50 \text{ \AA}$ , т.е. в энергетически однородном свободном растворе миграционное смещение будет вносить вклад только в  $\sigma$ , через  $\sigma_1(\omega)$  среды.

Однако, если имеются ограничения миграции ионов, то разделение зарядов не сможет полностью скомпенсировать внешнее поле, и возникает

значительная по величине реактивная мнимая составляющая электропроводности  $\sigma_2$ . Макроскопически это будет приводить к большим значениям  $\varepsilon_3'$  среды.

Ограничения направленной миграции ионов в поровом растворе грунтов обусловлены следующими факторами:

- островным характером адсорбции;
- неоднородной энергетической структурой раствора, образующейся под влиянием полей неравномерно распределенных активных центров поверхностей твердых материалов (особенно в дискретных ячейках);
- возникающим градиентом концентрации;
- обратным диффузионным потенциалом.

Поэтому вполне обоснованно считать, что во время существования низких частот воздействующего импульсного электромагнитного поля ток ионов в среде оказывается несинфазным с напряженностью поля, что отражается в гораздо больших значениях  $\varepsilon_3'$ , чем это следует из моделей диэлектрической проницаемости для компонентного состава среды и молекулярной поляризации. При этом  $\sigma_3'$ ,  $\varepsilon_3''$  оказываются невелики ввиду небольших значений  $\sigma_1$  (1.4) и будут тем меньше, чем более ограниченным (несвободным) окажется движение ионов в поровом растворе.

В течение времени воздействия высокой частоты импульсного приложенного поля амплитуда миграционного смещения ионов мала - сказывается влияние ограничивающих их движение факторов. Сдвиг по фазе между приложенным полем (напряжением) стремится к нулю, что приводит к уменьшению  $\varepsilon_3'$ . На достаточно высоких частотах смещения ионов (эффект макродиполя) близки к нулю и  $\varepsilon_3'$  определяется лишь молекулярной поляризацией компонентов среды.

Действительная часть проводимости в пределах малой ячейки достигает максимальных значений, но для макро объёма среды практически не влияет на

$\epsilon''_3$ . Таким образом, механизм миграционной макродипольной поляризации является релаксационным.

Эффективная подвижность ионов и их концентрация в поровом растворе определяется влажностью. Когда она мала – диффузная часть ДЭС считается слабо развитой. Эффективная подвижность ионов мала.

Возрастание эффективной подвижности ионов объясняют следующим образом:

- повышенной концентрацией ионов одного знака;
- неразвитостью сольватных оболочек - совокупности молекул растворителя, окружающих частицу;
- ослаблением связующего действия поверхности твердой фазы;
- увеличением толщины диффузной части ДЭС.

Дальнейшее возрастание влажности и заполнение объёма пор свободной водой должно привести к некоторому уменьшению эффективной подвижности ионов. Однако увеличение «токового сечения» поры приводит к увеличению числа переносимых зарядов в единицу времени, следовательно, к увеличению избыточного заряда на границе домена. Электрическая неоднородность системы при этом увеличивается.

С возрастанием степени заполнения грунта жидкостью, вплоть до полного насыщения, должно возрастать и влияние молекулярной поляризуемости. Это будет происходить как за счет увеличения процентного содержания поляризуемого компонента, так и за счет возрастания его молекулярной восприимчивости, следовательно, увеличение влажности приводит к возрастанию поляризуемости и на более высоких частотах.

По мере увеличения «свободной» части поровой влаги диэлектрическая проницаемость начнет возрастать. При этом в радиочастотном диапазоне можно ожидать более сильную её зависимость от влажности, чем на частотах  $\leq 1$  МГц, но при меньших значениях  $\epsilon''_3$ .

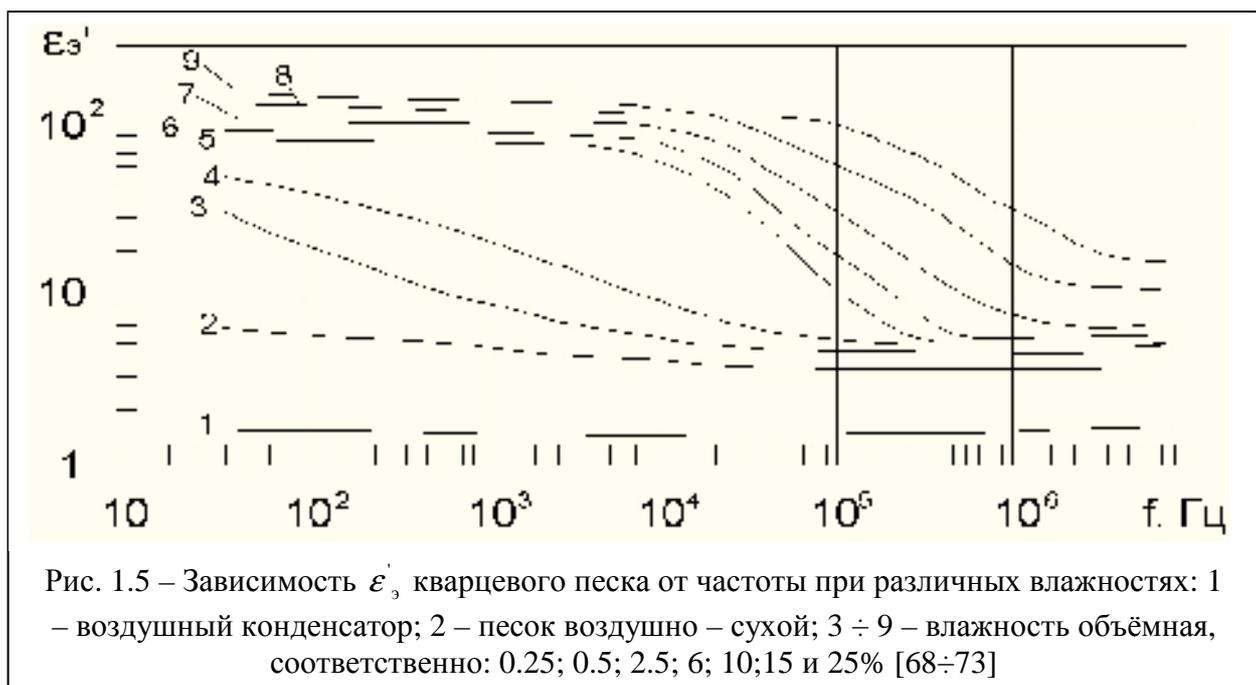
В зависимости от степени дисперсности материала, величины скачка потенциала в ДЭС и его толщины (адсорбционной активности поверхностей частиц твердой матрицы, состава и концентрации электролита) размер пор может оказаться соизмеримым с толщиной ДЭС.

В более тонкодисперсионной среде и при большой адсорбционной активности её твердой части может возникнуть значительно большая её поляризуемость на более высоких частотах по сравнению с грубодисперсионными (песчаными) грунтами. Однако такое возрастание поляризуемости имеет предел, так как в порах, размеры которых меньше толщины диффузной части ДЭС, трудно ожидать большую подвижность ионов. Поэтому в глинах (по сравнению с песками) следует ожидать меньшую поляризуемость на низких частотах и большую – на высоких при всегда значительно меньших временах релаксации [274].

### **1.2.3 Влияние влажности и минерального состава на электрофизические свойства грунтов**

Для территории РФ первый слой подстилающей среды – влажные грунты. Для них проводимость, определяющая их электрические свойства, является ионной. Влияние влажности и минерального состава скелета породы на электрические свойства в импульсных электромагнитных полях особенно важно учитывать для сильно пористых песчано – глинистых грунтов, поскольку наибольшим изменениям подвержена жидкая фаза среды [68÷71, 417].

На рис. 1.5 приведены данные о частотной зависимости  $\varepsilon'$ , образцов кварцевого люберецкого песка фракции 0.1 ÷ 0.5 мм, исследованных в диапазоне 20 Гц ÷ 10 МГц при различных влажностях и  $t=+20^\circ\text{C}$ . Ход частотных зависимостей качественно сходен с зависимостью, вытекающей из теории неоднородных диэлектриков.



Можно выделить две группы дисперсионных кривых:

- к первой относятся данные, полученные на сухих и слабовлажных образцах, для которых характерно монотонное понижение  $\varepsilon'_3$  с ростом частоты и приближение к высокочастотной асимптотике на частотах  $10^4 \div 10^5$  Гц;

- ко второй группе можно отнести кривые, характеризующие частотную зависимость электрических параметров более влажных образцов ( $W_v > 1\%$ ), для которых наблюдается область дисперсионного перехода  $\varepsilon'_3$  с выходом к высокочастотным асимптотикам. Для этой группы характерна более сильная дифференциация по  $\varepsilon'_3$  в зависимости от влажности в области высокочастотных ( $\geq 1$  МГц) значений – в 6÷8 раз.

В целом эффект частотной дисперсии электрических свойств влажных песчано – глинистых грунтов есть результат физико – химических процессов, происходящих в жидкой фазе, измененной за счет взаимодействия с поверхностями зерен твердых матриц грунта. Данные для образцов глин свидетельствуют, что для них область дисперсионного перехода  $\varepsilon'_3$  сдвинута в сторону высоких частот и находится примерно в диапазоне  $10^7 \div 10^8$  Гц. С увеличением влажности эта область сдвигается к более высоким частотам.

Анализ имеющихся данных позволяет заключить, что дисперсия электрических свойств влажных песчано – глинистых грунтов обусловлена состоянием порового раствора.

С увеличением влажности наблюдается уменьшение эффективного времени релаксации процессов поляризации и, следовательно, сдвиг дисперсионного перехода  $\epsilon''$ , в сторону более высоких частот. Крутизна кривых  $\epsilon''$ , в области дисперсионного перехода зависит от степени электрической однородности материала. Так, при малых значениях влажности кварцевого песка ( $W_v \approx 0.1 \div 0.2\%$ ) имеет место более разнородная в электрическом отношении система: скелет породы - адсорбционная вода – жидкая фаза диффузного слоя ДЭС. При увеличении влажности и полном развитии диффузной части ДЭС роль жёстко связанной воды уменьшается, подвижность ионов увеличивается, влияние «макродиполей» на поляризацию породы возрастает и при определенной степени её увлажнения становится преобладающим.

С увеличением влажности  $W_v \geq 2 \div 3\%$  наблюдается значительное возрастание крутизны кривых  $\epsilon''$ , (рис. 1.6, кривые  $5 \cdot 10^5, 10^6$  Гц) в области дисперсионного перехода, что соответствует сужению диапазона времен релаксации - возрастанию узкополосности в отраженном сигнале. При дальнейшем увеличении влажности происходит уменьшение крутизны спада  $\epsilon''$ , (рис. 1.6, кривые  $5 \cdot 10^6$  Гц;  $\Delta, \sigma \approx 500$  МГц), т.е. возрастание электрической неоднородности среды и расширение диапазона времён релаксации, но не столь сильное, как при малой влажности.

На рис. 1.6 приведен пример анализа зависимости  $\epsilon''$  кварцевого песка от объёмной влажности в радиочастотном диапазоне. Заметное возрастание  $\epsilon''$ , имеет место только при значительной влажности (появлении относительно «свободной» воды с  $\epsilon \sim 80$ ). Из полученных данных следует, что начиная с  $\sim 0.5$  МГц преобладает релаксационный компонент ориентационной молекулярной (дипольной) поляризации.

Зависимость, приведенная на рис. 1.6, подтверждается во влагометрии [82, 83] талых эоловых песков и глинистых грунтов [85] на частоте  $\sim 500$  МГц (О и  $\Delta$  на рис. 1.6), при толщине ДЭС  $\sim (2\div 3) \cdot 10^{-1}$  мкм [245].

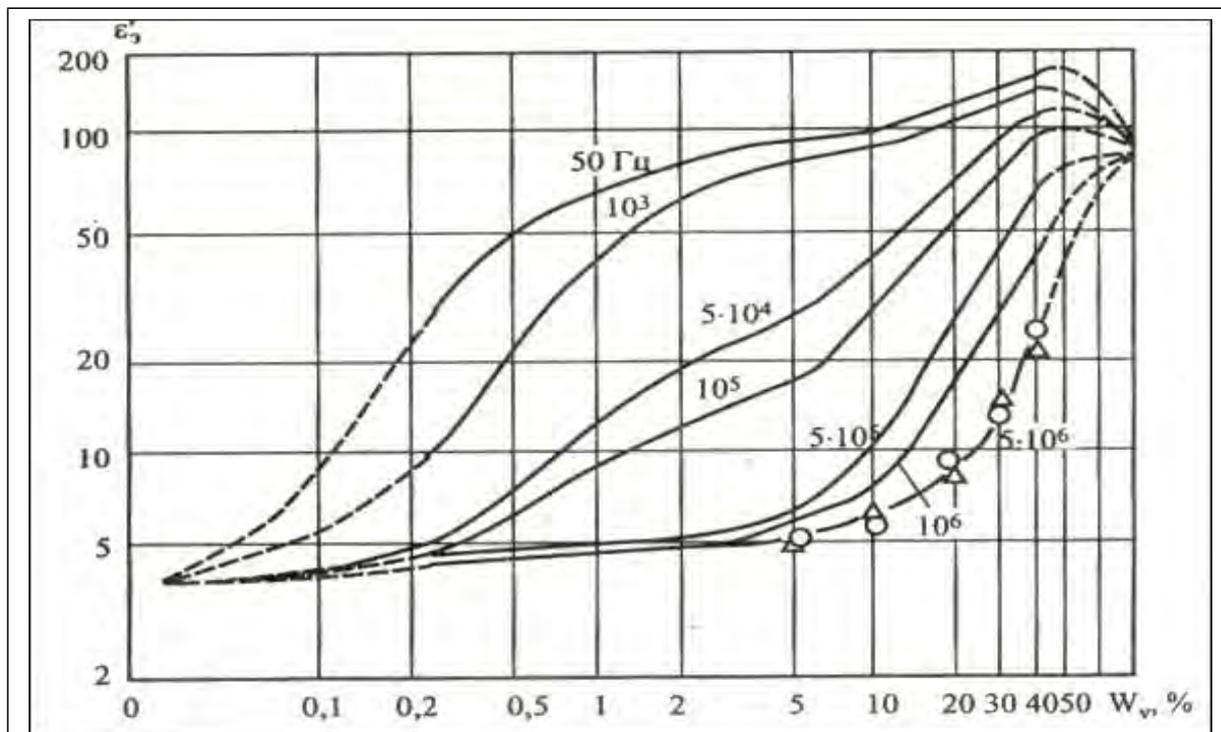


Рис. 1.6 – Эталонная зависимость  $\epsilon'$  песчано – глинистых грунтов от объёмной влажности в диапазоне частот 50Гц ÷ 500МГц

Объединяя результаты известных экспериментов [84, 86] по определению  $\epsilon'$  мелкозернистого кварцевого песка с данными лабораторных измерений С. Аркона, А. Деланея, Дж. Л. Олифанта, ван Лууна В. К. П., А. Д. Фролова, Ч. Ц. Цыдыпова и др. [60÷86] для эолового песка и лёсса, можно составить общую картину частотной дисперсии песчано - глинистых грунтов при положительных температурах в интервале частот  $< 10^6$  Гц, которая обусловлена сменой доминирования макродипольного механизма поляризации дипольно – релаксационным (частоты  $10^6 \div 10^7$  Гц).

Для глинистых влажных грунтов, близких по составу минеральных частиц, в широком диапазоне частот и влажностей общая картина частотной дисперсии  $\epsilon'$  считается сходной. Сопоставление имеющихся данных указывает на

наличие в глинах двух областей частотной дисперсии, отличительными чертами которых являются:

- сдвиг интервала первой области дисперсии к более высоким частотам;
- большие (по сравнению с песком) значения  $\epsilon'_2$  (при одинаковых  $W_v, \%$ ) в

интервале частот  $10^7 - 10^9$  Гц.

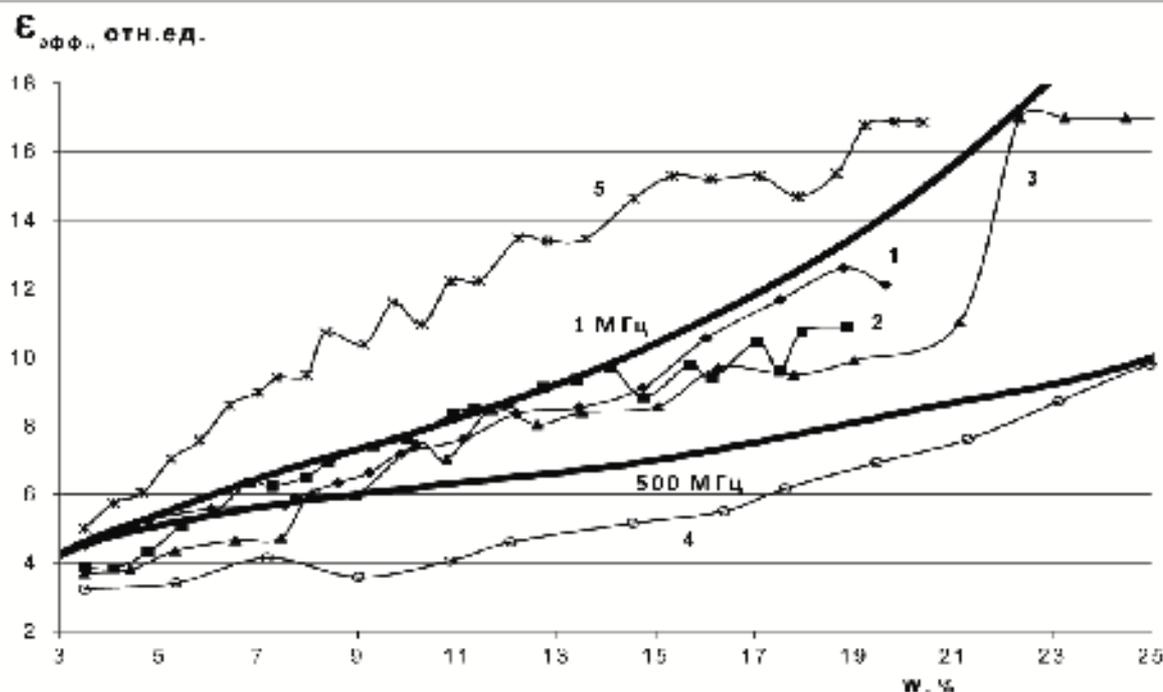


Рис. 1.6а – Эталонная зависимость  $\epsilon'_2$  (1 МГц, 500 МГц, рис. 1.6) и зависимость  $\epsilon_{эфф.}$  пород горных, грунтов и почвенно-растительного слоя от объемной влажности как среднее по частоте в диапазоне 1 МГц : 500 МГц ( кривая 1 – крупнозернистый песок; кривая 2 – среднезернистый песок; кривая 3 – суглинок; кривая 4 – почво-растительный слой; кривая 5 – корундовый песок) по СНП данным [310]

Максимум  $\epsilon'_2$  определяется эффективным временем релаксации грунта, которое, в первую очередь, связано с макродипольной поляризуемостью воды и зависит от концентрации ионов и их подвижности при данной  $t^0, C$ . Например, при одинаковой температуре количество и толщина диффузных частей ДЭС воды в каолине значительно больше, чем в песке, а в смесях имеет в среднем промежуточные значения [69]. При низкой температуре (количество незамерзшей воды пренебрежимо мало) и при высоких частотах (эффект макродипольной поляризации почти отсутствует) имеет место более четкая пропорциональность между составляющими КДП [274].

Ярко выраженные особенности имеют лёссовые грунты<sup>25</sup>[92÷96].

### 1.3 Электрические свойства горных пород

Механизм электропроводности горных пород может быть ионный, электронный и смешанный (различие фазового состава, разная природа проводимости).

Удельное сопротивление минерального скелета превосходит сопротивление жидкой фазы на 6÷8 порядков; газовая фаза является диэлектриком. Поэтому влияние различных фаз, заполняющих поровое пространство пород, и структура последнего являются определяющими для удельного сопротивления большинства горных пород. Степень изменения их сопротивления в переменном поле зависит от диапазона частот, величины сквозной проводимости и наличия включений минералов, имеющих электронную или дырочную природу проводимости. Присутствие в породе 10÷20 % проводящих компонентов делает её удельное сопротивление близким к проводнику.

#### 1.3.1 Проводимость и поляризация горных пород

В табл.1.7 (*В. Н. Дахнов*) приведены значения удельного электрического сопротивления большинства горных пород [309].

Твердые поверхности большинства минералов горных пород обладают гидрофильными свойствами (хорошо смачиваемы). Это обуславливает ориентацию молекул воды, представляющих собой диполи.

Установлено, что молекулы воды ориентированы нормально к твердой поверхности. Ориентация происходит в основном под действием

---

<sup>25</sup> Эти породы, в отличие от глинистых, не предрасположены к воде, они широко распространены в сухих, аридных (количество испаряемой влаги больше количества получаемой влаги) областях на юге России, Украины, Средней Азии. В них содержится, главным образом, только адсорбционная связанная вода и частично капиллярная, заполняющая лишь самые тонкие микропоры и микрокапилляры в породе. При этом лёссы обладают достаточной прочностью, так что способны "держаться" крутые, почти вертикальные стенки естественных обнажений высотой в десятки метров. Но стоит в лёссы проникнуть достаточному количеству воды, например при подтоплении массива или в результате утечек воды, лёссовая порода чрезвычайно быстро переходит в пластичное состояние, резко теряет прочность и проседает в результате доуплотнения даже под собственным весом.

электростатического притяжения и обуславливает некоторое повышение плотности воды и снижение тангенциальной (то есть вдоль поверхности) подвижности ее молекул в слоях толщиной всего лишь в несколько нанометров. Это проявляется макроскопически в виде повышения вязкости связанной воды, или (по П. Дебаю) увеличения времени активации релаксации  $\theta_s(t^0, C)$ .

Экспериментально подтверждено, что вязкость связанной воды повышается при уменьшении толщины пленки менее 1 мкм - при толщине пленки в 0.2 – 0.3 мкм её вязкость повышена по сравнению со свободной водой в 1.1 раза, а при толщине всего в 10 нм повышена уже в 1.6 раза (прямые измерения вязкости воды в очень тонких кварцевых капиллярах и тонкопористых стеклах) [102].

Другое аномальное свойство связанной воды<sup>26</sup> - понижение ее относительной диэлектрической проницаемости в несколько раз по сравнению со свободной водой. Если для обычной воды диэлектрическая проницаемость равна 81, то для связанной воды эта величина может уменьшаться до 3. По данным В. А. Королёва [102] прослойки связанной воды толщиной 0.5 – 0.6 нм имеют относительную диэлектрическую проницаемость равную всего 3 — 40. Связанная вода в горных породах неоднородна. В ней может быть выделен ряд категорий, отличающихся по природе и условиям образования, по свойствам и многим другим особенностям.

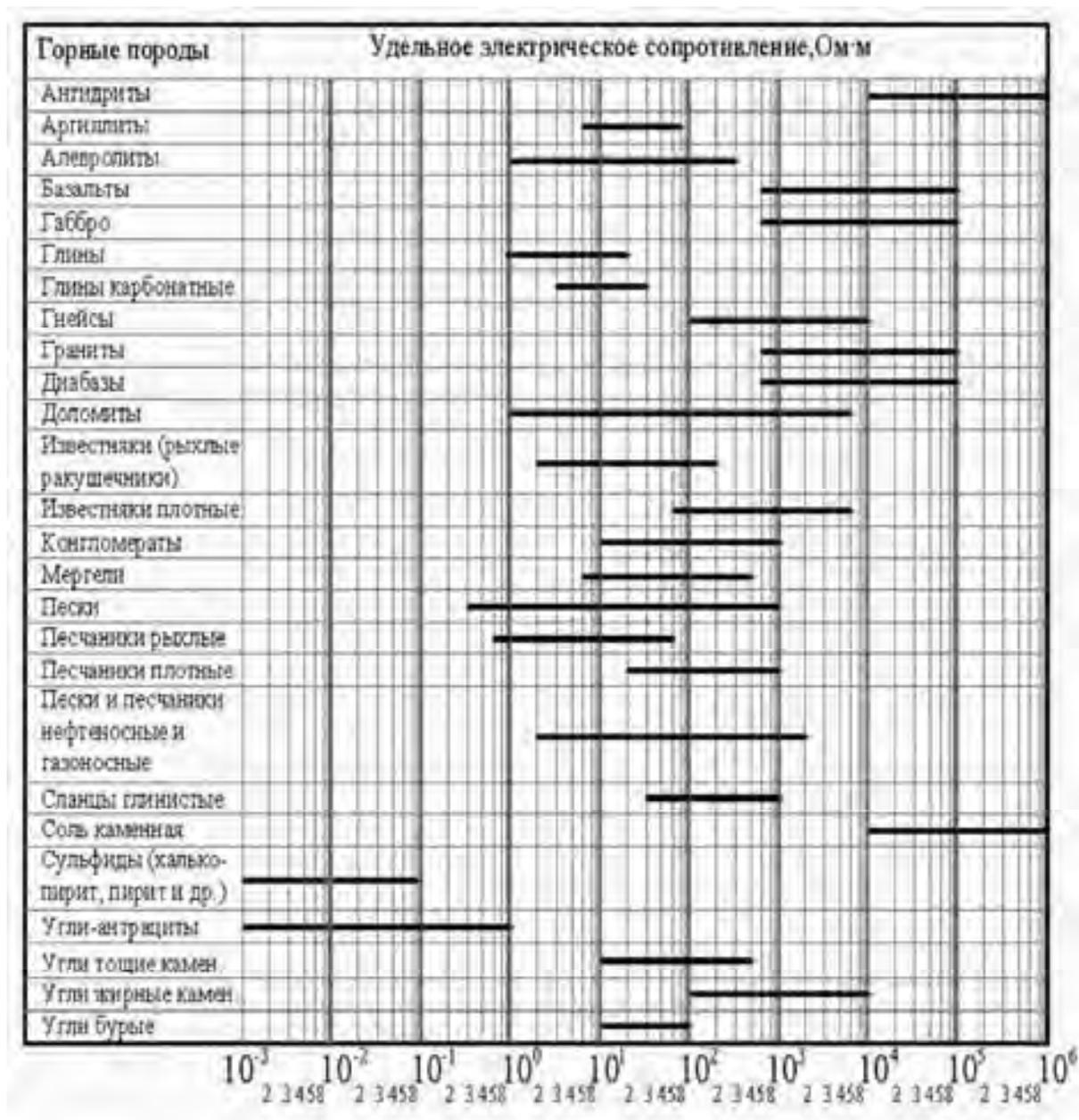
Классификация Р.И. Злочевской [88, 309] по воде в горных породах: связанная, переходного типа и свободная. Энергия связи за счет химических и физических сил (0.1 - 800 кДж/моль) действует со стороны поверхности минералов, изменяя структуру и свойства воды. Связанная вода, образуя адсорбционные пленки толщиной в один или несколько молекулярных слоев, в

---

<sup>26</sup> Она бывает двух видов. К первому относится вода, входящая в состав кристаллических решеток различных минералов. Это так называемая конституционная, немолекулярная форма воды типа ОН-групп, кристаллизационная вода различных кристаллогидратов (если они есть в данной горной породе), а также вода, "связанная" координационно-ненасыщенными атомами и ионами кристаллической решетки минералов. **Ко второму** виду относится адсорбционная вода, образующаяся за счет адсорбционного "притяжения" молекул воды к активным адсорбционным центрам поверхности минералов. Среди нее выделяются две разновидности: а) с наибольшей энергией притяжения к поверхности (около 40 - 120 кДж/моль) - вода мономолекулярной адсорбции; б) с меньшей энергией связи (<40 кДж/моль) - вода полимолекулярной адсорбции.

горных породах содержится в порах или микротрещинах размером менее 0.001 мкм. У этого типа воды физические свойства в наибольшей степени отличаются от свободной. А. Д. Фролов [73, 274] отмечал её осмотическую форму, которая характеризуется пониженным давлением насыщенного пара, её структурированность растёт с ростом концентрации раствора, и капиллярную – манжеты на стыках частиц - «защемлённая вода».

Таблица 1.7



### 1.3.2 Электрофизические параметры горных пород с учётом дисперсности

Практически все свойства горных пород меняются в той или иной степени в зависимости от наличия в них связанной воды определенного вида. Но наиболее важно с практической точки зрения её влияние на состояние пород, процессы тепломассопереноса в них, а также на их деформируемость и прочность. Влияние связанной воды на состояние пород наиболее сильно проявляется у дисперсных, состоящих из отдельных частиц, горных пород, особенно таких, как глинистые и лёссовые<sup>27</sup>.

Однако было бы неверно думать, что связанная вода влияет лишь на прочность осадочных дисперсных пород. Не в меньшей мере ее влияние сказывается на деформировании и прочности магматических, метаморфических и сцементированных осадочных горных пород. Наличие связанной воды в кристаллической решетке минерала снижает его упругость. Но в еще большей степени на деформируемость и прочность таких пород влияет наличие в микротрещинах, на контактах зерен или кристаллов адсорбционных пленок связанной воды<sup>28</sup>.

Они понижают поверхностную энергию минералов горной породы, облегчая развитие в породе различных механических микронарушений, дислокаций, микротрещин и т.д., особенно в том случае, если порода находится в напряжённом состоянии (при проходке тоннеля). Вследствие этого порода начинает "ползти", она деформируется с той или иной скоростью при том же самом постоянном напряжении. Это одна из форм проявления так называемого эффекта Ребиндера<sup>29</sup>.

---

<sup>27</sup> Это объясняется тем, что дисперсные горные породы обладают большой величиной удельной поверхности (суммарной площадью поверхности единицы массы породы), достигающей в некоторых глинах  $600 \div 800 \text{ м}^2 / \text{Г}$ . А поскольку количество связанной воды в породе в первом приближении пропорционально её удельной поверхности, то становится понятным, почему именно в глинах содержится больше всего связанной воды.

<sup>28</sup> Адсорбционные пленки [101], образованные связанной водой, толщиной в один или несколько молекулярных слоев заполняют поры горных пород или микротрещины размером менее 0.001 мкм. У этого типа воды физические свойства в наибольшей степени отличаются от свободной.

<sup>29</sup> Эффект облегчения пластической деформации тел различной природы и снижения их прочности за счет явления адсорбции. Ускорение ползучести горных пород в условиях действия адсорбционных сред отмечалось неоднократно. Этот процесс широко развит в природе и целенаправленно используется человеком. Наиболее характерно он проявляется в условиях так называемой "наведенной сейсмичности" - активизации сейсмической активности территории в зоне влияния водохранилища после начала его затопления и возникновения искусственных землетрясений силой до 5 - 7 баллов.

Происходящее после сезонного заполнения любого горного водохранилища просачивание по тонким порам и трещинам связанной воды в прилегающие массивы горных пород вызывает понижение поверхностной энергии слагающих их минералов, вызывая в напряженных горных породах интенсивное развитие дислокаций и микротрещин. За счёт этого происходит релаксация напряжений в массиве, их ослабление, что макроскопически выражается в виде сейсмических колебаний массива в целом. Процесс носит кинетический характер.

Связанная вода в горных породах неоднородна. Она удерживается в породе за счет химических и физических сил связи (с энергией 0.1 - 800 кДж/моль), действующих со стороны поверхности минералов и изменяющих структуру и свойства воды. Установлено, что связанная вода может внедряться в поликристаллические скальные породы по этим сплошным межзёрненным поверхностям раздела между различно ориентированными областями (зёрнами) поликристалла и межфазным границам и оставаться там неопределенно долгое время. Такая "межзёрненная пропитка" наиболее вероятна в породах, для которых наблюдается полное смачивание свободной поверхности водой. С ростом температуры и напряжений круг пород, в которых проявляется данный эффект, ещё больше расширяется.

По данным [102] прослойки связанной воды толщиной 0.5 – 0.6 нм имеют диэлектрическую проницаемость, равную всего 3÷40. Сложность интерпретации диэлектрических спектров связанной воды обусловлена тем, что у некоторых содержащих воду объектов на частотах от 1 до  $5 \cdot 10^{10}$  Гц может выявляться до 5 максимумов  $\text{tg}\delta$  и, соответственно, до 5 областей дисперсии диэлектрической проницаемости, выяснить природу каждого максимума  $\text{tg}\delta$  удастся не всегда [103, 292]. Резкое снижение величины диэлектрической проницаемости горной породы из – за появления в ней связанной воды приводит к скачку  $\text{tg}\delta$  [144].

Причиной повышения электропроводности может быть [292], во-первых,

возможность эстафетного механизма<sup>30</sup> переноса протона вдоль цепочек из молекул воды и функциональных групп сорбента (карбоксильных - COOH, гидроксильных - OH и т.п.). Во-вторых, переход ионов примесей с поверхности твёрдого тела в пленку воды, в то время как первые адсорбционные слои воды ведут себя как чистая вода с низкой электропроводностью.

Благодаря эстафетному механизму переноса протонов ионы гидроксония в действительности не двигаются через раствор и перенос тока осуществляется путем перераспределения электронов в молекулах воды.

Очевидно, каждая молекула воды, принимающая участие в процессе переноса электричества, после ухода протона должна ориентироваться особым образом, чтобы встретить новый протон. Существенно, что численные значения подвижностей других ионов, несмотря на значительные отличия в радиусах, близки друг к другу [198, 297]. Это объясняется гидратацией ионов, т.е. тем, что в действительности через раствор двигаются комплексы, состоящие из молекул воды и ионов, которые имеют приблизительно одинаковые размеры, так как чем меньше ион, тем сильнее его электростатическое поле и тем сильнее он гидратирован.

Практически все горные породы (в том числе магматические и метаморфические) можно рассматривать как дисперсные системы, то есть имеющие большую удельную поверхность, образованную внутренними границами раздела между минеральными фазами одинакового или разного состава. В последнее время учеными установлено, что связанная вода может внедряться в поликристаллические скальные породы по этим сплошным межзёрненным поверхностям раздела между различно ориентированными областями (зёрнами) поликристалла и межфазным границам и оставаться там неопределенно долгое время. Такая "межзёрненная пропитка" наиболее вероятна

---

<sup>30</sup> Подвижности ионов водорода и гидроксила в водных растворах аномально велики по сравнению с подвижностями других ионов. Это обусловлено эстафетным механизмом переноса заряда ионами  $H^+(H_3O^+)$  и  $OH^-$ . В кислых растворах при наложении поля «+» заряд переходит от иона гидроксония вместе с атомом водорода к ближайшей молекуле воды, которая становится ионом  $H_3O^+$ . Этот ион, в свою очередь, передает заряд соседней молекуле воды и т.д. Таким образом, за короткое время положительный заряд переносится на значительное расстояние.

в породах, для которых наблюдается полное смачивание свободной поверхности водой, а также происходит снижение прочности породы не менее чем вдвое. С ростом температуры и напряжений круг пород, в которых проявляется данный эффект, ещё больше расширяется.

Величина напряжённости приложенного электромагнитного поля начинает проявляться при  $E \geq 100 \text{ В/см}$  [521]<sup>31</sup>.

#### **1.4 Георадарные измерения электрических параметров**

Первые идеи радиоволновых (ондометрических) зондирований на основе фазовых измерений высказаны немецкими учеными Г. Лови и Г. Леймбахом в 1910÷1913 гг. Суть метода зондирований сводилась к изучению интерференции («биений») прямых и отраженных радиоволн (возвратный метод).

В последующие годы этот метод разрабатывался в МГУ А. А. Петровским, Ф. Фричем, А. И. Заборовским, М. К. Крыловым. В конце тридцатых годов XX века в Англии был разработан метод импульсной радиолокации, основной областью применения которого являлось обнаружение самолетов в воздухе. Импульсная радиолокация быстро нашла применение и во многих гражданских отраслях, прежде всего в авиации и мореплавании.

Применение радиолокации для геологической разведки стало возможным после того, как появились полупроводниковые приборы, позволяющие генерировать импульсы длительностью первые наносекунды, обеспечивающие разрешающую способность в доли метра.

Впервые радиоотражение от подповерхностных структур было случайно зафиксировано радиолокационным высотомером на ледовом аэродроме в Антарктиде А. Уэйтом в 1957 г. Он обратил внимание на то, что радиовысотомер показывал высоту 900 футов еще до момента отрыва самолета от взлетной полосы. Оказалось, что радиовысотомер, который представлял

---

<sup>31</sup> Это происходит потому, что плоскость скольжения смещается ближе к поверхности твердой фазы и в движение вовлекается часть катионов адсорбционного слоя ДЭС, не участвовавшая в движении при меньших  $E$ .

собой импульсный радиолокатор, фиксировал отражение от нижней границы ледника. Это послужило началом исследований вопроса об использовании радиолокации в геофизике. Позже выяснилось, что применение обычных схем радиолокаторов для целей подповерхностного зондирования возможно только в ограниченном количестве случаев, когда затухание радиоволн в среде мало (лёд, сухие песчаники, каменная соль и т.п.). Для подавляющего большинства водонасыщенных пород, когда затухание радиоволн весьма велико, необходимы иные технические решения.

Начали широко применяться радиолокационные определения мощности покровных (Арктика, Антарктика, Гренландия) и горных (Кавказ, Тянь-Шань) ледников. Максимальная толщина изученных ледников (свыше 4 км) получена в Антарктиде [248, 249]. Среди отечественных специалистов, изучающих ледники, наиболее известен Ю. Я. Мачерет [97].

Успехи в развитии георадиолокационного подповерхностного зондирования в России относятся к 90-м годам XX века.

За последние годы вырос интерес к методам и устройствам подповерхностной радиолокации и дистанционного зондирования подстилающих сред. К настоящему времени различными разработчиками создано значительное количество устройств для ряда технических приложений. При этом, однако, остаются нерешёнными вопросы теории, дизайна и практических приложений некоторых классов приборов подобного типа.

Для увеличения разрешения и энергетического потенциала предпринимались попытки использовать широкополосные сигналы с линейной частотной модуляцией или шумоподобные с фазовой модуляцией, в основном так и оставшиеся на стадии эксперимента.

Применение импульса без несущей, который представляет собой одно или несколько колебаний ВЧ тока в антенне, даёт теоретически бесконечную полосу частот. Для регистрации сигналов в первых конструкциях георадаров

обычно использовался стробоскопический осциллограф, при этом амплитуда сигнала на кристаллическом диоде на его входе строго  $\leq 1 \text{ В}$ <sup>32</sup>.

Реально георадиолокация начинает свою историю с 1960 г., когда переход на предложенный И. Куком зондирующий импульс без несущей частоты позволил создать прибор, способный работать не только на ледниках, но и в других средах. В нашей стране начало подобных работ положено М. И. Финкельштейном (1976). Только сегодня осознаются огромные возможности георадиолокации.

Способ формирования импульса без несущей получил название «метод ударного возбуждения антенны» - на передающую антенну тем или иным образом подается скачок напряжения, который в антенне преобразуется в излучаемый СШП сигнал.

Сегодня подавляющее большинство рынка георадаров составляют ИИС с относительно маломощными генераторами (амплитуда импульса  $\leq 300 \text{ В}$ ), приёмником с прямым стробоскопическим преобразованием и антеннами типа «диполь Герца» или его разновидностями. К сожалению, всем георадарам класса PRS или GPR свойственно слабое метрологическое обеспечение [194], поскольку ключевую роль в них играют антенны, чья сверхширокополосность, растянутая в область высоких частот, в ряде случаев является мешающей для результата измерений. Последнее обусловлено тем, что ВЧ составляющая сигнала в подстилающей среде затухает очень быстро и избыточная полоса приёмника забивается шумом (отношение «сигнал/шум» резко падает).

Обратные задачи подповерхностного зондирования [195] (особенно для инженерной геологии) предполагают создание электродинамических моделей подповерхностной среды. Это, в свою очередь, требует создания стратегии диагностики и идентификации подповерхностных областей и объектов, которая включает в себя:

- геофизическую съёмку комплексом подповерхностного зондирования;
- обработку полученных данных при помощи алгоритмов, эффективных для данной стратегии;

---

<sup>32</sup> Механизмы повреждения либо деградации свойств полупроводниковых элементов под действием ЭМИ здесь не рассматривается.

- определение электрофизических и геометрических параметров объектов;
- создание структурной модели.

Современный георадар представляет собой радиолокатор для обнаружения неоднородностей в средах со значительным поглощением и сильной частотной дисперсией. В нём используются разнесённые приемная и передающая антенны<sup>33</sup>. При хорошем согласовании антенн со средой удаётся избежать прямого просачивания сигнала из передающей в приёмную антенну, тем самым увеличить динамический диапазон приёмника на 20 – 30 дБ.

Использование сигналов без несущей частоты приводит к отказу от традиционной схемы приемного устройства и переходу к ИИС, в состав которой обязательно входит компьютер [252, 253].

К группе PRS (GPR) относятся:

- системы Road Scan, изучающие структуру и дефекты дорожного покрытия, и аналогичные им системы в России "Логис", "ТР-ГЕО" и т.д.;
- системы GSSI, изучающие структуру и дефекты стенок тоннелей;
- системы Bridge Scan, изучающие структуры и дефекты мостовых перекрытий и т.д.

Системы группы PRS и GPR построены по принципу радиодальномера, который подразумевает радиопрозрачность (ток смещения почти равен току проводимости [262]) и изотропность [254] среды для своих сигналов. Отсюда малая глубинность (5 – 7 м) и необходимость максимально ровной дневной поверхности, с которой проводятся измерения. Это обусловлено тем, что подповерхностная структура выстраивается по волновой функции.

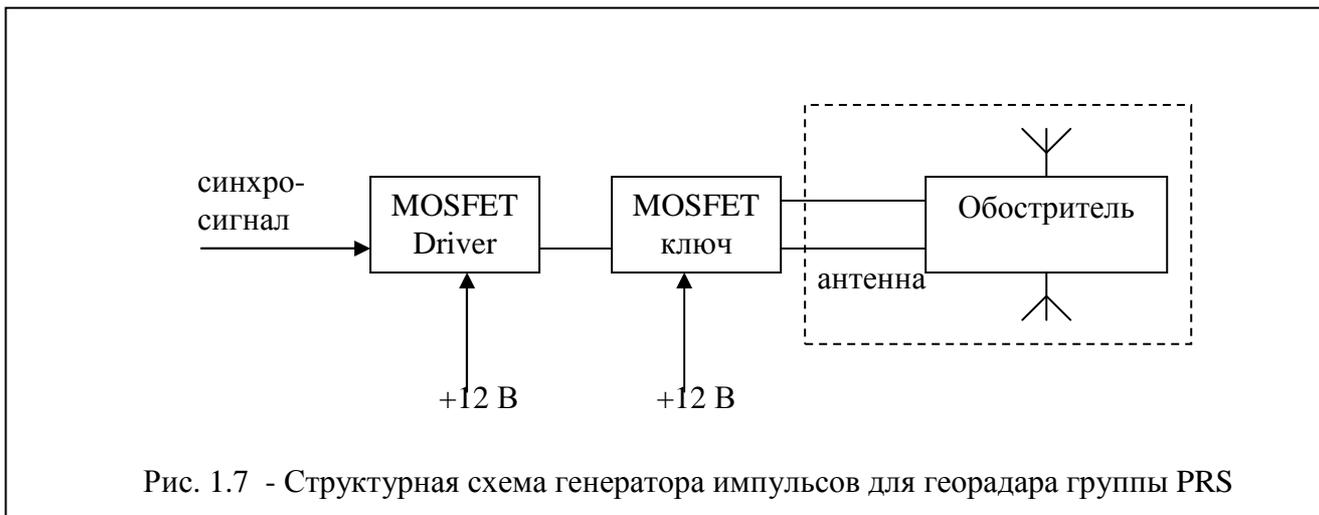
#### **1.4.1 Общепринятая структурная схема георадаров типа PRS**

Генерация импульсов наносекундной длительности с амплитудой <300 В с помощью, например, схем из MOSFET – транзисторов или диодов с накоплением заряда (ДНЗ) является техническим решением, позволяющим

---

<sup>33</sup> В случае с моностатической антенной время переключения из режима передачи в режим приёма создаёт мёртвую зону.

классифицировать данный тип георадаров как PRS (GPR). На рис. 1.7 представлена типовая схема генератора излучаемых импульсов.



На рис. 1.8 – типовая схема стробоскопического приёмника, на рис.1.9 представлена типовая структурная схема георадара типа PRS (GPR).

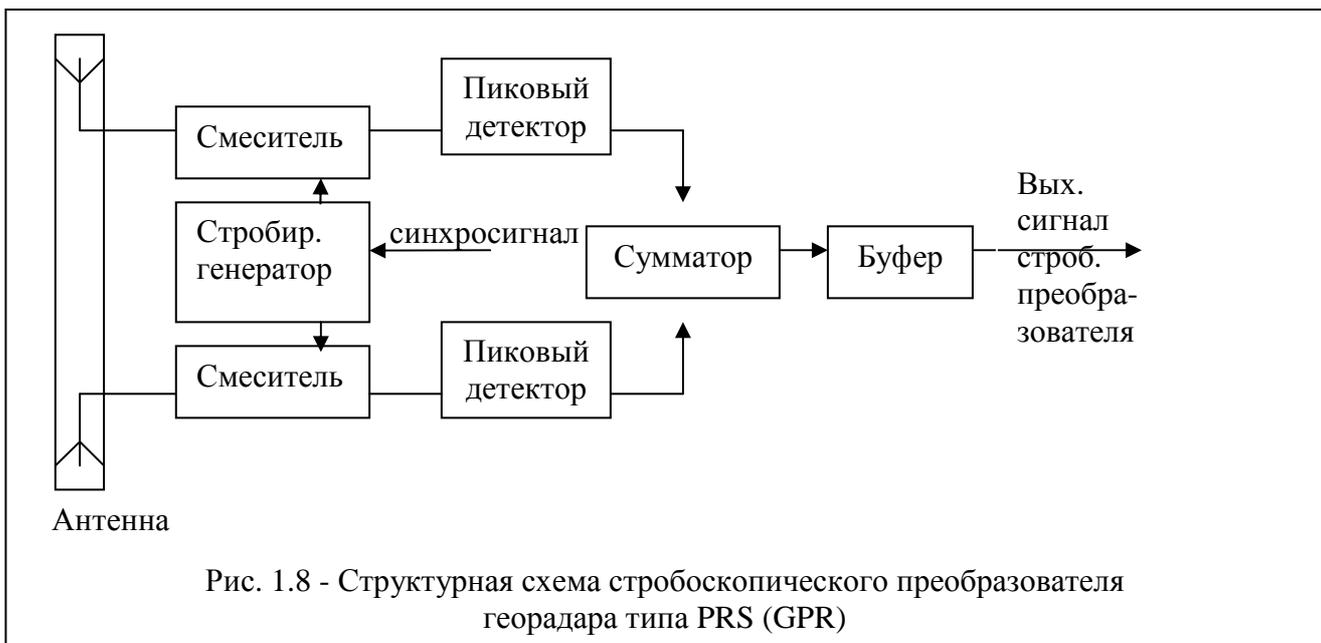
Типовыми техническими характеристиками генератора являются:

- Питание- 12В, 150 мА
- Длительность фронта импульса -1...2 нс
- Длительность спада импульса - 2...3 нс
- Амплитуда импульса - 150...300В
- Частота повторения - более 100 кГц
- Временная нестабильность (джиттер) - менее 100 пс.

При этом серьезными проблемами являются:

- нестабильность фронта импульсов;
- согласование передающей антенны с подстилающей средой.

Вторым важным узлом георадара является стробоскопический преобразователь. Его параметры определяют полосу пропускания приемной части георадара. Для получения максимальной чувствительности приемника и полосы его пропускания желательно преобразование (стробирование - импульсное гетеродинирование) производить непосредственно на антенне.



Для этого используется дифференциальный (разнесенный в пространстве) стробоскопический преобразователь, в котором разделены функции стробирования и пикового детектирования.

Типовые характеристики стробоскопического преобразователя: полоса пропускания - 10МГц ÷ 1 ГГц; чувствительность - 20 мкВ; питание - 12В, 50мА.

Георадар, использующий в качестве излучателя генераторы, изготовленные по MOSFET- или ДНЗ – технологии, состоит из следующих узлов: синхронизатор; генератор наносекундных импульсов; стробоскопический приемник; источник питания; компьютер с соответствующим программным обеспечением, т.е. приемник георадара представляет собой ИИС.

Специфика работы ИИС состоит в уровне распределения функций между компьютером и синхронизатором: компьютер задает синхронизатору набор параметров из допустимых (например, диапазон сканирования, количество выборок в трассе, количество накоплений и т.д.), а затем принимает данные зондирования. Недостаток такого подхода состоит в том, что набор возможных параметров радара ограничен возможностями синхронизатора.

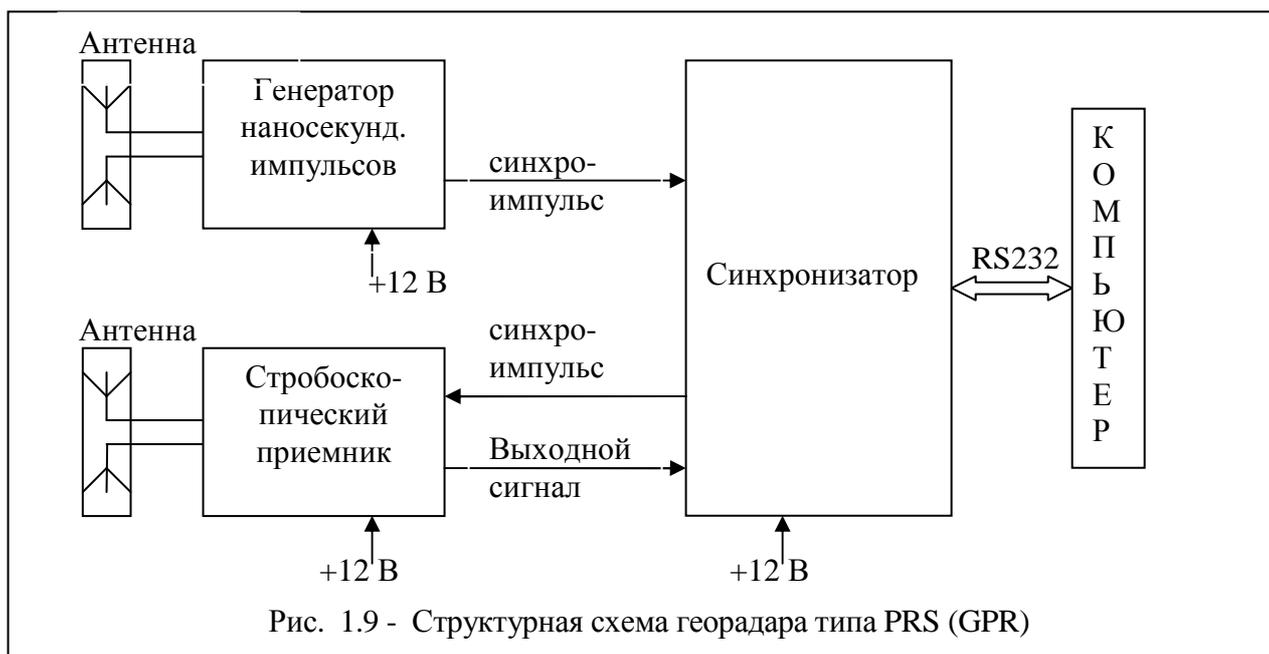
Следующий подход состоит в том, что все функции синхронизатора принимает на себя компьютер, а локатору передаются непосредственно сигналы управления передатчиком и АЦП. Реализация такого алгоритма

требует внедрения компьютера внутрь георадара, что приводит к удорожанию конечного изделия, на этом принципе построены георадары серии SIR.

Третий подход - это разделение функций синхронизатора и компьютера по принципу интеллектуальности выполняемых действий.

Все математические преобразования, визуализация и хранение данных возложены на компьютер, а синхронизатор выполняет только набор простых команд, таких как установка данных, оцифровка и передача выходных данных обратно в компьютер.

Как правило, для реализации такого алгоритма обмена данных в ИИС требуется разработка специального протокола обмена между компьютером и синхронизатором, который позволяет осуществлять настройку георадара перед началом измерений, а затем передачу измеренных данных обратно в компьютер.



Существующие проблемы:

- любая схема приёмника типа «Маркони» в современном исполнении стремится к сверхширокополосности (в пределе  $\lim \Delta f_{\text{opt}} \approx \infty$ ), что весьма ограничивает отношение «сигнал/шум»;

- нельзя реализовать переменную скорость сканирования, поскольку последовательность выборок, количество накоплений и временное окно

(глубина) с фиксированным усилением сигнала должны устанавливаться для каждой трассы сканирования;

- рандомизация спектра излучения возможна лишь при повторении измерений после обработки результатов;

- реализация коррекции неравномерности усиления по глубине вызывает трудности с идентификацией по Тейчеру.

#### **1.4.2 Современное состояние обработки данных в системах PRS**

При решении задач инженерной геологии требуется литологическое расчленение подстилающей среды, идентификация слоев и определение их состояния.

В настоящее время геофизическая интерпретация данных PRS базируется на методе радарограмм [195, 271]. При этом существенно, что полезный сигнал принимается на фоне помех и шума. Если для обработки георадиолокационных данных, полученных с использованием несущей частоты, используют алгоритмы теории фильтрации ( $\Delta\omega \ll \omega_{\text{нес}}$ ), то для обработки ЭМИ СШП сигналов используются как параметрические, так и непараметрические цифровые алгоритмы. Среди параметрических методов обработки сигналов наиболее широкое распространение нашел метод Прони [256], осуществляющий аппроксимацию данных с использованием детерминированной экспоненциальной модели, класс непараметрических линейных методов цифровой обработки сигналов представлен в [258].

Поскольку в георадиолокационном сигнале присутствует угловая зависимость  $(\theta, \varphi)$ , то за полезный сигнал принимаются те волновые составляющие смеси «сигнал + помеха + шум», чьи оси считаются синфазными – поведение производной по углу места меняется плавно ( $d\theta/dN < \infty, \varphi = \text{Const}$ ),  $N$ -номер трассы. Характеристики полезных волн - их оси синфазности, амплитуды, частотный состав, общий вид записи и т.д.- используются для оценивания параметров среды.

Для выделения полезных сигналов используют отличие одной или нескольких указанных характеристик от соответствующих характеристик шума и волн-помех [263]. Опираясь на эти отличия, с помощью разнообразных способов преобразования сигналов волны-помехи стараются ослабить, удалить с записи или хотя бы опознать их на записи и не принимать за полезные волны.

Основные приемы анализа и преобразования сигналов для выделения полезных волн на фоне помех и шумов и улучшения отображения особенностей разреза на радарограмме последовательно включают коррекцию сигнала, его фильтрацию и повышение разрешающей способности [97, 98].

Коррекция амплитуд георадиолокационного сигнала реализуется в виде:

- изменения коэффициента усиления записи;
- введения коэффициента усиления, линейно или экспоненциально растущего с увеличением времени (глубины) вдоль трассы.

К линейной фильтрации в георадарах типа GPR прибегают, когда в ходе измерений становится очевидным, что частотный спектр помехи или шума занимает на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала (в теории оптимального приема такую помеху называют неокрашенной). В этом случае частотная фильтрация позволяет ослабить помеху и (или) шум практически без ослабления и искажения сигнала (рис.1.10).

Параметрами процедуры фильтрации являются вид фильтра (например, полосовой с трапецеидальными срезами, Баттерворта, Ормсби и т.д.), полоса частот фильтра, крутизна срезов частотной характеристики фильтра .

В тех случаях, когда частотные диапазоны помехи и полезного сигнала значительно перекрываются или совпадают, а частотная фильтрация может не приводить к улучшению результата, с точки зрения обнаружения или более уверенного прослеживания осей синфазности полезных волн используется трансверсальный фильтр.

Выполняется процедура следующим образом: в системе или программе обработки имеется набор фильтров со своими параметрами, из которых

конкретный вид фильтра выбирается пользователем, затем трасса подвергается прямому преобразованию Фурье, полученный комплексный спектр трассы умножается на комплексный спектр фильтра, и результат (каждая трасса отдельно) подвергается обратному преобразованию Фурье – реализуется схема трансверсального фильтра. Результат процедуры – весь набор трасс, составляющих радарограмму, каждая из которых подвергнута вышеописанной процедуре.

Повышение разрешающей способности основано на следующих процедурах: свертки радарограммы в виде импульсной деконволюции<sup>34</sup> и в виде предсказывающей деконволюции.

Процедуры служат для свертки радарограммы с зондирующим импульсом, с которым получена радарограмма, уменьшения его длительности, соответствующего уменьшению интервала на трассе, “закрытого” отраженной волной, и тем самым повышению возможности выделить на записи оси синфазности отраженных волн от близких границ или объектов.

Для предсказывающей деконволюции не требуется знания формы зондирующего сигнала генератора (излученная составляющая может меняться вдоль профиля из-за изменений электрофизических свойств первого слоя грунта), а используется АКФ собственно трассы в некотором задаваемом скользящем окне для “сжатия” отраженных импульсов. Параметрами процедуры: величина скользящего окна, шаг предсказания (изменения отсчетов на трассе) и допустимая степень высокочастотных искажений результирующего сигнала (уровень добавленного шума). Как правило, в системах обработки отдается предпочтение именно предсказывающей деконволюции как более гибкому инструменту по сравнению с импульсной.

---

<sup>34</sup> Импульсная деконволюция использует форму зондирующего импульса, на комплексный спектр которого делится комплексный спектр трассы. В идеальном случае на результате обратного преобразования Фурье должны остаться узкие пики, положение которых соответствует временам прихода отражений. Практически же на результирующей трассе остаются многофазные импульсы, но более короткие по времени, чем исходный зондирующий сигнал. Это связано с тем, что все перечисленные операции могут быть выполнены только в ограниченной полосе частот, где спектр зондирующего импульса не обращается в ноль.

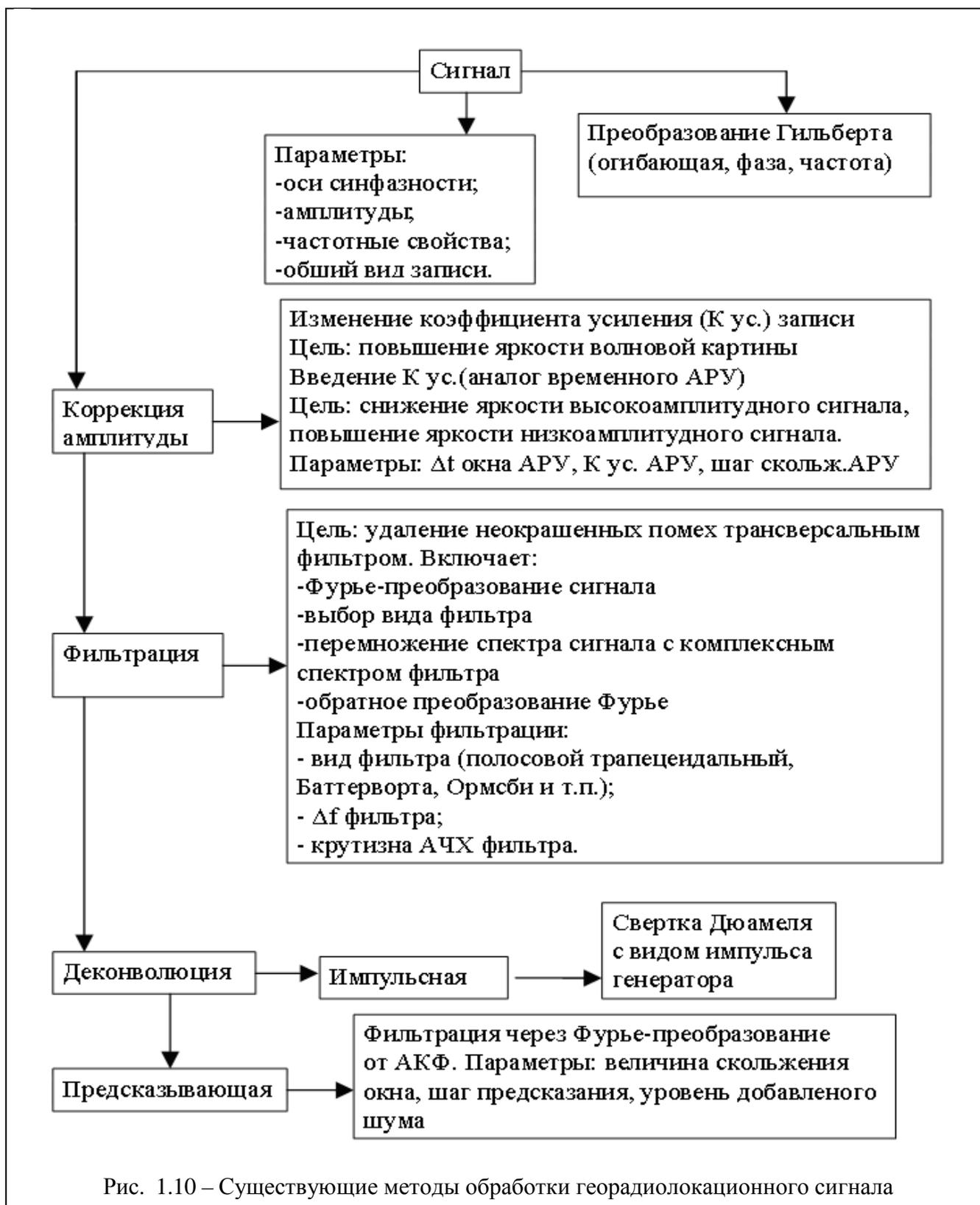


Рис. 1.10 – Существующие методы обработки георадиолокационного сигнала

## 1.5 Основы распространения ЭМИ СШП сигналов в подстилающей среде

Моноимпульсная локация объектов с использованием мощных импульсов наносекундной длительности [99, 253] как применение СШП сигналов без несущей в подповерхностной радиолокации требует изучения вопросов не только генерирования видеоимпульсов, но и согласования их с антенными трактами, формирующими собственно зондирующий сигнал в подповерхностной среде; анализа условий распространения радиоволн в грунте и их взаимодействия с объектами исследований; учёта особенностей приёма, обработки и идентификации; знания свойств земных почв, грунтов, горных пород [128, 188, 189, 264].

### 1.5.1 Существование оптимального частотного диапазона

Существование оптимального частотного диапазона [100] для подповерхностной радиолокации связано с тем, что при возрастании частоты поля, с одной стороны, увеличивается эффективность приёмно – передающих антенн (глубина), а с другой - возрастает затухание радиоволн.

Известно, что в поглощающих средах (определено в [262]), т.е. когда токи проводимости превышают токи смещения, оптимальные частоты для радиосвязи считают [265] обратно пропорциональными квадрату дальности связи с коэффициентом, зависящим от геометрических параметров антенн и электропроводности среды

$$f_{\text{opt}} \approx A \cdot r^{-2}.$$

Причём при инженерных расчётах часто берут значения электропроводности, полученные по измерениям на постоянном токе.

А.Д. Фроловым [274] были выполнены оценки частотной зависимости эффективности подземной радиосвязи с учётом как токов проводимости, так и токов смещения, которые показали, что в сильнозасоленных песках оптимальные частоты для радиосвязи уменьшаются с расстоянием гораздо медленнее

$$f_{\text{opt}} \approx A \cdot r^{-0.7}.$$

В то же время при концентрациях насыщенных поровых растворов меньше критической (мёрзлые пресные пески) оптимальные частоты уменьшаются с расстоянием гораздо быстрее, например, при  $t^0 = -3^\circ\text{C}$

$$f_{\text{opt}} \approx A \cdot r^{-3.7}.$$

Это, по – видимому, связано со сложным влиянием температурной зависимости максимума электропроводности на величину оптимальной частоты.

## 1.5.2 Применение эмпирической гистограммы амплитуды

### радиолокационного сигнала и способы ее построения

Сегодня путём аппроксимации эмпирических распределений амплитуд одноканальных спутниковых изображений смесями обобщенных гамма (ОГ) – распределений решается задача построения радиолокационного изображения (РЛИ) для радара с радиосинтезированной апертурой (РСА).

Такой выбор модельного распределения объясняется высокой универсальностью трехпараметрического семейства ОГ-распределений. Во-вторых, применение конечных смесей является наиболее адекватной статистической моделью для аппроксимации смешанных распределений, возникающих при обработке данных высокого разрешения.

ОГ-распределения считаются базовыми при обработке РСА–данных ЕМ-алгоритмами<sup>35</sup> и их модификациями [470, 477]. Рассматриваются: более общая смесевая модель, основанная на расширении диапазона распределений (Вейбулла - Гнеденко, логнормальное, Фишера, Накагами, обобщенное

---

<sup>35</sup> ЕМ-алгоритм (англ. expectation-maximization) - алгоритм, используемый в математической статистике для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей, в случае, когда модель зависит от некоторых скрытых переменных. Каждая итерация алгоритма состоит из двух шагов. На *Е-шаге* (*expectation*) вычисляется ожидаемое значение функции правдоподобия, при этом скрытые переменные рассматриваются как наблюдаемые. На *М-шаге* (*maximization*) вычисляется оценка максимального правдоподобия, таким образом увеличивается ожидаемое правдоподобие, вычисляемое на Е-шаге. Затем это значение используется для Е-шага на следующей итерации. Алгоритм выполняется до сходимости.

дисперсионное гамма - распределение), и обобщенные модели Гаусса-Рэля и Рэля с тяжелыми хвостами. Разрабатывается гистограммная модификация SEM–алгоритма<sup>36</sup>.

Превосходство разработанных моделей по сравнению с существовавшими ранее [123] может быть обусловлено тем, что все эти распределения и модели обладают свойством идентифицируемости [477].

Общепринято делать интервалы группирования одинаковыми [260, 447], их оптимальное число существует [450].

Зависимость числа равновероятных интервалов группирования от объёма выборки при  $N \rightarrow \infty$  имеет вид

$$n \approx 4 \cdot \sqrt[5]{2} \cdot (N/t)^{0.4},$$

где  $t$  – безразмерная квантиль нормального распределения, соответствующая заданной вероятности  $P=1-q$ ,  $q$  – принятый уровень значимости. Экспериментально используют

$$n_{\min} = 0.55 \cdot N^{0.4}, n_{\max} = 1.25 \cdot N^{0.4}.$$

В тех случаях, когда гистограмма оказывается явно двухмодальной, число столбцов гистограммы может быть увеличено в  $1.5 \div 2$  раза [446].

## 1.6 Состояние вопроса о согласовании антенны со средой

Учет влияния земной поверхности и, соответственно, расчеты характеристик приземных антенн, а также вопросы распространения радиоволн рассматривались в трудах многих отечественных и зарубежных ученых<sup>37</sup>. Однако до сегодняшнего дня не решён ряд важных задач в области исследования и разработки электрически малых СШП антенн, минимально

<sup>36</sup> Стохастический EM-алгоритм (Stochastic, SEM). Классический EM-алгоритм относится к так называемым «жадным» алгоритмам, то есть он бросается на первый попавшийся локальный максимум, который, как уже упоминалось, может сильно отличаться от глобального. Одним из способов борьбы является как бы случайное, но целенаправленное «встряхивание» выборки на каждой итерации. Такая рандомизация «выбивает» оптимизационный процесс из локальных максимумов, так что SEM работает относительно быстро, и его результаты практически не зависят от начального приближения; как правило, SEM находит экстремум, близкий к глобальному.

<sup>37</sup> А. Зоммерфельд (A. Sommerfeld) [509], В.А. Фок [124], М.А. Леонтович [125], Е.Л. Фейнберг [126], Б.А. Введенский [127], Г.А. Лавров, А.С. Князев [128], Г.З. Айзенберг [153, 154, 166], Р. Кинга (R.W.P. King) [188].

искажающих структуру наблюдаемого поля, создаваемого источником излучения.

Рассматриваемый круг задач можно разделить на:

- электродинамическое моделирование (ЭДМ) самих антенн [129];
- анализ влияния подстилающей поверхности (земли).

### 1.6.1 Электродинамическое моделирование антенн

Разработанные по ЭДМ антенн методы условно можно поделить на два класса (рис. 1.11):

1) методы, основанные на решении краевых задач для дифференциальных уравнений (ДУ);

2) методы, предназначенные для решения интегральных уравнений (ИУ).

Первые предполагают использование в различных вариантах метода конечных элементов, конечно-разностной аппроксимации, метод Винера - Хопфа и т.д. [130÷133]. Подобные подходы эффективны для внутренних электродинамических задач.

Для внешних задач предпочтительнее ИУ с точки зрения потребности в вычислительных ресурсах, так как конечно-разностная схема ограничивается введением граничного условия на бесконечности, но все равно остается весьма протяженной [134] и в силу ограничений на аргумент функций Бесселя плохо считаются.

ДУ более эффективны для внутренних задач: использование конечно-разностного метода их решения применяется для моделирования поверхности земли и пространства вблизи системы «антенна - граница раздела». Однако при таком подходе возникает проблема пространственного ограничения размеров сетки, и требуются большие вычислительные ресурсы.

Следует отметить подходы, использующие спектральные представления функции Грина [135÷137, 140]. Широкие возможности методов, использующих спектральные представления, оказываются востребованными в задачах анализа

приземных (подземных, подводных и т.п.) антенн.

Для ЭДМ антенн (внешние задачи) предпочтительнее использование методов на основе ИУ. В рамках данного направления также существует большое разнообразие различных методов и подходов. Прежде всего, следует выделить группу методов, основанных на строгой исходной постановке задачи относительно реальных поверхностных источников. Такие методы развиты в трудах С.И. Эминова, В.А. Яцкевича и других ученых [145÷148]. К этому направлению следует отнести и развитый в трудах Л.С. Казанского, М.А. Минкина, А.Л. Бузова [149÷150, 174,175] метод обобщенной эквивалентной цепи. Данные методы позволяют строить устойчивые вычислительные алгоритмы. Областью их применения считается анализ одиночных излучателей и слабоизлучающих структур (например, катушек индуктивности, шлейфов и т.д.).

Альтернативой вышеописанным методам являются методы на основе так называемого тонкопроволочного (осевого) приближения с использованием уравнений Фредгольма I рода, явившихся исторически первыми и получивших наиболее широкое распространение в задачах анализа проволочных антенн.

При этом задача сводится к уравнениям Фредгольма I или II рода и к их комбинациям, а также к их обобщениям на двумерный или трехмерный случаи. Эти методы развивались в работах Е. Галлена (E. Hallen), Р. Ф. Харрингтона (R.F. Harrington), Г. З. Айзенберга, Е. Н. Васильева, Ю. В. Пименова, В. В. Юдина и др. [153÷167]. Для электродинамического анализа поверхностных рассеивателей наилучшим образом подходят ИУ с поверхностными интегралами. Однако из-за большого объема вычислений в большинстве случаев использование ИУ становится невозможным. Поэтому на практике для анализа таких рассеивателей применяются либо квазиоптические методы, такие, как методы физической и геометрической оптики (особенность – метод физической оптики дает точное решение для разности токов на освещённой и теневой сторонах [518]), либо комбинированные методы на основе объединения опять же квазиоптических методов и ИУ [232]. Традиционно

подобные методы строятся на основе ИУ I рода без пересечения областей интегральных уравнений и физической оптики [168÷171]. Данные методы наиболее широко распространены в задачах анализа антенн и реализованы в программных пакетах FEKO Suite 5.4, CST STUDIO Suite 2009<sup>38</sup>. Стандартная реализация метода конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием прямоугольной сетки демонстрирует хороший результат при большом числе ячеек разбиения<sup>39</sup>.

Ядра ИУ I рода, к которым сводятся внутренние задачи электродинамики, представляют собой бесконечные ряды и содержат в неявном виде неопределённость (сингулярность) Коши и логарифмические особенности. В процессе алгебраизации ИУ производится усечение тригонометрических рядов, в результате чего ядра утрачивают эти особенности. Но ограничение размерности ядра при решении ИУ первого рода приводит к неустойчивости соответствующих алгоритмов и относительной сходимости приближённых решений, поскольку представляет собой некорректно поставленную задачу [172, 193]. Уравнения Фредгольма второго рода приводят к задачам, корректным по Адамару[173].

Однако следует заметить, что основные ИУ Фредгольма первого рода (Поклингтона, Харрингтона, Галлена) получены в тонкопроволочном приближении<sup>40</sup>. Как известно, ИУ Фредгольма первого рода приводят к некорректным по Адамару задачам. Неустойчивость решений проявляется в

---

<sup>38</sup> FEKO - это универсальная платформа, которая объединяет EDITFEKO, POSTFEKO, PREFEKO, OPTFEKO, TIMEFEKO для проектирования систем больших электрических размеров.

<sup>39</sup> При моделировании 3D структур, содержащих поверхности сложной кривизны, использование классической прямоугольной сетки разбиения приводит к необходимости использовать слишком мелкую сетку и неоправданно большое число ячеек. Использование тетраэдральной сетки частично решает проблему и позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам. Технология обеспечивает прирост производительности без потери точности вычислений для большинства приложений. Основные достоинства программных пакетов - простота алгоритмизации, сравнительно небольшая потребность в вычислительных ресурсах, универсальность в смысле пространственных форм, многолетний активный опыт их использования.

<sup>40</sup> Тонкопроволочное приближение - система допущений, которые упрощают задачу и могут быть введены в тех случаях, когда исследуемая структура состоит из линейных проводников с весьма малыми поперечными размерами. Конкретные допущения: в качестве тангенциальной учитывается только продольная составляющая поля, параллельная оси проводника; считается, что ток течёт параллельно оси проводника; не учитываются поперечные вариации поля и тока, они описываются функциями одной переменной - криволинейной координаты, отсчитываемой вдоль оси проводника; игнорируется тот факт, что ток течёт по поверхности проводника, считается, что ток является линейным, текущим по оси.

виде отсутствия сходимости решения по мере увеличения числа базисных функций. В частности, такие уравнения имеют ограничения на радиус проводника сверху (максимальный радиус проводника, при котором решение уравнений первого рода достоверно  $\approx 1\% \lambda$ ). Например, если для антенны допустимо качество согласования с коэффициентом стоячей волны по напряжению  $(КСВН) \geq 2$ , то современные методы на основе ИУ обеспечат достаточную точность; однако в случае более ответственных антенн с  $КСВН \leq 1.1$  неизбежно проведение этапа трудоёмких и затратных экспериментальных работ [174, 175]<sup>41</sup>.

### 1.6.2 Анализ влияния подстилающей поверхности

Задача анализа приземных антенн касается не только задач моделирования границы раздела «земля - воздух».

Влияние земли сказывается на входном импедансе и распределении тока в такой антенне [176, 177].

Наиболее простым и приближенным является метод анализа зеркальных изображений в предположении идеально проводящей земли. Очевидно, что считать землю идеальным проводником — весьма грубое приближение.

На практике распространен метод анализа на основе функции ослабления [178÷180], уточняющим метод зеркальных изображений - электрическое поле представляется суммой трех слагаемых: стороннее поле (поле антенны), поле зеркального изображения и слагаемое, содержащее функцию ослабления (учитывает влияние неидеальной земли). Что же касается функции ослабления, то методы на ее основе не позволяют учитывать неоднородность поверхности земли.

В работах [186, 187] развиты методы, использующие функцию ослабления и решения задач дифракции на геометрических неоднородностях. При этом

---

<sup>41</sup> Введение граничных условий, в которые в явном виде входят функции источников для тангенциальной компоненты магнитного поля и нормальной компоненты электрического поля, когда искомые функции находятся как под знаком интеграла, так и вне интеграла, приводит к ИУ Фредгольма II рода.

учитываются достаточно протяженные неровности идеализированной формы при однородном по электрофизическим свойствам грунте, т.е. не учитываются факторы, которые являются существенными с точки зрения импедансных свойств антенн и которые должны быть учтены при использовании ИУ.

Наиболее широко известны методы, основанные на описании поверхности земли с помощью импедансного граничного условия (условия Леонтовича - Щукина) [125, 517]. Задача ставится в форме ИУ второго рода относительно тока, наведенного в земле [181÷185]. Исследование импедансных условий требует привлечения ИУ и для тока антенны, причем оба уравнения необходимо решать совместно. Понятно, что такой подход является ресурсоемким, однако он позволяет учесть неоднородность земли по геометрическим (электродинамическим) и электрофизическим свойствам.

Для применения условия Леонтовича -Щукина необходимо знать значение импеданса земли или, что одно и то же, её электрофизические параметры. Для этого проводились и до сих пор проводятся многочисленные измерения, результаты которых можно найти в [11, 19, 35÷38, 49, 60, 61, 68÷86].

Впервые точное решение задачи о возбуждении поверхности земли элементарным вибратором изучалось А. Зоммерфельдом для случая вертикального вибратора, позже полученное решение было уточнено В.А. Фоком [140].

Для горизонтального вибратора аналогичная задача была решена Р. Кингом [189] и Г. Смитом [188]. Хотя полученные точные решения не имеют ограничений на параметры сред и позволяют рассчитывать поле в воздухе и подстилающей среде, они являются неудобными с точки зрения построения практических методик на их основе, так как при этом возникают сложности в вычислении комплексных интегралов от функций с особенностями.

Методы, учитывающие влияние земли без использования ИУ, весьма распространены в задачах исследования характеристик направленности приземных антенн, в том числе с учетом неровностей рельефа местности.

Следует отметить, что рассмотренные выше методы и подходы применяются и во многих других смежных задачах. Так, импедансные граничные условия широко используются для решения задач дифракции на различных хорошо проводящих объектах, объектах с различного рода покрытием [190] и т.п. Вопросы учета рельефа местности возникают при рассмотрении распространения радиоволн других диапазонов. Например, при моделировании распространения радиоволн в условиях городской застройки используются, в основном, квазиоптические методы [135, 136], в частности, метод (интеграл) Гюйгенса-Кирхгофа [151]. Они эффективны при анализе поверхностных рассеивателей специальной формы в тех случаях, когда методы оптики (коэффициенты Френеля) дают хорошее приближение на значительной части поверхности рассеивателя (например, при анализе параболического зеркала). Такие методы недостаточно универсальны с точки зрения протяжённой пространственной формы анализируемого объекта.

Также для решения дифракционно подобных задач могут быть использованы спектральные представления функции Грина [130, 132, 135, 136, 140, 190, 191, 193]. Решения аналогичных задач используются, как правило, при расчетах трасс распространения радиоволн [169, 181].

Построение электродинамической теории экранированных полосковых и щелевых направляющих структур на основе численно-аналитических методов впервые предпринято в работах В. А. Неганова [199, 201, 202], Е. И. Нефедова [203÷205], Б. А. Панченко [268]. В настоящее время в электродинамике полосковых и щелевых структур СВЧ наибольшее распространение получили проекционные методы [206 ÷ 210], в разработке которых большую роль сыграли исследования А. Г. Свешникова, В. В. Никольского, Я. Н. Фельда, Г. И. Веселова, А. С. Ильинского, Л. Левина, А. М. Лерера, В. С. Михалевского, В.Г. Феоктистова, В.И. Вольмана, В. П. Ляпина, Г. П. Синявского, Е.Н. Егорова,

Ю.Н. Алёхина, А. С. Арефьева<sup>42</sup>. Среди всех описанных численных методов, проекционную схему [210] выделяет возможность учёта особенностей поля на геометрических сингулярностях — рёбрах проводящих полосок. Это даёт возможность оптимизировать вычислительный процесс с точки зрения временных затрат и использования машинных ресурсов.

При решении задач о собственных волнах направляющих структур, содержащих бесконечно тонкие проводящие полоски, в качестве проекционных базисов обычно применяются системы многочленов Чебышева первого и второго рода. Исследование волновых полей в линиях передачи с кусочно - однородным диэлектрическим заполнением проводится с использованием многочленов Гегенбауэра [219].

Исследованию открытых прямоугольных диэлектрических волноводов посвящены работы Г. И. Веселова [214]; Дж. Гоелла [211]; А. П. Горобца, Л.Н. Дерюгина, В. Е. Сотина [215]; Е. Маркатили [212]; В. Шлоссера [213].

Наиболее эффективной из существующих в настоящее время экранированных моделей прямоугольных диэлектрических волноводов является модель, использованная в работах В. А. Кузнецова и А. М. Лерера [218, 220]<sup>43</sup>.

Построение электродинамической теории проволочных направляющих структур [139, 150, 224÷226.] обусловлено тем, что именно уравнения Фредгольма наиболее широко распространены и в достаточной мере апробированы.

Применение вейвлет – функций для расчёта проволочных антенн [227] означает относительно уравнения Фредгольма применение вейвлета Галёркина

---

<sup>42</sup> В процессе исследования волн в полосковой или щелевой линии передачи краевая задача формулируется в виде векторного интегрального уравнения первого рода относительно компонент тока на полосках или составляющих напряжённости электрического поля в щелях.

<sup>43</sup> Поперечное сечение линии передачи разбивается на частичные области, одна из которых имеет многослойное диэлектрическое заполнение. Сшивание продольных составляющих напряжённости электрического и магнитного полей на границе областей приводит к системе интегро - дифференциальных уравнений относительно оставшихся тангенциальных к границе компонент векторов  $E$  и  $H$ . Полученная система решается методом Галёркина с учётом особенностей неизвестных функций на ребре диэлектрического стержня. При этом компоненты напряжённости разлагаются в ряды по многочленам Гегенбауэра [219]. В [220] данный подход использован для исследования собственных волн ПДВ на диэлектрической подложке. Большая работа по этому вопросу проделана М. В. Давидовичем [221÷223].

– крайне сложной математической процедуры. На сегодня этим методом рассчитана только антенна Уда – Яги.

В работах А. Л. Бузова, В. В. Юдина и др. [157, 175, 228÷230] для регуляризации используются стационарные свойства характеристик излучения в дальней зоне; однако такой подход позволяет рассчитывать входной импеданс только для одного класса антенн - кольцевых решеток при модовых возбуждениях.

В ряде работ для тонкопроволочных антенн предложена модификация метода физической оптики (ФО) путем замены функции распределения тока на функцию распределения заряда [231, 232].

## ВЫВОДЫ

1. Для выявления обобщённых свойств электрофизических параметров почв, грунтов, горных пород проведен анализ общих закономерностей их поведения в переменном электромагнитном поле с привлечением всех видов структурной, дипольно – релаксационной и ионно – релаксационной поляризаций<sup>44</sup>.

2. Рассмотрено современное состояние георадиолокационных измерений и структура подобных устройств. Переход к исследованию подстилающей среды мощными наносекундными импульсами для увеличения глубины и точности обследования предполагает создание нового аппаратно – программного комплекса с зондированием в одной пространственной точке.

3. Представлено состояние вопроса о согласовании антенны с подстилающей средой. Зондирование мощными наносекундными импульсами предполагает создание антенн для подповерхностного зондирования.

4. Базовым методом обработки принимаемых сигналов при зондировании в одной точке выбрана аппроксимация эмпирических гистограмм амплитуды сигнала.

---

<sup>44</sup> В сложных дисперсных системах, имеющих существенные межфазные поверхности, основным видом поляризации является структурная поляризация Максвелла – Вагнера за счёт накопления объёмных зарядов на границах раздела фаз. Этот вид поляризации определяется электростатическими взаимодействиями на границах раздела фаз и зависит от наличия межфазовых поверхностей раздела поверхностной энергии, концентрации проводящих частиц ДЭС и их зарядов. Основной вклад в процессы структурной поляризации вносят: ил, физическая глина, ёмкость поглощения, гумус и реакция среды. Дипольно – релаксационная поляризация обусловлена ориентацией в переменных электромагнитных полях дипольных молекул, органических и органо – минеральных коллоидов, диффузных ионов ДЭС и определяется, в основном, содержанием гумуса, свойствами и составом ППК. Особенности состава и свойств ППК характеризуются концентрацией диффузных катионов и их активностью. Их активность, в свою очередь, зависит от их потенциальной энергии и определяется типом насыщенного катиона, его размерами и зарядом, которые во многом определяют своеобразие процесса почвообразования. Процесс ориентации в электромагнитном поле диполей органических и органо – минеральных коллоидов зависит от химического состава и размеров гумусных кислот, которые также определяют своеобразие почвообразовательного процесса. Ионно – релаксационная поляризация обусловливается смещением из положения равновесия и возможностью перемещения в электромагнитном поле подвижных ионов почвенного раствора, принимающих участие в процессах сквозной омической проводимости, величина которой зависит от их концентрации и подвижности.

## II КОМПЛЕКС ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Метод ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды как один из методов электроразведки (георадиолокации) нашел применение в инженерной геологии и строительной индустрии за счет увеличения глубины исследований после внедрения в качестве генератора ударного возбуждения антенны ДДРВ генераторов [277]. Пиковая амплитуда тока в таких приборах может достигать 800 А [267, 285]<sup>1</sup>. Увеличению глубины также способствовали работы по микрополосковым антеннам (см. гл. I, п. 1.6.2 и [268]).

Для оценки состояния подстилающей среды требуется идентификация её слоистой структуры. Эта задача является существенно некорректной<sup>2</sup> [269]. Её решению способствовали работы Г.А.Арчи и В.Н.Дахнова о связи сопротивления с пористостью, водонасыщенностью и диэлектрической проницаемостью песков для растворов с разной минерализацией (см. гл. I, п. 1.7 и [270]); А. Д. Фролова – о предельной концентрации KCl и NaCl в поровых растворах, характеризующих электропроводность грунтов в МГц - диапазоне частот [274]; Л. П. Семихиной – об экстремумах диэлектрических потерь воды в диапазоне частот  $10^4 \div 10^8$  Гц [292]. Они впервые позволили выявить в районе частот  $\sim 10$  МГц сильную низкочастотную дисперсию диэлектрической проницаемости среды, наличие которой ранее лишь предполагалось. Эти теоретические и практические основы обусловили эффективную применимость метода.

---

<sup>1</sup> Аналогичные работы на релявистской лампе обратной волны ведутся в Институте прикладной физики и в Институте сильноточной электроники (г. Томск) [282, 284]. Широко применяется резонансная трансформаторная схема (трансформатор Тесла) в однополупериодном режиме (ФГУП ВЭИ, г. Москва) [285÷289].

<sup>2</sup> Основной целью всех геофизических исследований является решение обратной задачи. Обратная задача заключается в определении отражающей границы по известной зависимости времени прихода сигнала от координаты точки наблюдения, т. е. определение строения среды по измеренным характеристикам поля. Параметры, определяющие строение среды, являются коэффициентами уравнения с частными производными или правыми частями этого уравнения, которому удовлетворяет поле. Задача отыскания коэффициентов уравнения или правой части уравнения по решению, известному только в некоторой части пространства, является некорректно поставленной задачей.

Выбор сильноточной схемы генерации излучаемых сигналов определяет как технические особенности георадара (схему согласования антенн с подстилающей средой, применяемый вид построения приемно-регистрирующей аппаратуры, протокол обмена аппаратуры с компьютером), так и особенности, используемые при идентификации.

Так, системы со слаботочной схемой генерации излучаемых сигналов (GPR или PRS) используют электродинамические свойства объекта, поскольку частотный диапазон сигнала лежит правее частоты, на которой  $\text{tg}\delta \approx 1$  подстилающей среды (рис. 1.2, 1.3), а при ЭМИ СШП зондировании частотный диапазон сигнала начинается практически с нулевой частоты и при идентификации результатов помимо электродинамических используются электрофизические свойства объекта (резонанс свободной воды ~ 25 МГц, резонанс связанной воды ~ 300 МГц как взаимодействие двух и более релаксаторов Дебая, взаимодействие проводимости и вязкости, наличие анизотропии электропроводности среды и т.д.).

## 2.1 Характеристические частоты в подповерхностной среде

Применение сильноточной схемы генерации СШП излучаемых сигналов вызывает в среде отклик в виде набора частот, которые названы «характеристическими» [290, 299]. В табл. 2.1 приведены частоты отраженных сигналов для ДДРВ - генераторов с различными параметрами. Эти результаты соответствуют определению частоты отраженного сигнала как величины обратной периоду, определяемому как время между двумя максимумами амплитуды в сигнале, начиная с окончания переходного периода (~20нс) [283]. Представлены частоты отраженного сигнала по измерениям, проведенным на бетонном фундаменте при различных комбинациях приемных и передающей антенн и четырёх ДДРВ - генераторов (амплитуда, фронт, длительность измерены по уровню 0.1÷0.9) для трехслойной модели (0.5 м – бетон, 2.5 м – насыпной грунт, далее суглинки).

Для принимаемых длин волн  $\lambda_{\max}$ : м - ( $\lambda_{\max} \sim 3.5\text{м}$ ), м<sub>1</sub>- ( $\lambda_{\max} \sim 1.6\text{м}$ ), дм- ( $\lambda_{\max} \sim 46\text{см}$ ): дм<sub>1</sub>- ( $\lambda_{\max} \sim 16\text{см}$ ) диапазонов отношение значений эффективной площади приёмных антенн составляет приблизительно 67.8:10.8:4:1. Здесь  $\lambda_{\max} = 2 \cdot y_{\max}$ ,  $y_{\max}$  - максимальный раскрыв антенны; м, м<sub>1</sub>- метровый диапазон длин волн; дм, дм<sub>1</sub> - дециметровый диапазон длин волн.

Таблица 2.1

№ п/п	Амплитуда импульса, фронт, длительность	Частота по каналу м-диапазона, МГц	Частота по каналу дм-диапазона, МГц	Частота по каналу м1-диапазона, МГц	Частота по каналу дм1-диапазона, МГц
1	1 кВ, 1 нс, 8 нс	61.6	68.3	66.5	69.4
2	4.77 кВ, 0.9 нс, 10 нс	72	76.5	74.5	78.1
3	640 В, 0.5 нс, 7 нс	81	82.5	81.7	83.3
4	1.5 кВ, 0.5 нс, 5 нс	79.5	81.5	80.5	84.8

Появление аналогичных частот от 50 МГц до 75 МГц отмечено в некоторых эпизодах георадарных исследований [271]. По данным Института органической и физической химии им. А.Е.Арбузова в диэлектрических характеристиках масляных фракций Нурлатского нефтегазового месторождения [272] присутствует резонанс с характерным временем релаксации  $2.49 \cdot 10^{-8}$  с. Наличие максимума  $\varepsilon''$  при некоторой радиочастоте отмечено в мерзлотоведении [273]. Для мёрзлых глинистых грунтов отмечается дисперсионный переход  $\varepsilon'$  к динамическим (высокочастотным) значениям на частотах  $\geq 1 \div 10$  МГц, а максимум  $\varepsilon''$  выражен достаточно четко [274].

Моделирование на основе применения неразделяющегося решения уравнения Клейна – Гордона для электрической и магнитной составляющих нестационарного электромагнитного поля в диспергирующей среде (А. Б. Шварцбург [435]) показало, что:

а) промежутки времени между точками пересечения нуля огибающими гармоник как электрического, так и магнитного поля неравны, т.е. составляющие электромагнитного поля неперiodичны;

б) значения экстремумов электрической и магнитной составляющих поля меняются во времени, а их отношение непостоянно;

в) в представлении электрических ( $e$ ) и магнитных ( $h$ ) составляющих возникают гармоники<sup>3</sup> на конкретной частоте;

г) темпы дисперсионной деформации гармоник электрической и магнитной составляющих поля по глубине существенно различны.

Результаты исследований ЗАО НПФ «Геодизонд» говорят о наличии такого рода особенностей для широкого класса природно-технических объектов. По результатам ЭМИ СШП измерений характеристические частоты материалов для ряда природно-технических объектов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Название объекта, тип грунта	Частота по каналу м <sub>1</sub> -диапазона, МГц	Частота по каналу дм-диапазона, МГц	Средняя частота, МГц
Бурейская ГЭС, бетон	40.5	42.1	41.3±1
Малый академич. театр, грунтобетон (Москва)	73.5	81	77.3±3.5
Пл. Сенная (СПб), глина	38.4	36	37.2±1
Пл. Сенная (СПб), замороженный грунт	80.5	84.8	82.6±2

Как видим, разные среды откликаются на различных частотах на мощный наносекундный импульс. Эти частоты зависят от типа сред и материалов природно-технических объектов, а также от их состояния в текущий момент времени, поэтому их можно назвать характеристическими.

Таким образом, данные ЭМИ СШП зондирования выявляют наличие характеристических частот для широких классов природных сред и материалов

$$^3 e = \frac{1}{4} \cdot |J_0 - 2 \cdot \psi_2 + \psi_4|, h = \frac{1}{4} \cdot |J_0 - \psi_4|, \psi_n = \left( \frac{\tau - \eta}{\tau + \eta} \right)^{n/2} \cdot J_n(\sqrt{\tau^2 - \eta^2}), \eta = \frac{z \cdot \Omega}{c}, \tau = \Omega \cdot t.$$

Здесь  $J_n$  – функция Бесселя порядка  $n$ ;  $c$  – скорость света;  $z$  – глубина;  $\Omega$  – характеристическая (плазменная по А. Б. Шварцбургу) частота.

технических объектов (бетон, набрызг бетона и т.п.). Также и природно-технические объекты, включающие бетоны, грунты, почвы, при воздействии на них ЭМИ СШП сигналом формируют собственные характеристические частоты.

## 2.2 Состав комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования

Комплекс подповерхностного ЭМИ СШП зондирования включает:

1) набор излучающих генераторов наносекундных импульсов, изготовленных по технологии ДДРВ и имеющих фронты импульсов 0.5 нс; 1нс; 3 нс при длительности ~ 10 нс; пиковую амплитуду импульса напряжения 1 кВ, 4.77 кВ, 6.3 кВ, 9.87 кВ (перечисленные характеристики генераторов измерены в полосе 0÷17.44 ГГц); пиковую амплитуду тока – 20÷120 А;

2) ИИС комплекса - приемно-регистрирующий блок для записи принимаемых сигналов ~20 мВ÷100 В в полевых условиях с помехозащищенностью не менее 136 дБ в полосе 3÷30 МГц (относительно поля 1 мкВ/м, нормы 27-93);

3) метрологически аттестованные в полосе частот 0.3 ÷ 1500 МГц приемные и передающая антенны. Для последней согласование со средой по  $E$ -составляющей поля реализовано углом падения излучаемой волны ~ (68° ÷ 74°) относительно вертикали для волнового сопротивления среды 91.4÷93.4 Ом.

Введение КДП среды  $\varepsilon^*(\omega)$  предполагает по определению экспоненциальное затухание сигнала и комплексность волнового числа:

$$k = \omega \cdot \sqrt{\mu_a \cdot \varepsilon^*(\omega)} = \beta - j \cdot \alpha,$$

где  $\beta = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \varepsilon_a}{2} \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1)}$  – коэффициент фазы;

$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu_a \cdot \varepsilon_a}{2} \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}$  – коэффициент затухания (поглощения);  $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ .

Легко показать [291], что модуль и аргумент волнового сопротивления среды связаны с  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$Z_{\text{среды}} = \frac{\omega \cdot \mu_a}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}, \psi_{\text{среды}} = \arctg \frac{\alpha}{\beta}.$$

$$Z_{\text{среды}} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon} \cdot (1 + \text{tg}^2 \delta)^{1/4}}, \dim[Z_{\text{среды}}] = \text{Ом.}$$

Учитывая, что  $\text{tg}^2 \delta = \frac{\text{Sin}^2 \delta}{\text{Cos}^2 \delta}$  и  $\text{Cos}^2 \delta + \text{Sin}^2 \delta = 1$ , получим

$$Z_{\text{среды}} = \frac{377 \cdot \sqrt{\text{Cos} \delta}}{\sqrt{\varepsilon}} = 377 \cdot \sqrt{\frac{\text{Cos} \delta}{\varepsilon}}, \text{Ом.}$$



Рис. 2.1 – Общий вид комплекса ЭМИ СШП зондирования с четырьмя типами приёмных антенн: м-, м<sub>1</sub>-, дм-, дм<sub>1</sub>- диапазонов (справа показана генераторная антенна м<sub>1</sub>- диапазона). Приёмник – цифровой осциллограф TDS3054

Таким образом, можно говорить об измеряемости этой величины и по результатам антенных измерений оценить качество согласования антенны с подстилающей средой. Например, последовательное соединение двух импедансов (антенна и среда)  $Z_a$  и  $Z_{\text{среды}}$  оценивается:

- измеряемым КСВН

$$K_U = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|},$$

- определяемым коэффициентом отражения ( $|\Gamma|$ , или элементом  $S_{11}$  матрицы  $\|s\|$  [275])

$$|\Gamma| = \frac{Z_{\text{среды}} - Z_a}{Z_{\text{среды}} + Z_a}.$$

Эти определения измеряемых величин позволили реализовать следующее: лабораторная установка для измерения КСВН создана на базе измерителя комплексных коэффициентов передачи «ОБЗОР - 103» и предназначена для проверки работоспособности собственно антенн и антенно – фидерных устройств (АФУ), включающих антенну, согласующий тройник и приёмный РК – кабель, в диапазоне частот 0.3 ÷ 1500 МГц на сухом бетоне. Данные измерения входят в состав предварительных при метрологической аттестации комплекса.

На рис. 2.2 представлена лабораторная установка для измерения КСВН ( $K_U$ ) антенны м- диапазона, включающая собственно антенну м- диапазона, подключенный к ней направленный ответвитель с измерительной секцией PLANAR (рис. 2.2а), нагруженной на измеритель «ОБЗОР-103», который, в свою очередь, подключён к компьютеру. Ниже (рядом с компьютером) стоят антенны дм- и дм<sub>1</sub>- диапазонов и стабилизатор напряжения. Интерфейс прибора как результат измерений  $K_U$  антенны м-диапазона показан на рис. 2.3.

На рис. 2.4, 2.5 представлены результаты измерений отражённых сигналов, выполненных на бетонной плотине Бурейской ГЭС. Эти сигналы измерены в дм- и м<sub>1</sub>- диапазонах длин волн и рассматриваются как эталонный класс сигналов, характерных для бетонных поверхностей (высота бетонной плотины ~ 70 м).

Экспериментально установлено [276], что структура отражённых сигналов ЭМИ СШП зондирования существенно отличается от откликов на традиционные модели модулированных квазимонохроматических сигналов:

- распределение поля (напряжённость) излученного видеоимпульса в раскрыве передающей антенны представляет собой вторую производную от формы импульса [418];
- передний и задний фронты излучаемого видеоимпульса как симметричны, так и несимметричны (рис. 2.10, 2.10а);
- расстояния между точками пересечения нуля принимаемого сигнала неравны (рис. 2.4, 2.5).

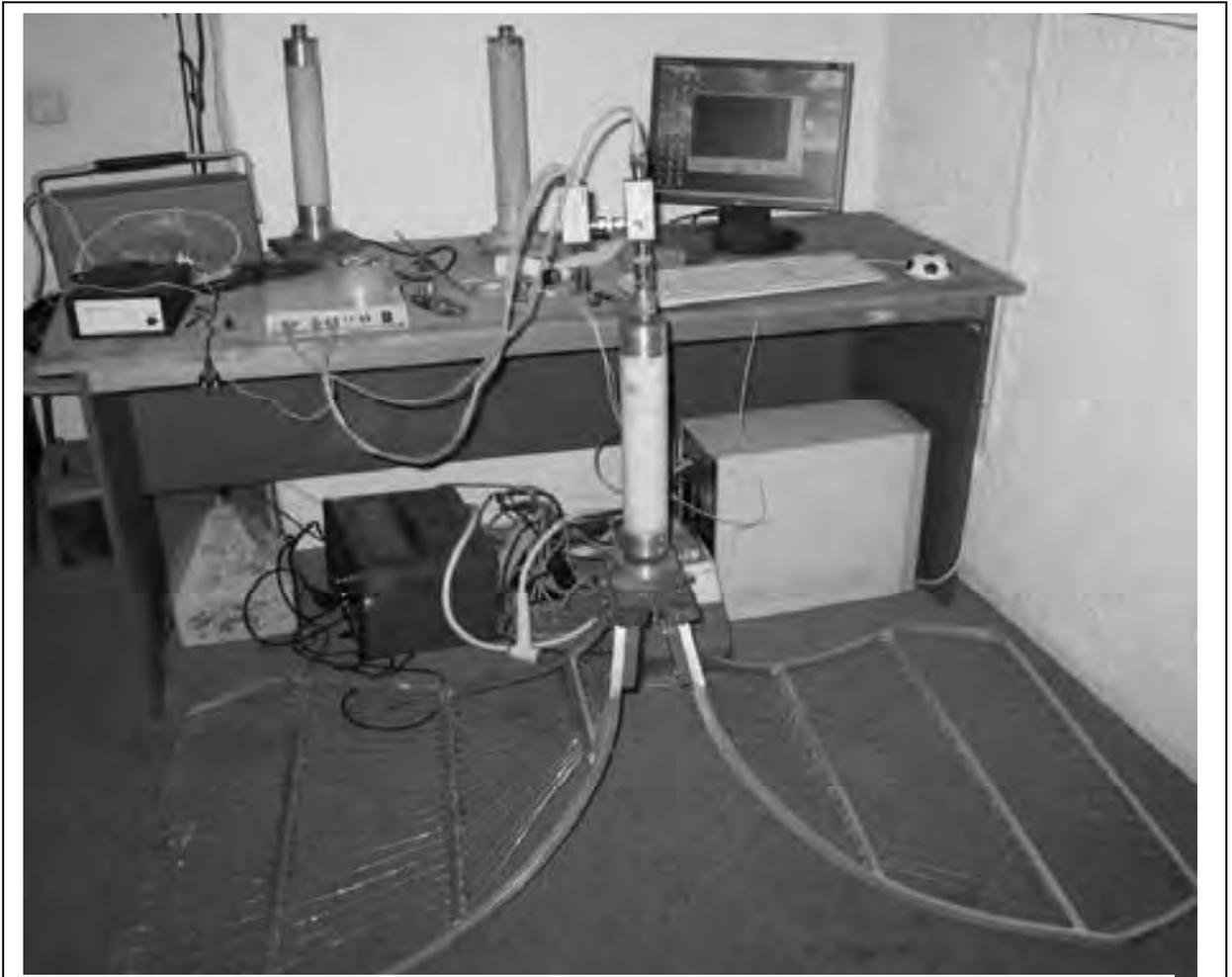


Рис. 2.2 – Вид лабораторной установки для измерения КСВН антенны м-диапазона на сухом бетоне, на рис. 2.1 – первая слева

В результате измерения в одной точке зондирования дневной поверхности можно построить инженерно-геологическую колонку конкретного пункта наблюдения. Для получения протяженного разреза необходимо произвести несколько измерений с определенным расстоянием между точками на линии данного разреза.



Рис. 2.2а – Измерительная секция PLANAR

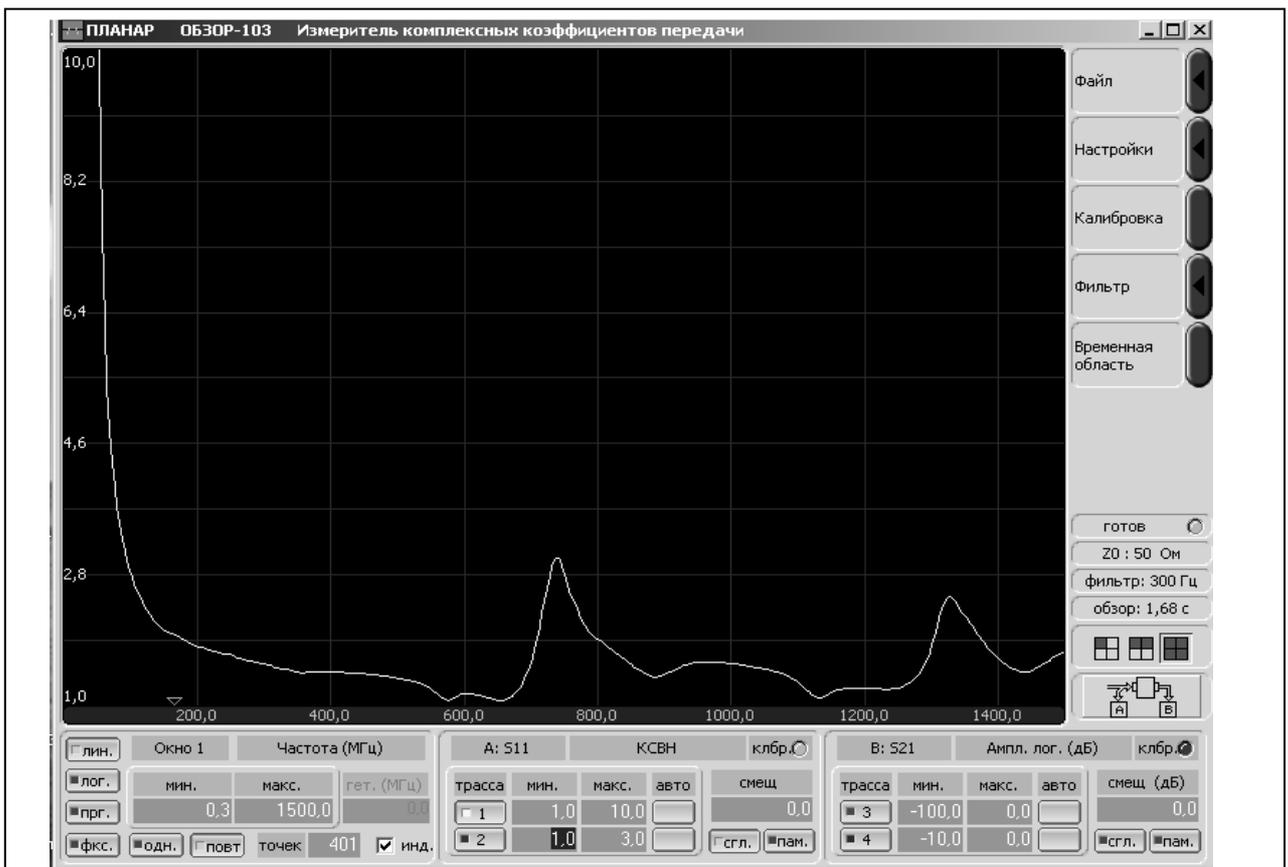
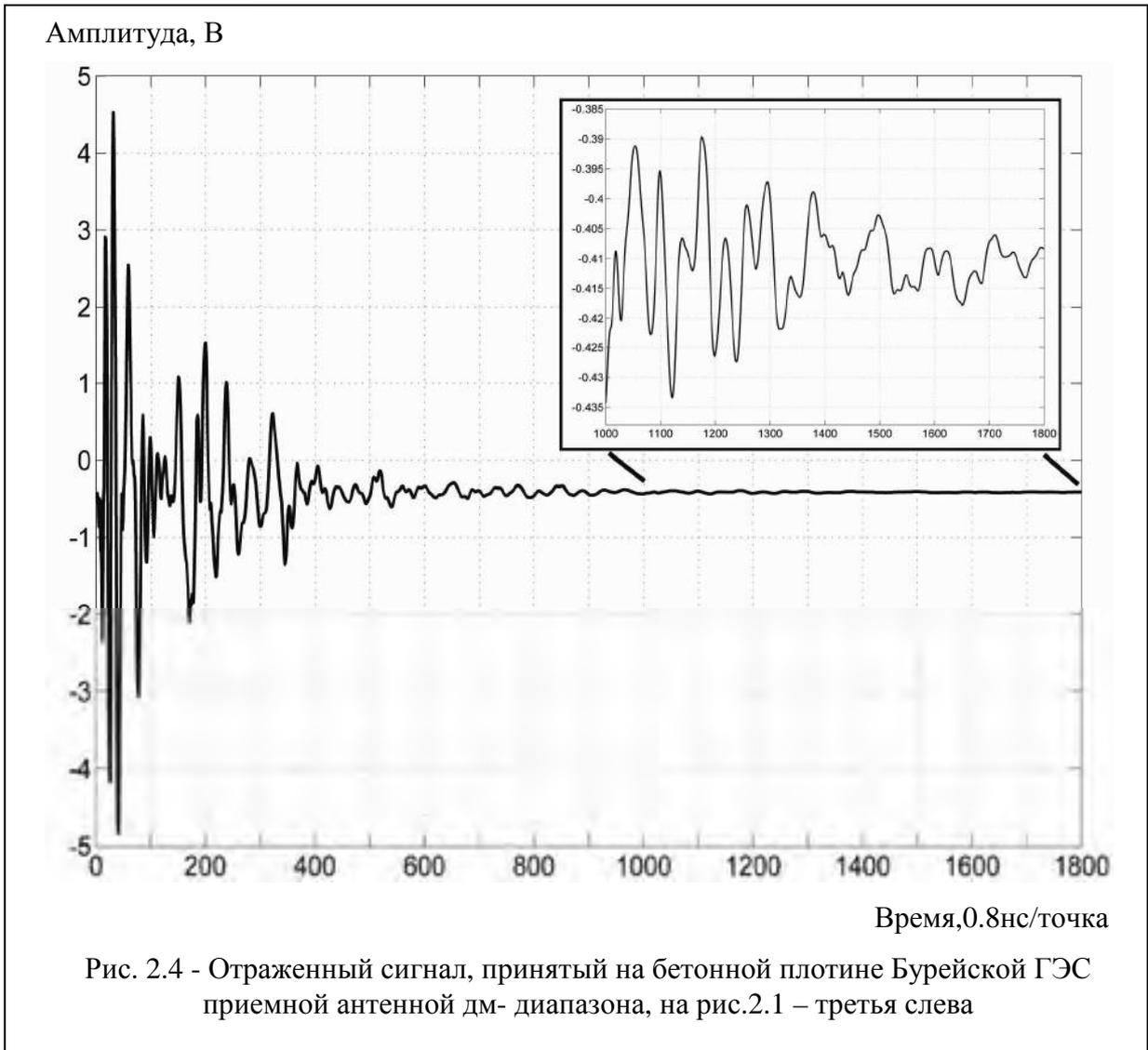
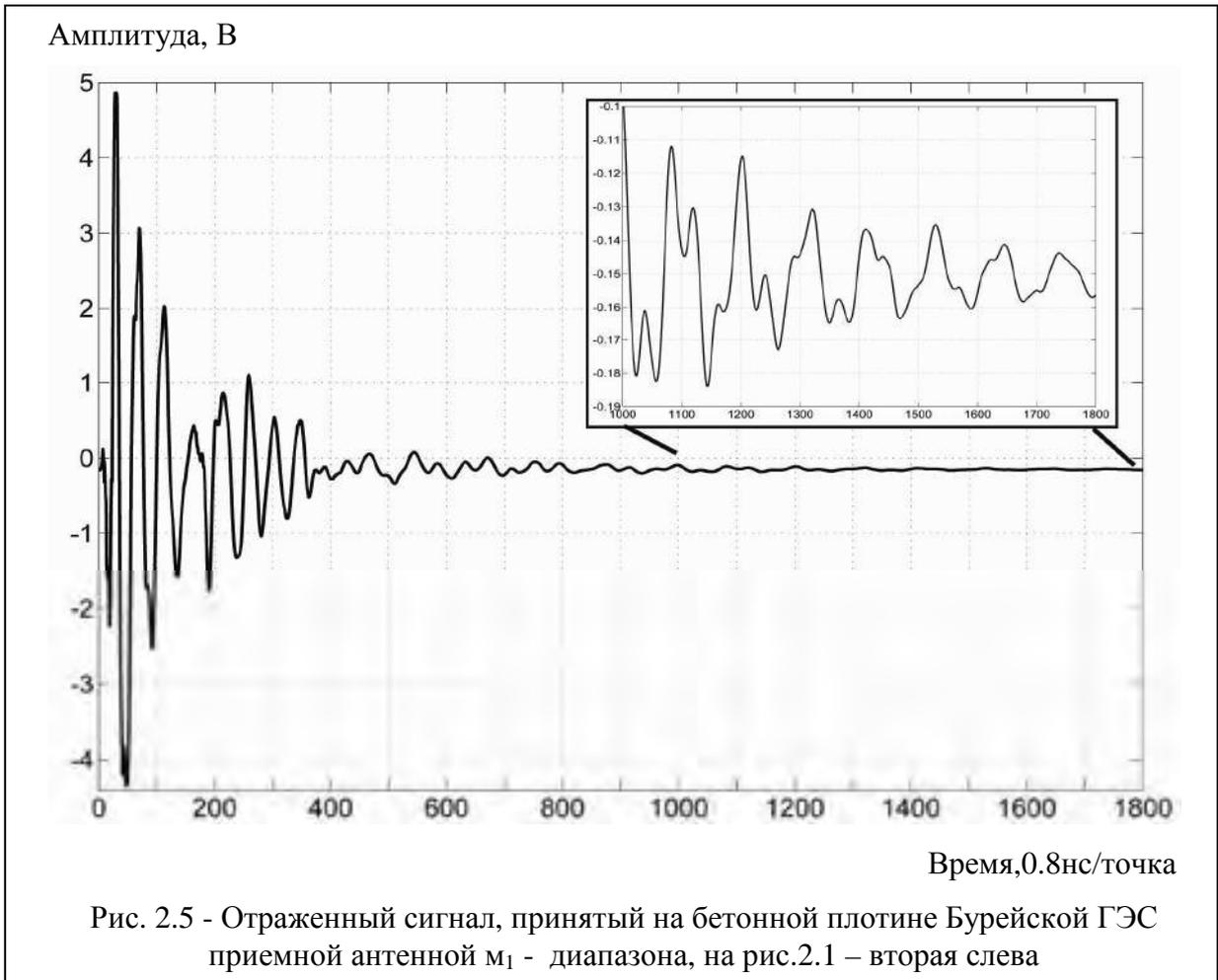


Рис. 2.3 – Результат измерения КСВН антенны м- диапазона на сухом бетоне в диапазоне частот 0.3-1500 МГц



Для комплекса ЭМИ СШП зондирования высокая точность измерений отраженного сигнала определяется следующими факторами: стабильностью параметров генераторов [277]; многоканальностью ИИС приема отраженных сигналов большой амплитуды [278, 281]; согласованием приёмных и передающей антенн с подстилающей средой по волновому сопротивлению [279, 419, 420]; совершенствованием методов обработки измерений [280, 421, 422]; учетом данных метрологического обеспечения измерительных возможностей комплекса [144].



### 2.2.1 Генератор излучаемых импульсов

Физические принципы. Для генерирования мощных наносекундных импульсов имеются два подхода [285], различающихся по способу накопления энергии – накопление в емкостных накопителях (малоиндуктивные конденсаторы и формирующие линии) с последующей передачей энергии в нагрузку через замыкающий ключ и накопление в магнитном поле индуктивного контура с током [293]. Второй подход представляет очень большой интерес для мощной импульсной техники. Однако быстрый обрыв больших токов является значительно более сложным, чем быстрое замыкание.

Принцип действия любого ключа основан либо на заполнении рабочего промежутка, к которому приложено напряжение проводящей плазмой

(замыкающий ключ), либо наоборот - на удалении плазмы из рабочего промежутка (размыкающий ключ).

Несимметричность распределения плазмы при протекании прямого тока и большая скорость процесса восстановления у границы, в сторону которой вытягиваются внешним полем дырки, связаны с тем, что в кремнии подвижность дырок втрое меньше подвижности электронов.

В основу работы размыкающих ключей положен эффект быстрого восстановления обратного напряжения на p-n переходе<sup>4</sup>.

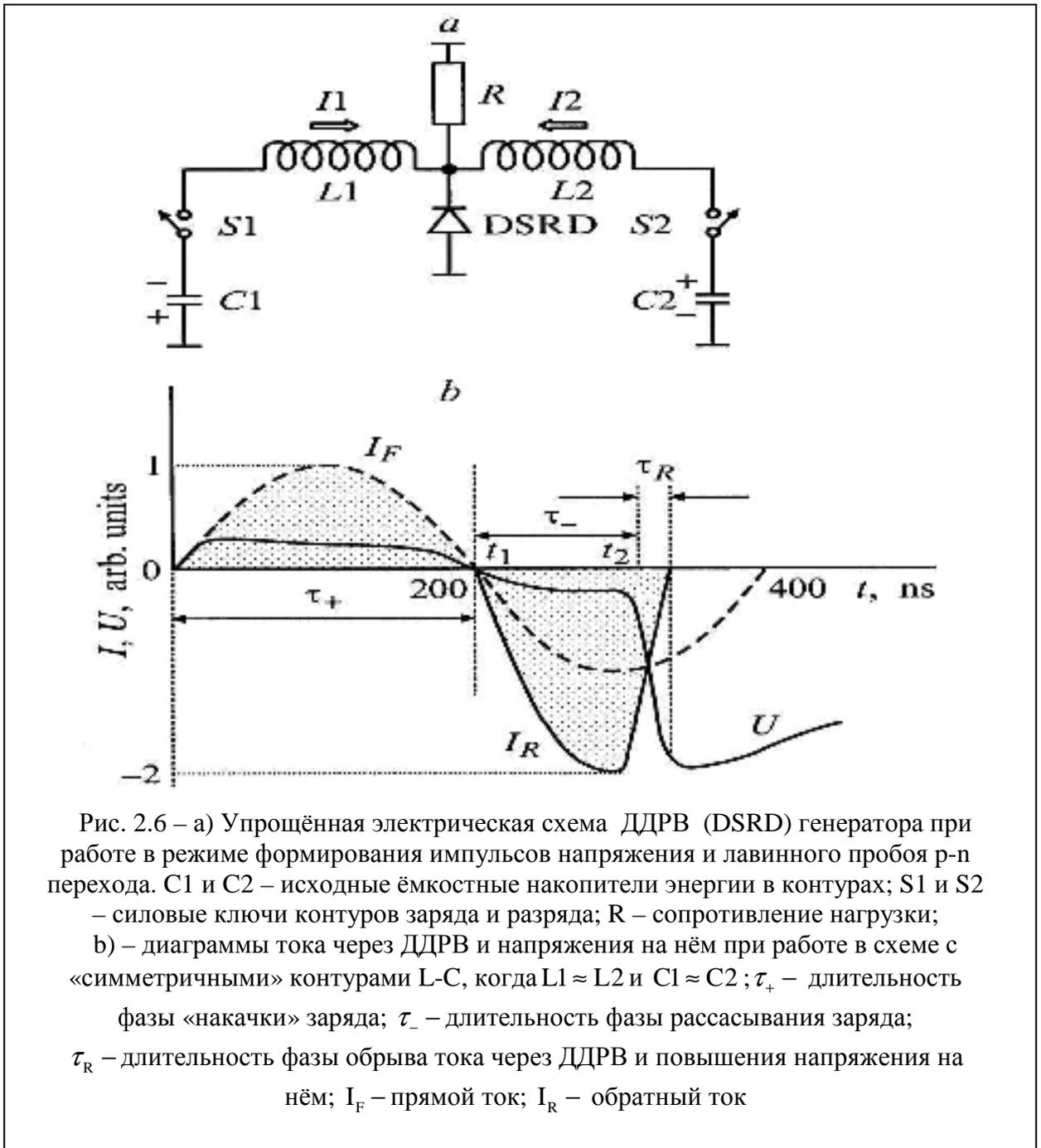
Прибор, получивший название дрейфовый диод с резким восстановлением (Drift Step Recovery Diode), был предложен в 1979 г. после обнаружения явления обратимого пробоя полупроводников с образованием задержанной ударно – ионизационной волны. Упрощённая электрическая схема ДДРВ (DSRD) генератора при работе в режиме формирования импульсов напряжения и лавинного пробоя p-n перехода показана на рис. 2.6 [277, 285].

Амплитуда импульса обратного тока единичного элемента ДДРВ может быть очень большой, поскольку простота технологии позволяет изготавливать приборы на кремниевых пластинах любых диаметров (до 125 мм). Однако эксперименты показывают, что на кремниевых пластинах диаметром более 25 мм длительность процесса обрыва тока возрастает с увеличением диаметра. Рабочая площадка прибора на пластине диаметром 25 мм равна  $\sim 4 \text{ см}^2$ , т.е. при  $I_R=200 \text{ Асм}^{-2}$  амплитуда импульса тока составляет 800 А, импульсная мощность 1.2 Мвт при рабочем напряжении 1.5 кВ.

---

<sup>4</sup> Суть эффекта. Если через p-n диод протекает прямой ток, то в низколегированной n-базе, расположенной между высоколегированными p<sup>+</sup> - и p<sup>+</sup> - областями, накапливается нейтральная электронно-дырочная плазма. Если направление тока сменить на обратный, то из n-области будет удаляться электронно-дырочная плазма, после чего напряжение на p-n переходе может подняться до нескольких киловольт. Таким образом, при прохождении прямого тока диод всегда имеет высокую проводимость, а при прохождении обратного тока проводимость диода вначале большая, и через диод может протекать большой обратный ток, а затем проводимость уменьшается, и ток через диод обрывается.

Установлено, что для диодов, имеющих напряжение лавинного пробоя от сотен вольт до нескольких киловольт, возможно реализовать режим, когда на этапе прохождения обратного тока через диод проводимость диода может быть очень большой, и он может пропускать токи до 1-2 кА/см<sup>2</sup>, при этом напряжение на диоде не должно превышать нескольких десятков вольт, а затем проводимость диода резко падает, ток обрывается, и напряжение может достигнуть нескольких киловольт. Используя этот эффект, разработана серия размыкающих ключей на разные токи и напряжения.



Физико – математическое моделирование таких процессов заключается в совместном решении уравнения Кирхгофа для электрической схемы с DSRD, уравнений непрерывности для электронов и дырок в диодной структуре и уравнения Пуассона.

Технические условия (ТУ). Принципиальным моментом является формирование ТУ на изготовление ДДРВ генератора. Оно содержит определение:

- выходной амплитуды импульса;
- уровня асимметрии импульса (фронт, длительность);

- тактовой частоты следования импульсов;
- стабильности параметров импульса при изменении нагрузки генератора;
- зависимости параметров импульса от девиации питания;
- веса, габаритов, «парусности» в конструкции с антенной.

Особенностью ТУ на ДДРВ генераторы является формулирование схем и методов измерений и испытаний параметров. Все указанные параметры определяют конструктивные особенности комплекса (передающую антенну, состав ИИС, энергетическую установку) и являются либо взаимоисключающими, либо трудноисполнимыми.

Так, высокая выходная амплитуда импульса (~10 кВ) при тактовой частоте следования импульсов ~10 кГц требует применения мощной энергетической установки типа АБ - 4000 (агрегат бензиновый, мощностью 4 кВт, вес 24 кг), что весьма негативно сказывается на мобильности комплекса.

Амплитуда и уровень асимметрии импульса, обеспечивающий полосу излучаемых частот, требуют измерений фронта и длительности импульса с применением соответствующих по полосе аттенюатора и осциллографа. Формирование подобной измерительной схемы само по себе является серьёзной метрологической задачей, которая сегодня не решена в органах метрологического обеспечения.

Требование по оценке испытания стабильности параметров импульса при изменении нагрузки генератора привело к созданию испытательного стенда, на котором оценивается качество излучаемого сигнала при полупогружении передающей антенны в воду.

Формулирование требований по «парусности» в конструкции с антенной привело к переносу выходного ВЧ – разъёма с ребра конструкции генератора на её середину, что потребовало изменения всей СВЧ схемы и конструкции генератора.

Результатом выполнения требований подобного технического задания является линейка генераторов с параметрами:

- амплитуда импульса  $\sim 1.64 \div 9.87$  кВ;
- тактовая частота следования импульсов  $\sim 8 \div 10$  кГц;
- независимость параметров импульса от девиации питания.

Линейка генераторов представлена на рис 2.7. Первый слева (1997 г.) – питание  $\sim 220$  В; второй слева - питание = 12 В; далее – современные ДДРВ генераторы (амплитуда импульса  $\sim 1.64 \div 9.87$  кВ), в которых реализована задача снижения «парусности» и осуществлён переход на питание = 12 В.



Рис. 2.7 – Линейка ДДРВ генераторов

На рис. 2.10 представлен вид импульса (амплитуда  $\sim 1.64$  кВ) ДДРВ генератора на экране осциллографа TRM8105<sup>5</sup> ( $\Delta f \sim 16$  ГГц, рис. 2.8) с использованием аттенюатора (рис. 2.9) BARTH Electronics. INC. ( $\Delta f = 10^{-4} \div 17.44$  ГГц;  $\text{lim дБ} = 0 \div 100$  дБ;  $\delta A \leq 0.64$  дБ в  $\Delta f = 10^{-4} \div 2.15$  ГГц).

<sup>5</sup> Технические характеристики цифрового стробоскопического осциллографа TMR8105

*Характеристики амплитудного канала.* Число каналов – 2; полоса частот по уровню (-3дБ)  $0 \div 20$  ГГц; входное сопротивление - 50 Ом; уровень собственных шумов -  $< 2$  мВ; максимальная амплитуда входных сигналов - 1 В; диапазон чувствительности - от 5 до 200 мВ/дел; АЦП с разрешением - 12 бит.

*Характеристики временного канала.* Максимальное число отсчетов во временном окне – 4096; диапазон установки временного окна - от 0.01 до 100 нс/дел.; кратковременная нестабильность развертки -  $< 1,5$  пс  $\pm 0.001$  % от временного положения; диапазон изменения задержки в режиме внутренней синхронизации - от 0.01 до 5100 нс; начальная задержка в режиме внутренней синхронизации - 100 нс; диапазон изменения задержки в режиме внешней синхронизации - от 0.01 до 1000 нс; начальная задержка в режиме внешней синхронизации - 100 нс  $\pm 50$  % от окна; дискретность установки «грубой» задержки - 20 нс; дискретность установки «точной» задержки - 100 пс.

На рис. 2.10а представлен вид импульса с амплитудой  $\sim 9.87$  кВ.  
ДДРВ – генератор со снятой крышкой показан на рис. 2.7а.

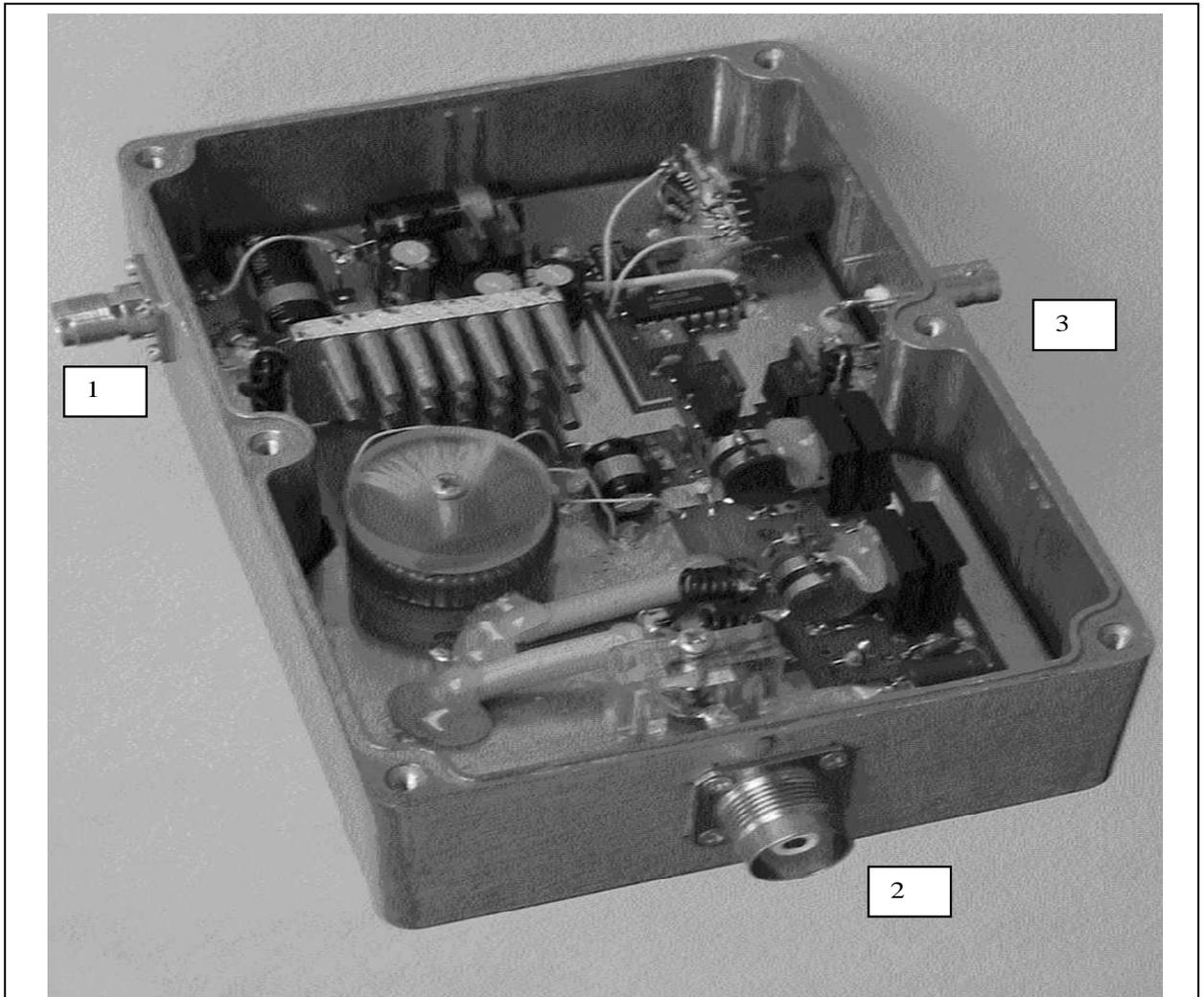


Рис. 2.7а – Вид ДДРВ генератора со снятой крышкой (1- разъем питания, 80 мА, 12 В; 2 – разъем выходного сигнала; 3 – разъем синхронизации)



Рис. 2.8 – Вид цифрового стробоскопического осциллографа TMR8105



Рис. 2.9 – Вид аттенюатора BARTH ( $\Delta f \sim 26$  ГГц)

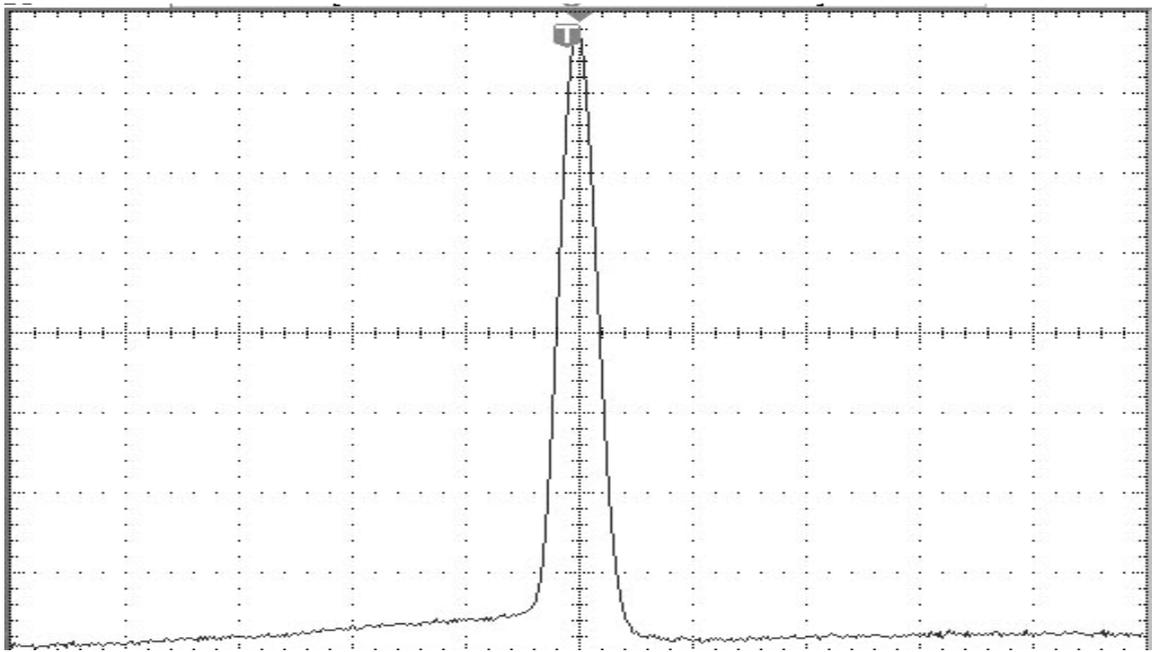
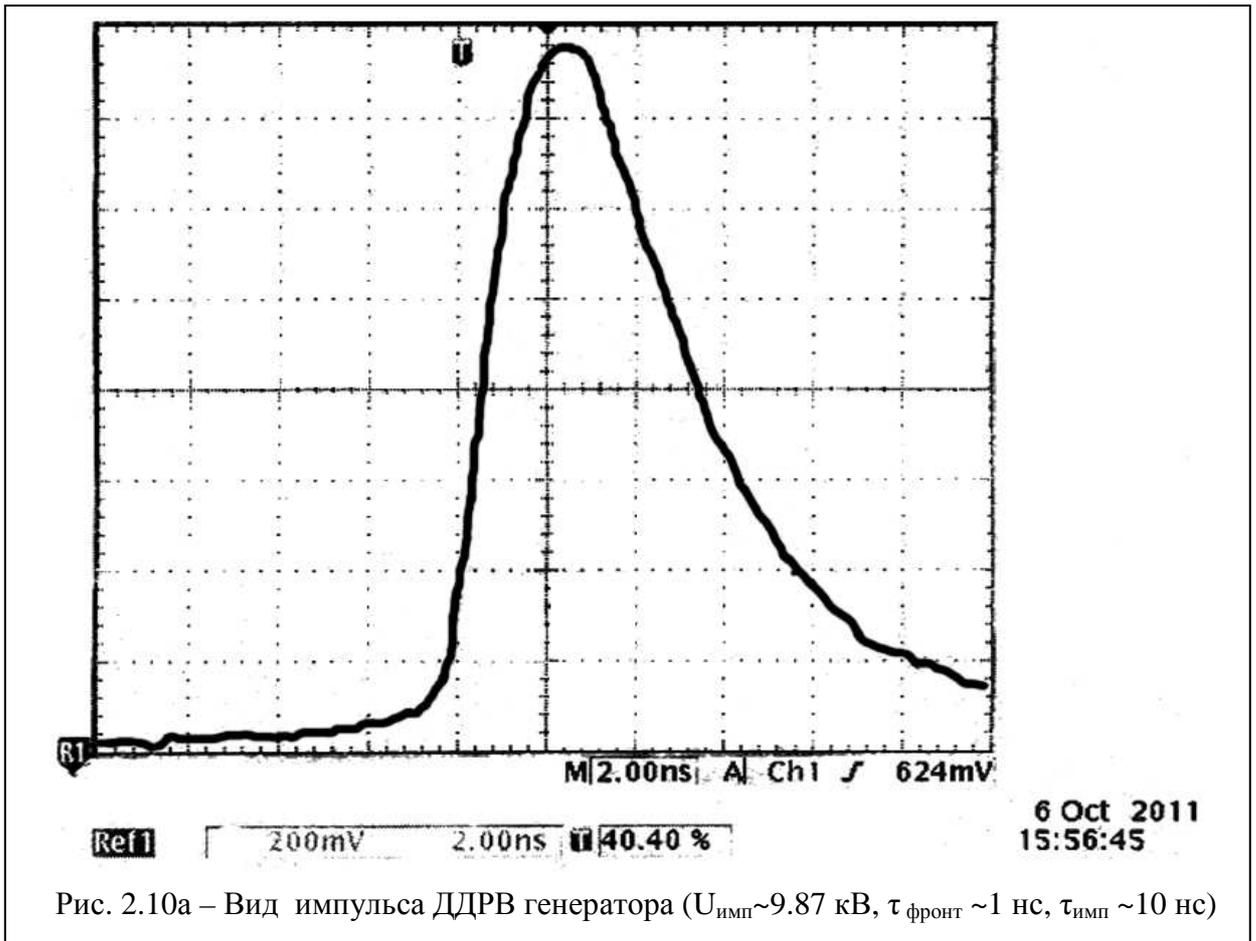


Рис. 2.10 – Вид импульса ДДРВ генератора ( $U_{\text{имп}} \sim 1.64$  кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 3.5$  нс)

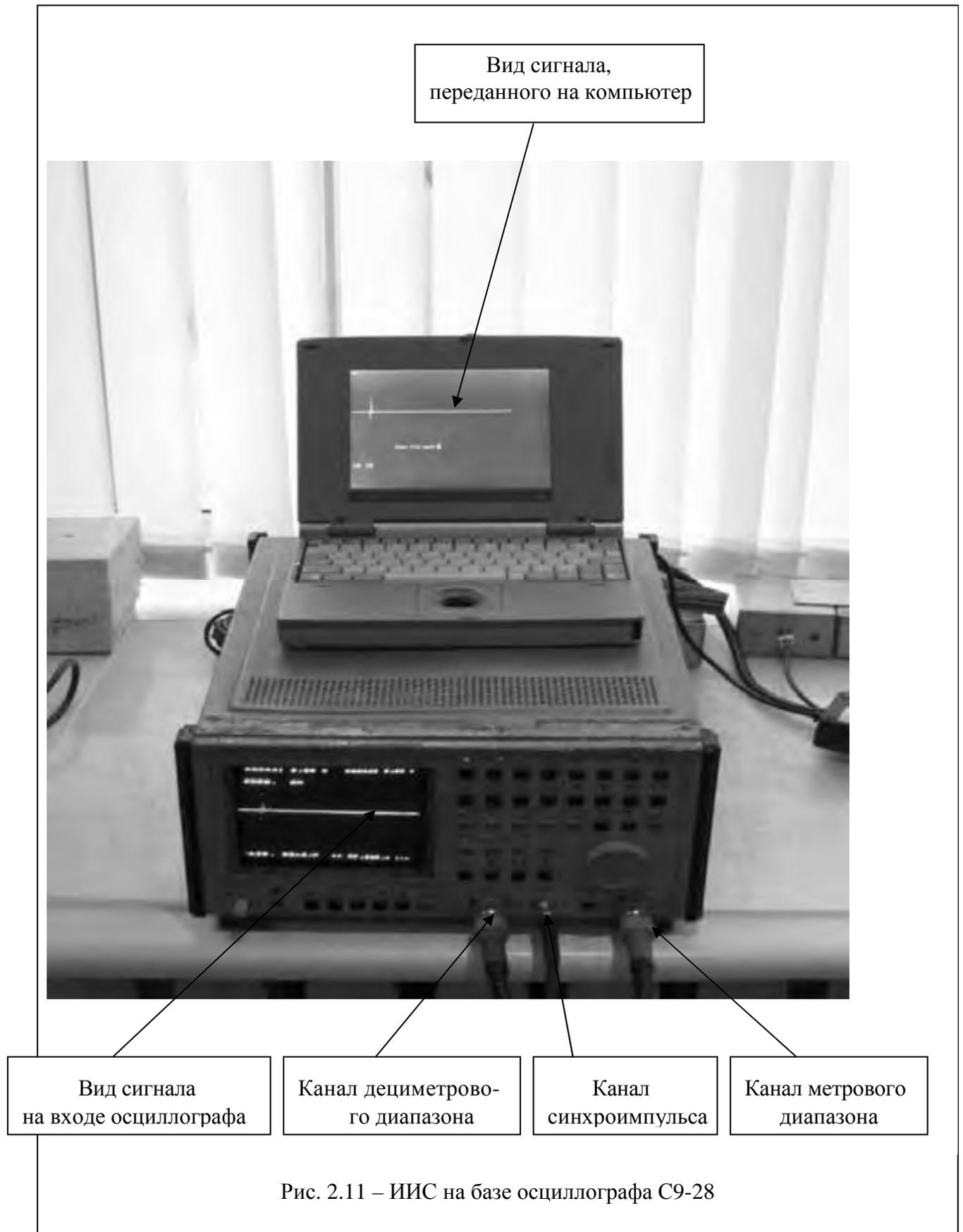


## 2.2.2 ИИС комплекса

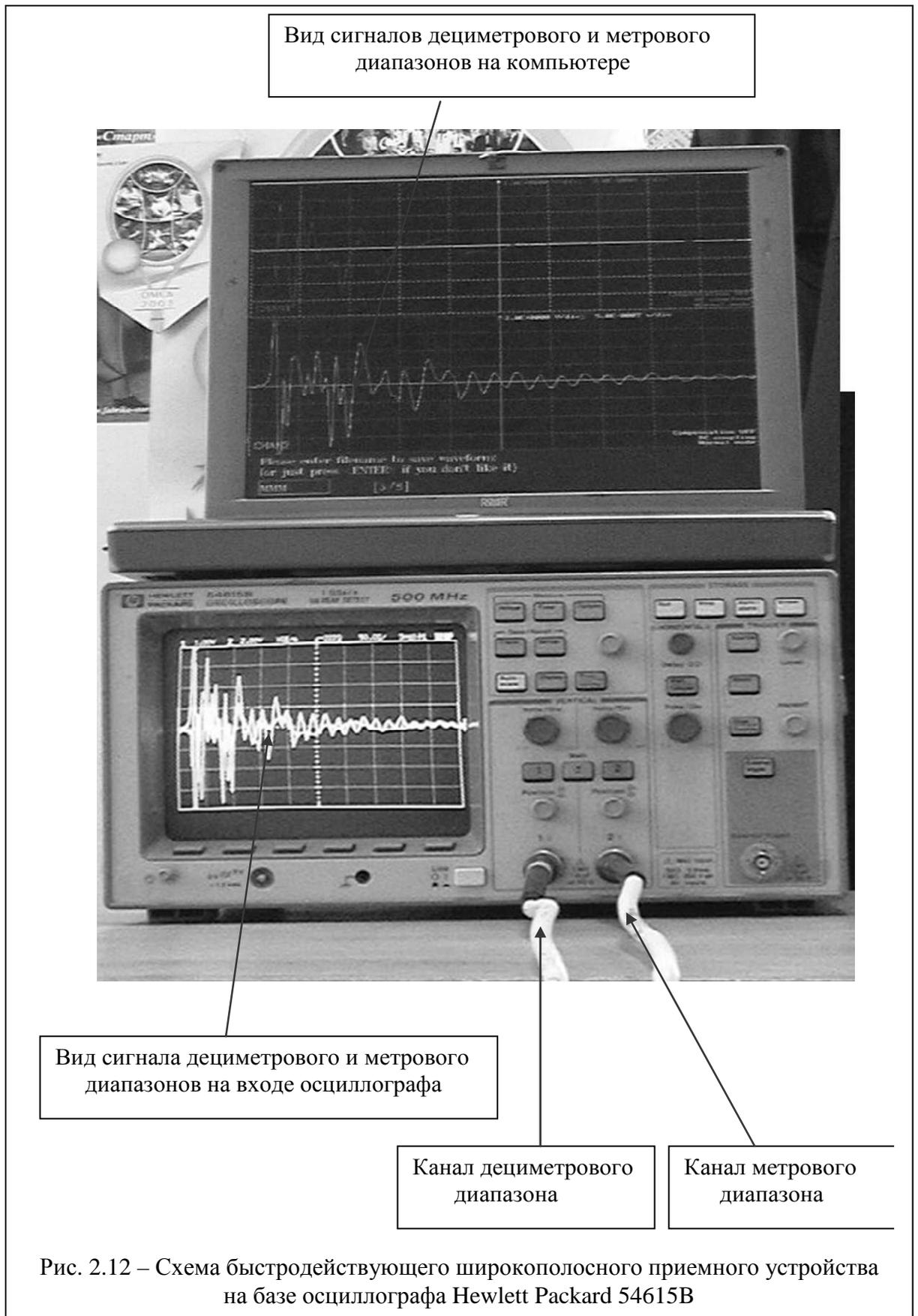
Автор отчетливо представляет процесс создания любой из указанных ниже ИИС в виде быстродействующего широкополосного приемника. Проект создания любой из указанных ИИС реализован в испытанных образцах [281]. Основные элементы таких ИИС представлены на рис. 2.11÷2.14.

Результаты, полученные в ходе создания четырёх ИИС и их испытаний, показали следующее.

ИИС, построенная на базе цифрового осциллографа С9-28 (рис. 2.11), является наименее затратной по стоимости аппаратуры. Недостатки: значительный вес, необходимость источника питания напряжением 220В, необходимость запуска сигнала от внешней синхронизации; значительные габариты.

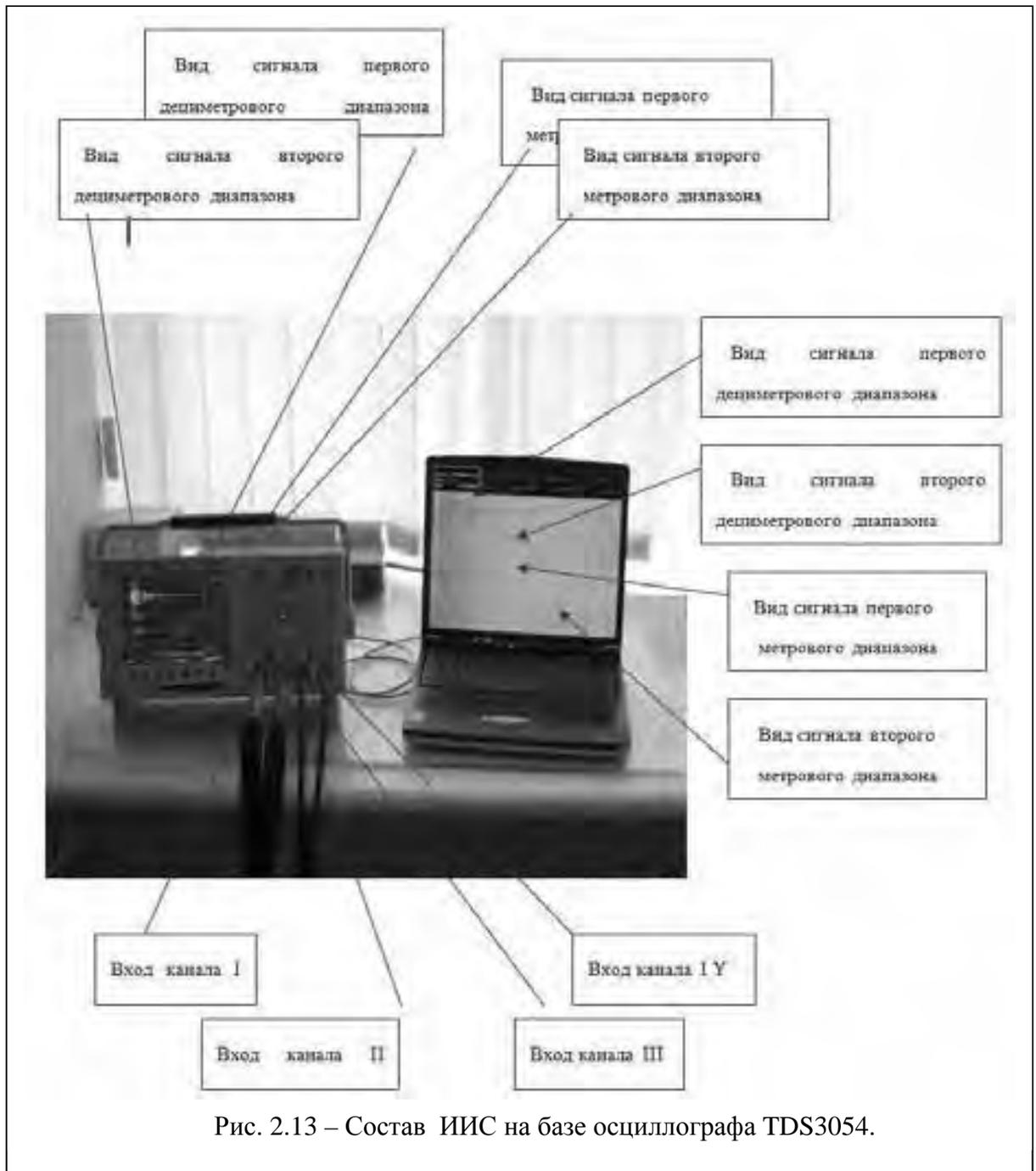


ИИС, построенная на базе осциллографа Hewlett Packard 54615B (рис. 2.12), является наиболее высокоточной.



Недостатки: необходимость источника питания напряжением 220В, необходимость запуска сигнала от внешней синхронизации.

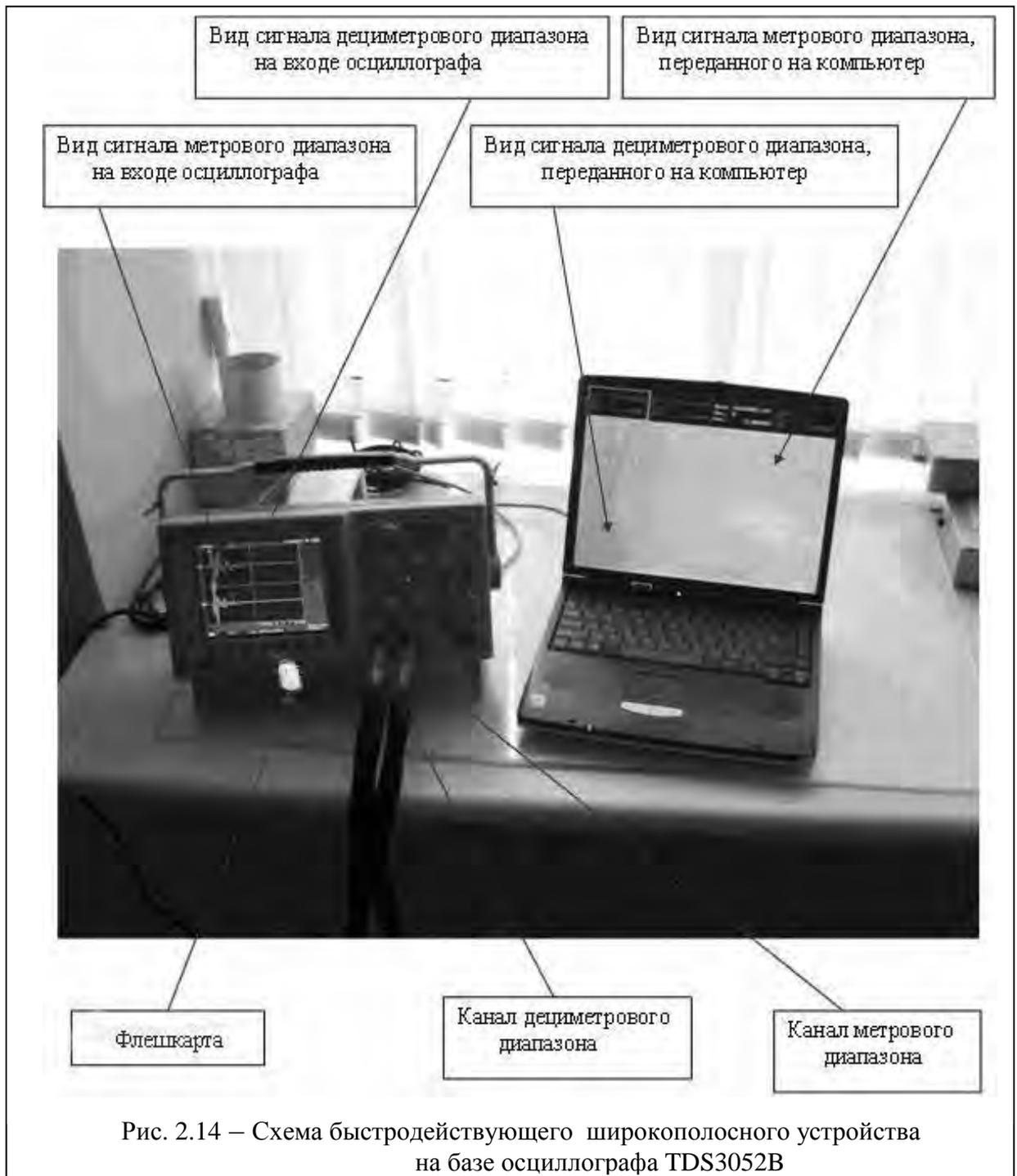
Возможно создание ИИС на базе 4 - канального осциллографа Tektronix TDS3054 (рис. 2.13), является наиболее информативной из представленных систем. Синхронизация возможна по любому из 4 каналов.



Недостатки: не обладает записью на флешкарту как в 2-канальном осциллографе Tektronix TSD3052B.

ИИС, построенная на базе 2 - канального осциллографа Tektronix TDS3052B (рис. 2.14), является наиболее быстродействующей из всех указанных систем.

Имеет внутренний аккумулятор, использует как внешнюю синхронизацию, так и синхронизацию по одному из каналов.



Основным достоинством 2 - канального осциллографа Tektronix TDS3052B является возможность перехода от байонетных входных ВЧ разъемов к более широкополосным разъемам типа CP- 75 (рис. 2.14а). На рис. 2.14в приведено сравнение АЧХ осциллографов с «байонетом» и CP-75.

На рис. 2.14а приведен внешний вид отражённого сигнала, принятого приёмным АФУ дм-диапазона (рис.2.1, третья слева) на разъём CP-75 (слева), используемый в качестве входного в Tektronix TDS3052B, и стандартный вход - байонет (справа).



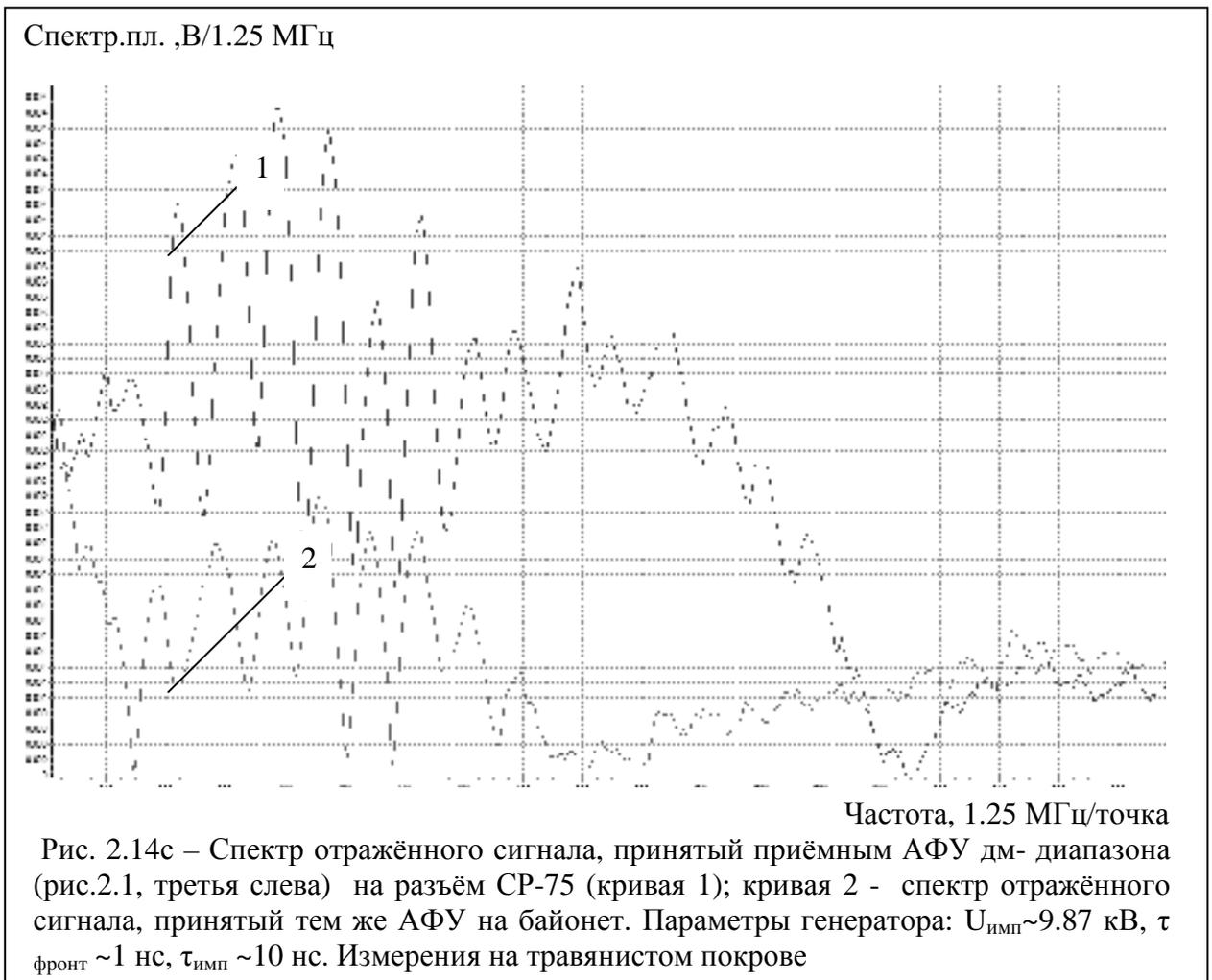
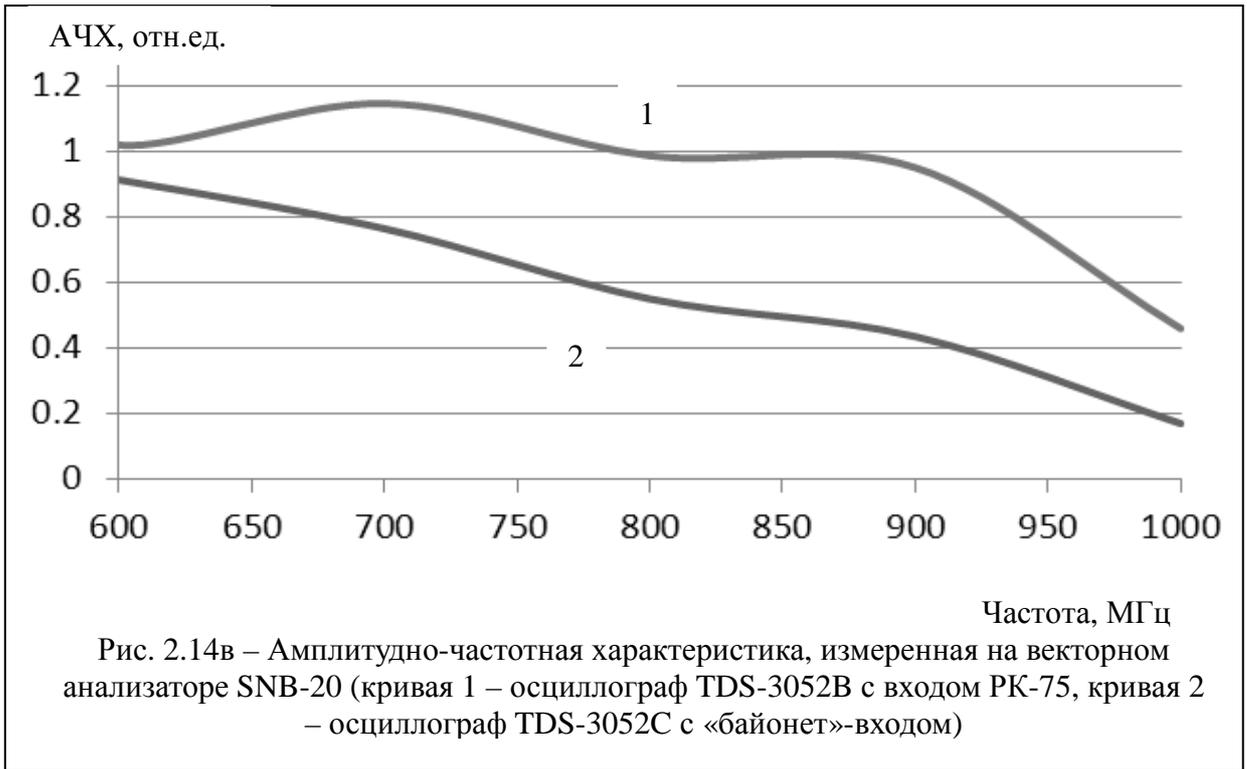
Развёртка, 0.8 нс/точка

Рис. 2.14а – Внешний вид отражённого сигнала, принятого приёмным АФУ дм-диапазона (рис.2.1, третья слева) на разъём CP-75 (слева); байонет - (справа).

Параметры генератора:  $U_{\text{имп}} \sim 9.87 \text{ кВ}$ ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1 \text{ нс}$ ,  $\tau_{\text{имп}} \sim 10 \text{ нс}$ . Измерения на травянистом покрове

В качестве приемно-регистрирующего блока выбрана ИИС на базе цифрового стробоскопического осциллографа TDS3052C<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающей среды от -10 до +30°C; атм. давл. до 61,3 кПа (460 мм рт. ст.); отн. влажность окружающего воздуха до 98 % при  $t=+30^\circ\text{C}$ . Сертифицирован Гос. комитетом стандартов РФ на соответствие всем приемлемым нормам EMC. **Входные характеристики:** связь на входе осуществляется по постоянному току (DC), переменному току (AC) или заземлению (GND); входное сопротивление (связь по DC): а)  $1 \text{ МОм} \pm 1 \%$  параллельно с ёмкостью  $13 \text{ пФ} \pm 2 \text{ пФ}$ , совместимость с TekProbe; б)  $50 \text{ Ом} \pm 1 \%$ ; VSWR (КСВН, возможная зависимость волны от сопротивления)  $\leq 1,5:1$  по DC до 500 МГц; максимальное напряжение на входе BNC при входном волновом сопротивлении 50 Ом (режим измерения) – 5 В, действующего с пиками  $\leq \pm 30 \text{ В}$ ; дифференциальная задержка 100 нс между каналами с одинаковой настройкой масштаба и связи с компьютером; число каналов – 2(4); АЦП с разрешением 9 бит, отдельные преобразователи для выборки по каждому каналу одновременно; масштаб (на BNC) – 1 МОм с 1 мВ/дел до 10 В/дел; тонкая настройка масштаба до разрешения  $\geq 1 \%$ ; полярность обычная и обратная (инверсия); диапазон положений  $\pm 5$  делений по амплитуде; аналоговая полоса пропускания 500 МГц при входном сопротивлении 50 Ом – задается как полная полоса пропускания, рабочая температура  $\leq 30^\circ\text{C}$ , со снижением на 1 % /°C свыше 30°C; время нарастания собственной импульсной характеристики – 0,7 нс; предел аналоговой полосы пропускания – 20 МГц, 150 МГц и 500 МГц (полная полоса пропускания); низкочастотный предел при связи по переменному току – 0,7 Гц для 1 МОм; разрешение по горизонтали: а) обычное – 10 000 точек; б) быстрый запуск – 500 точек; диапазон выборки от 1 нс/дел до 10 с/дел (1дел=50точек); вход для внешнего запуска 1 МОм параллельно с 17 пФ, совместимость TekProbe; режимы регистрации данных: а) получение выборки (обычное) – одна регистрация, одновременно все каналы; б) получение пиков – одна регистрация, одновременно все каналы; в) получение огибающей – N регистраций, одновременно все каналы.



О расширении полосы принимаемого сигнала можно судить по спектрам (Фурье - преобразованиям), представленным на рис. 2.14с. Очевидно (рис.2.13с), что первое приближение к нулю для байонета соответствует значению по частоте  $\sim 500 \cdot 1.25$  МГц, для СР-75  $\sim 610 \cdot 1.25$  МГц.

Таким образом, ИИС на базе осциллографа С9-28 формирует невысокую цену комплекса; ИИС на базе осциллографа Hewlett Packard 54615В характеризуется высокой точностью сигнала; ИИС на базе 2- канального осциллографа Tektronix TDS3052В обладает высокой скоростью считывания и записи сигнала; ИИС на базе 4 - канального осциллографа Tektronix TDS3054 обладает высокой информативностью.

Причина выбора TDS3052С:

- отказ от записи на магнитные носители из – за наводок на дискету или на кабель связи с компьютером;
- возможность записи на флешкарту;
- возможность замены входного разъёма на более широкополосный.

### **2.3 Принцип работы аппаратно – программного комплекса**

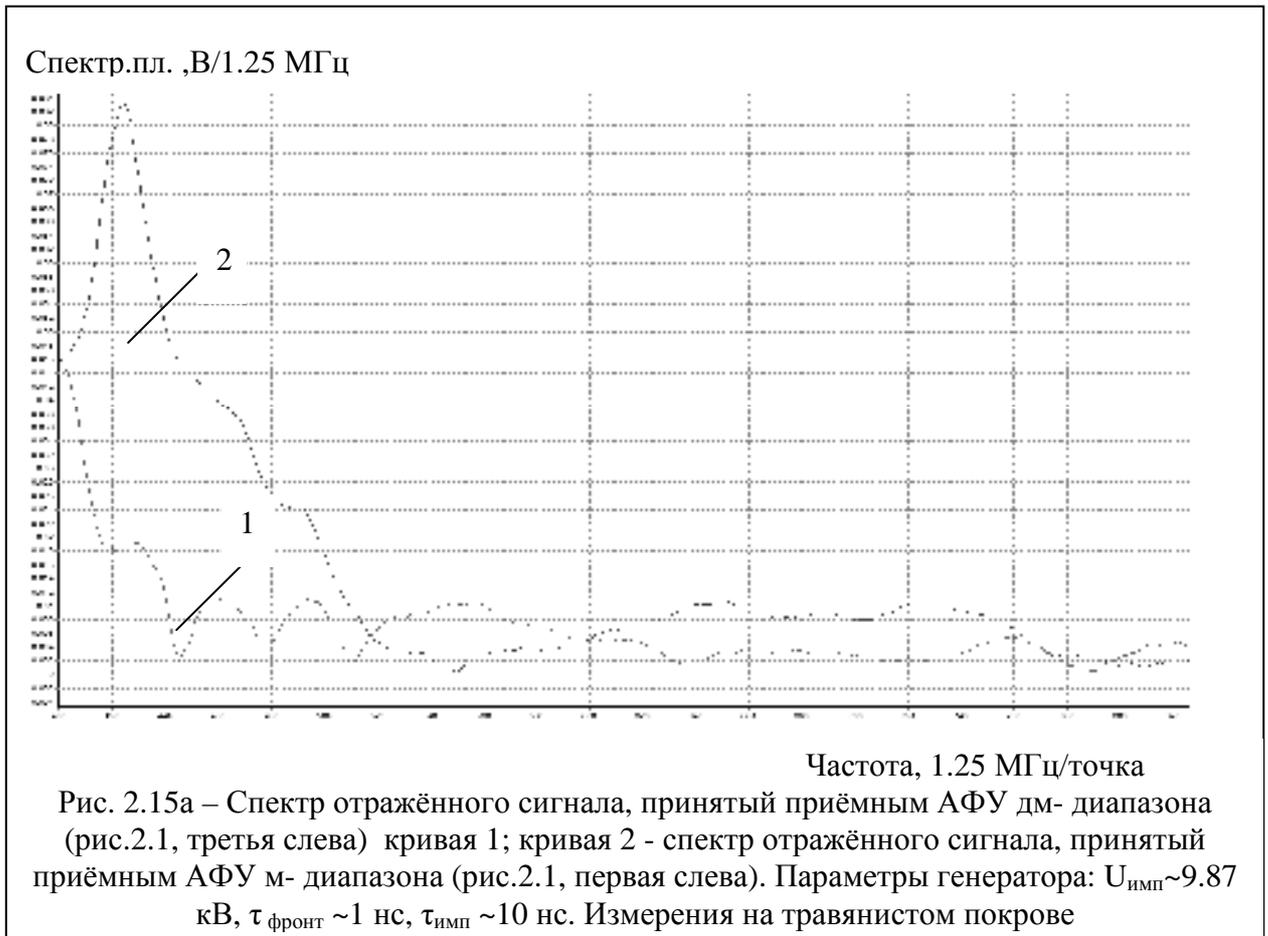
Комплекс ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды относится к системам радиолокации, использующим некогерентный (видеоимпульсный) сигнал для получения измерительной информации, которая может быть использована для оценки структурных характеристик геологического разреза.

Работа комплекса включает: излучение импульсных видеосигналов в геологический разрез; приём отраженных сигналов в радиодиапазоне частот (радиосигналов) из геологического разреза, засинхронизированных во времени с одним из принимаемых сигналов; обработку принимаемых отраженных сигналов для суждения о структурных характеристиках геологического разреза.

Излучаемые импульсные видеосигналы относятся к классу сверхширокополосных и имеют как симметричную, так и асимметричную форму импульса. Частотная полоса излучаемого сигнала определяется уровнем согласования антенны с подстилающей средой.

Принимаются отраженные радиосигналы по меньшей мере в двух точках пространства в полосе частот приблизительно равной полосе приёмной антенны. Несущие частоты принимаемых отражённых сигналов в каждой точке пространства отличны друг от друга (рис.2.15а, 2.15б).

В настоящем комплексе для формирования излучаемого ЭМИ СШП сигнала используется видеоимпульс преимущественно несимметричной формы для обеспечения максимальной полосы сигнала.



Появление характеристических частот не возникает только в двух типах сред: в сильно разреженных газах, где отсутствуют близлежащие молекулы, оказывающие влияние на локальное поле; в металлах со свободными

электронами, где волновые функции электронов более “размазаны” по всему кристаллу, чем локализованы в одном атоме.

Слои в геологическом разрезе можно рассматривать как обобщенные фильтры, электродинамические характеристики которых заданы пространственной структурой слоя. Тогда механизм преобразования излучаемого СШП сигнала подстилающей средой как обобщенными фильтрами может быть сведен к решению обратной задачи рассеяния с переносом излучения.

Такой подход позволяет определить правую часть неоднородного векторного уравнения Гельмгольца<sup>7</sup>.

Решения уравнения Гельмгольца будут отличаться друг от друга при наличии геологической границы и при её отсутствии в случае изотропного пространства. Любая подповерхностная структура будет излучать при наличии пространственной неоднородности или временной релаксации её диэлектрических свойств.

Таким образом, решение неоднородного векторного уравнения Гельмгольца с использованием функции Грина учитывает возникновение как дифракционных эффектов, так и вынужденного рассеяния, обусловленного перемещением зарядов в геологических слоях под воздействием внешнего электромагнитного поля.

Само уравнение Гельмгольца может быть решено с использованием функции Грина<sup>8</sup>.

<sup>7</sup>Проекция векторного уравнения Гельмгольца  $\nabla^2 \dot{u}_m(\vec{r}) + k^2 \dot{u}_m(\vec{r}) = \dot{f}_m(\vec{r})$  на оси декартовой системы координат дают три скалярных уравнения, складывая их, получим представление решения неоднородного

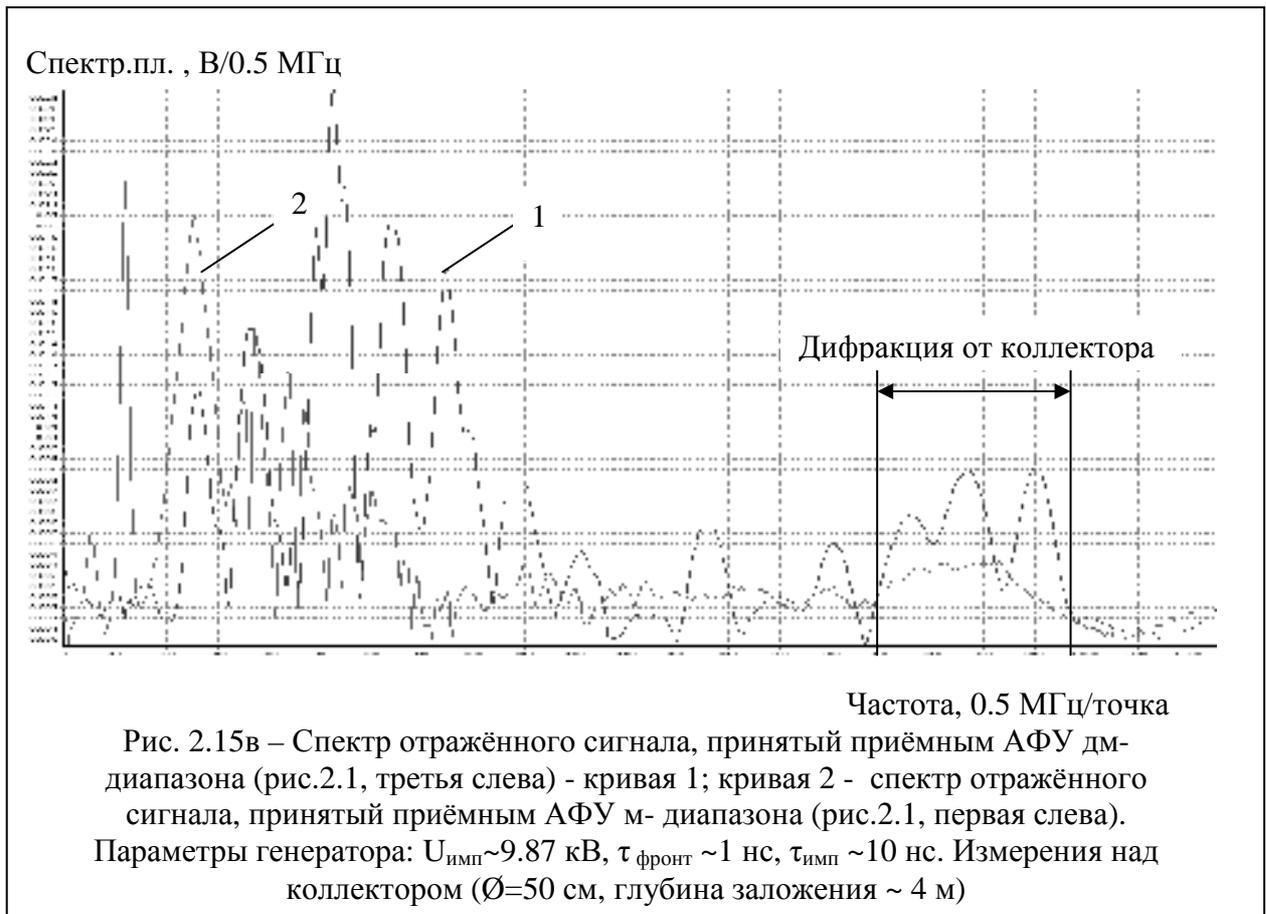
$$\text{уравнения Гельмгольца } \dot{u}_m(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\dot{f}_m(\vec{r}') e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dv'.$$

<sup>8</sup>В данном случае вводится функция Грина, являющаяся решением неоднородного уравнения Гельмгольца при правой части в виде дельта – функции Дирака  $\nabla^2 G(\vec{r}, \vec{r}') + k^2 G(\vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}')$ . Используя вторую формулу теоремы Грина, можно получить интегральное соотношение

$$\dot{u}_m(\vec{r}) = \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \dot{f}_m(\vec{r}') dv' + \int_S [\dot{u}_m(\vec{r}') \cdot \frac{\partial}{\partial v'} G(\vec{r}, \vec{r}') - G(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \frac{\partial}{\partial v'} \dot{u}_m(\vec{r}')] ds'.$$

Здесь интеграл по объёму – объёмный потенциал Грина, интеграл по площади – потенциал Грина двойного слоя. Для нас важен случай, когда решение ищется во всём безграничном пространстве, так что граница S области V относится в бесконечность, тогда как функция  $f_m(\vec{r})$  отлична от нуля только в некоторой ограниченной области.

Необходимость учета изменения длины волны электромагнитного поля при прохождении его через толщу исследуемых пород вызывается тем, что на наблюдаемые эффекты оказывает влияние соотношение развивающихся в толще пород длин волн и геометрических размеров отдельных геологических включений. Это соотношение обуславливает возникновение отдельных видов дифракции. Пример спектра отраженного сигнала от круглого коллектора представлен на рис. 2.15в.



При некоторых значениях характерных масштабов пространственной неоднородности или времён релаксации область существования нелокальной дисперсии может формироваться в диапазоне частот, далёких от собственных резонансов и полос поглощения материала (А. Б. Шварцбург [406]).

В нашем случае дифракционные эффекты удастся отделить от вынужденного рассеяния за счет излучения сверхширокополосного импульсного радиосигнала, частотная полоса которого определяется уровнем согласования передающей антенны в конкретной точке зондирования.

Многоканальный приемник прямого детектирования и усиления (стробоскопический осциллограф) обеспечивает сверхширокополосность принимаемого сигнала разнесенными на фиксированную базу сверхширокополосными приёмными антеннами, каждая из которых отличается уровнем согласования антенны в конкретной точке зондирования. Приём осуществляется на развертках, меньших длительности видеоимпульса с синхронизацией из отраженного сигнала.

Расстояние между точками пространства (геометрические размеры приемных антенн и их база многоканального приемника) выбирают исходя из требуемого разрешения по глубине.

Форму видеоимпульса можно изменять различными эквивалентными с точки зрения решаемой задачи средствами: изменением длительности переднего фронта импульса, изменением длительности вершины импульса, изменением длительности заднего фронта (среза) импульса.

Перестройка частоты следования импульсов позволяет уменьшить или увеличить время проведения измерений, что обеспечивает дифференцированный подход к проведению исследований различных геологических разрезов.

Для обработки принятых отраженных сигналов могут использоваться различные алгоритмы, чья структурная последующих расчетов может включать в себя совершенно различные критерии оценки и алгоритмы.

Например, в каждой точке пространства для принимаемых отраженных сигналов после их прямого детектирования в стробоскопическом приемнике, используя энтропийные критерии построения эмпирических гистограмм, получают семейство волатильностей (см. гл. IV).

Выполняются оценки корреляционных функций необработанных отражённых сигналов с целью уточнения значения эффективной диэлектрической проницаемости и последующее построение эмпирического распределения результатов. В качестве характеристики оценивания используется

информационная мера Кульбака [424]. Её значение связывается с текущими оценками моментов гипотетического распределения (см. гл. IV).

В качестве устойчивых признаков идентификации геологической структуры используют: Фурье - преобразование сигналов; авто- и взаимная корреляционные функции центрировано - нормированных результатов зондирования (см. гл. IV). Так, в качестве признаков идентификации объекта в геологическом разрезе пространственной дифракции используют значения Фурье-спектра на высоких частотах (рис. 2.15в).

С помощью информации, полученной из сигнала, отраженного от подповерхностных структур, возможна оценка физического состояния и размеров через большую толщу твердых тел фундаментов бетонных, кирпичных и других сооружений, обнаружение свай и определение глубины их забивки, глубины залегания грунтовых вод, оценка состояния дорожного покрытия и элементов дорожного полотна в ходе его строительства и дальнейшей эксплуатации, оценка состояния подводной части причалов при строительстве портов и их эксплуатации, определение подземных каналов дренажа жидких углеводородов в реки и прочие водоемы, обследование инженерных конструкций, заглубленных в грунт или водоемы (таких, как нефте- и газопроводы).

## 2.4 Синхронизация ИИС комплекса

Повышение помехоустойчивости возможно только за счёт реализации в приемнике режима накопления. Основным препятствием этому служит канал синхронизации как источник структурной (подобной сигналу) помехи. Уже при КСВН антенн  $\sim 2.0$  40% излучаемого сигнала распространяется по воздуху.

На рис 2.16а представлен спектр отражённого сигнала, принятый приёмным АФУ м<sub>1</sub>- диапазона с синхронизацией от генератора. Проявление «петли» в кабеле синхронизации (кривая 2) и металла рядом с ним (кривая 3) суть структурная помеха. Аналогично для приёмной АФУ дм- диапазона (рис. 2.16в).

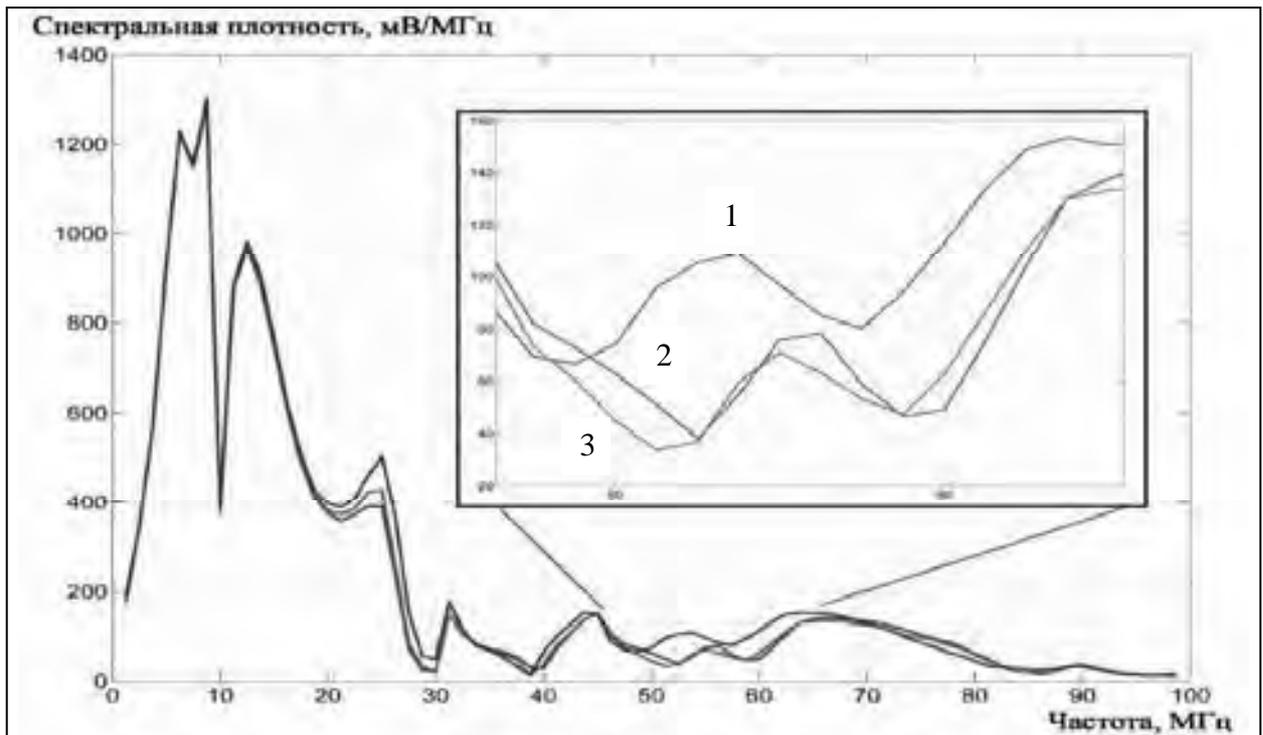


Рис. 2.16а – Спектр отражённого сигнала, принятый приёмным АФУ  $m_1$ - диапазона с синхронизацией от генератора - кривая 1; кривая 2 - «петля» в кабеле синхронизации; кривая 3 –металл рядом с кабелем синхронизации. Измерения на травянистом покрове

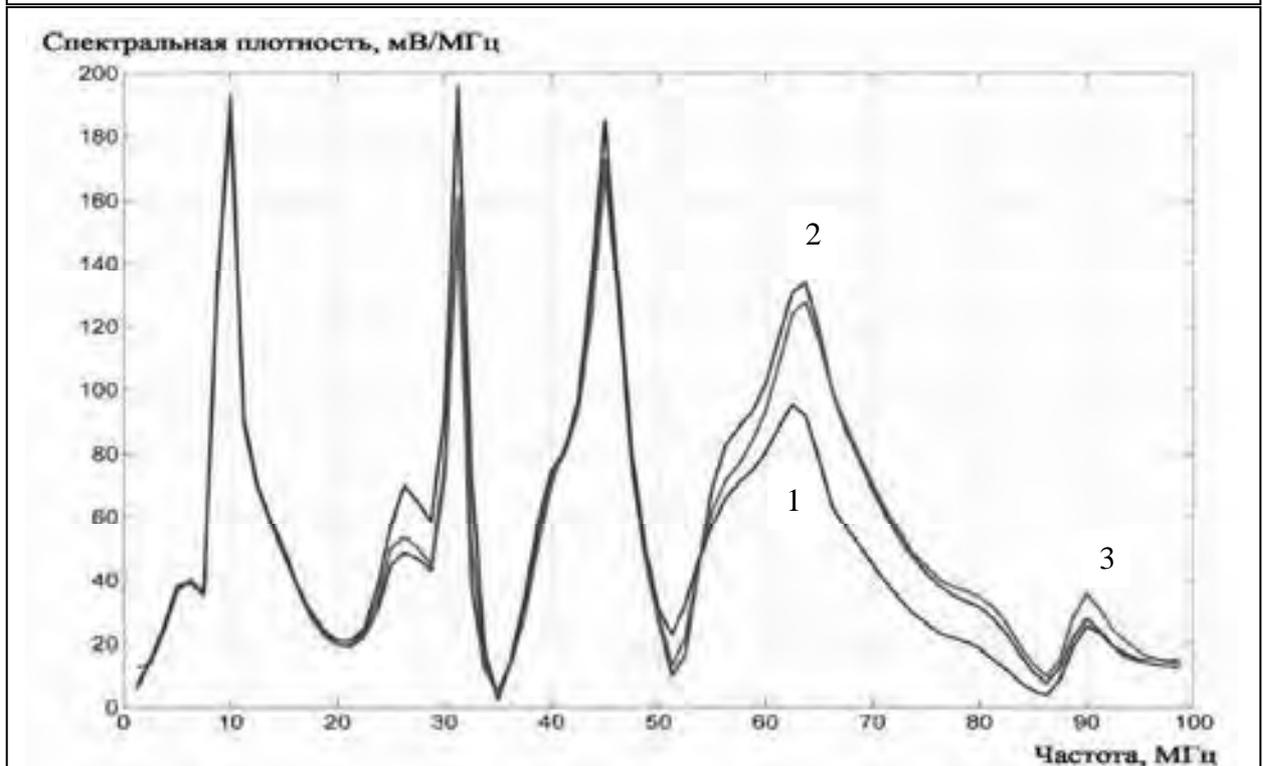
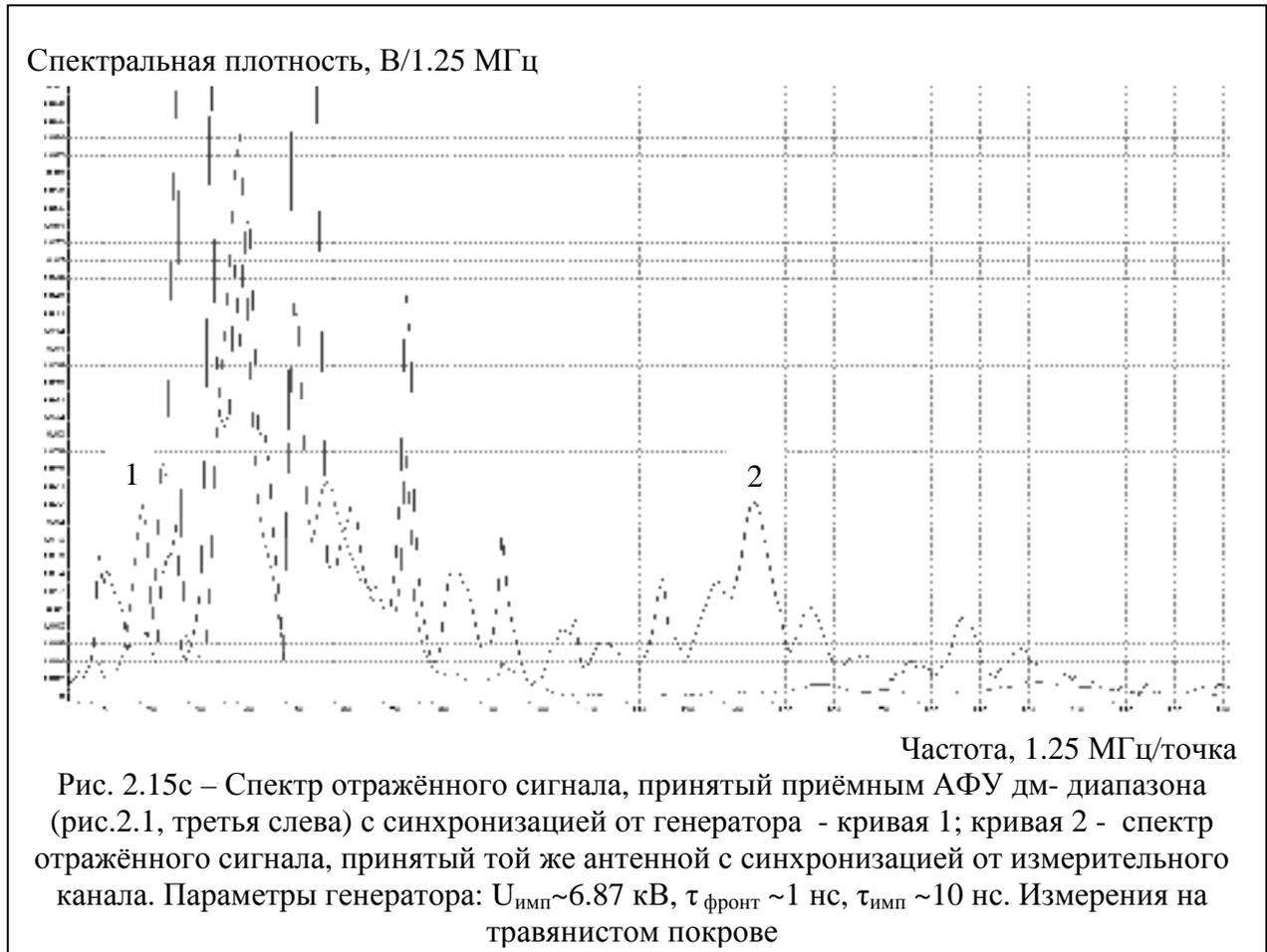


Рис. 2.16в – Спектр отражённого сигнала, принятый приёмным АФУ  $m_1$ - диапазона с синхронизацией от генератора - кривая 1; кривая 2 - «петля» в кабеле синхронизации; кривая 3 –металл рядом с кабелем синхронизации. Измерения на травянистом покрове

На рис 2.16с представлен спектр отражённого сигнала, принятый приёмным АФУ дм- диапазона с синхронизацией от генератора (кривая 1) и спектр отражённого сигнала, принятый той же антенной с синхронизацией от измерительного канала.



## 2.5 Методики аппаратной идентификации

Данные методики представляют возможности оперативного представления информации в форс – мажорных обстоятельствах, например, при проходке горной выработки, на оползневых склонах и т.п. Реализуются аппаратно и представляются в ходе проведения измерений. Например, оперативное решение по оценке наличия свободной воды и связанной воды в горной выработке позволяет существенно корректировать скорость проходки.

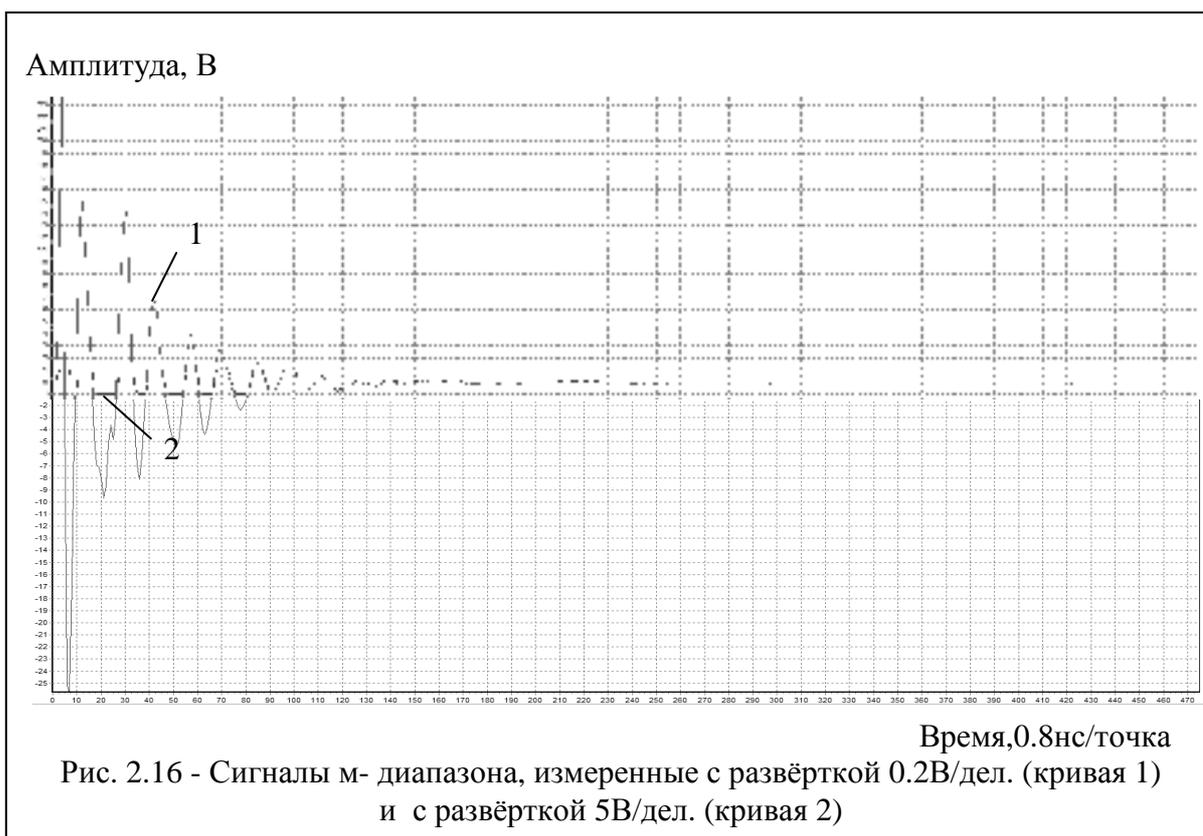
### 2.5.1 Методика синтезирования амплитуды сигнала

Методика предназначена для повышения разрешающей способности комплекса по глубине путём синтезирования (сшивки) файлов входных сигналов, записанных с разной развёрткой по амплитуде.

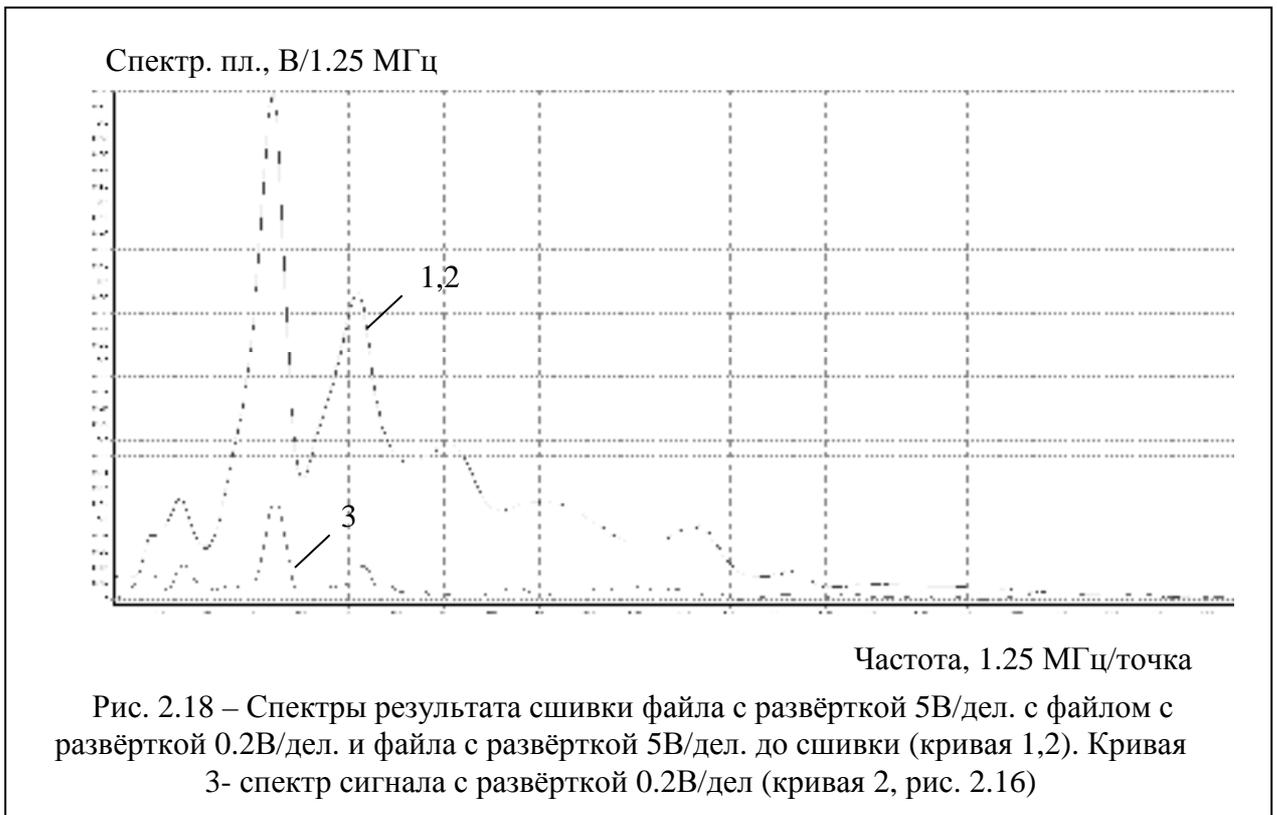
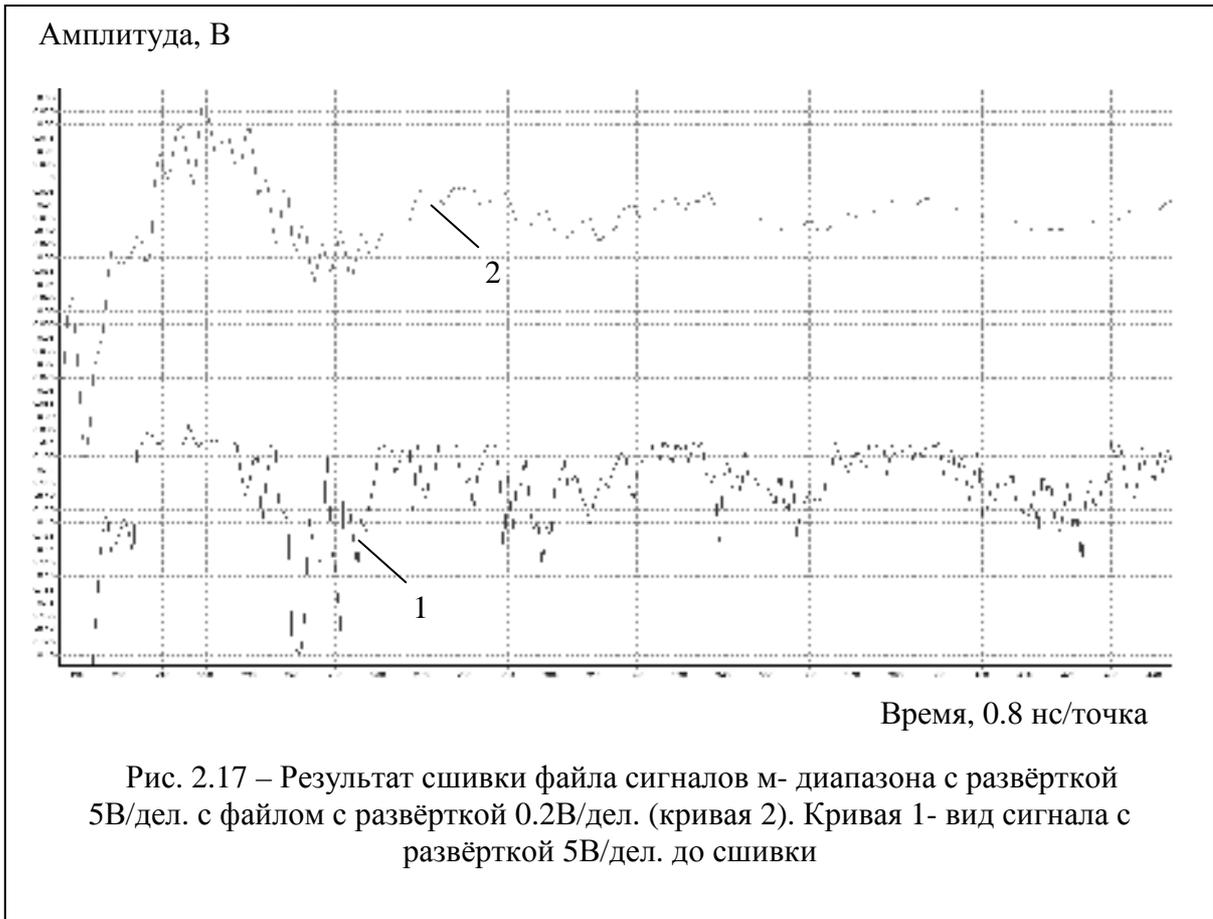
На рис. 2.16 представлены два сигнала  $m_1$ -диапазона, измеренные с развёрткой 5В/дел. (кривая 1) и с развёрткой 0.2В/дел. (кривая 2). Для кривой 1 разрешение по амплитуде составляет  $50\text{В}/2^9$ , для кривой 2 -  $2\text{В}/2^9$ . Без потери общности (рис. 2.17), начиная с 100 значения можно «сшить» файл кривой 1 с файлом кривой 2.

Результат такой «сшивки» представлен на рис. 2.17(кривая 2).

Из сравнения спектров сигналов до и после сшивки (рис. 2.18) можно сделать вывод, с одной стороны, о предпочтительности такой операции с точки зрения разрешения сигнала по амплитуде, с другой – о возможности увеличения глубины зондирования путём использования данной методики.



Обращает на себя внимание своей неидентифицируемостью (см. гл. IV, п. 4.6) спектр обрезанного по амплитуде сигнала (кривая 3, рис. 2.18) по сравнению с идентифицируемыми спектрами сигналов до и после сшивки (кривые 1, 2 на рис. 2.18).



## 2.5.2 Методика определения глубины залегания слоя (объекта)

В методике идентификации образов для ЭМИ СШП зондирования при решении обратной задачи использовано уравнение Винера – Хопфа как уравнение, устанавливающее связь между АКФ и ВКФ сигнала и шума [257], в данном случае - сигналов разных длин волн.

Применение существующих методов его решения позволило упростить задачу обнаружения пространственной неоднородности слоя и создать методику извлечения информации из результатов измерений в одной точке, что заметно расширяет возможности инженерно-геологических изысканий [276].

Основной практической задачей при идентификации подповерхностных структур является определение глубины залегания слоя или объекта, которую

находят по формуле 
$$L = \frac{c \cdot \Delta t}{2\sqrt{\epsilon'_s}},$$

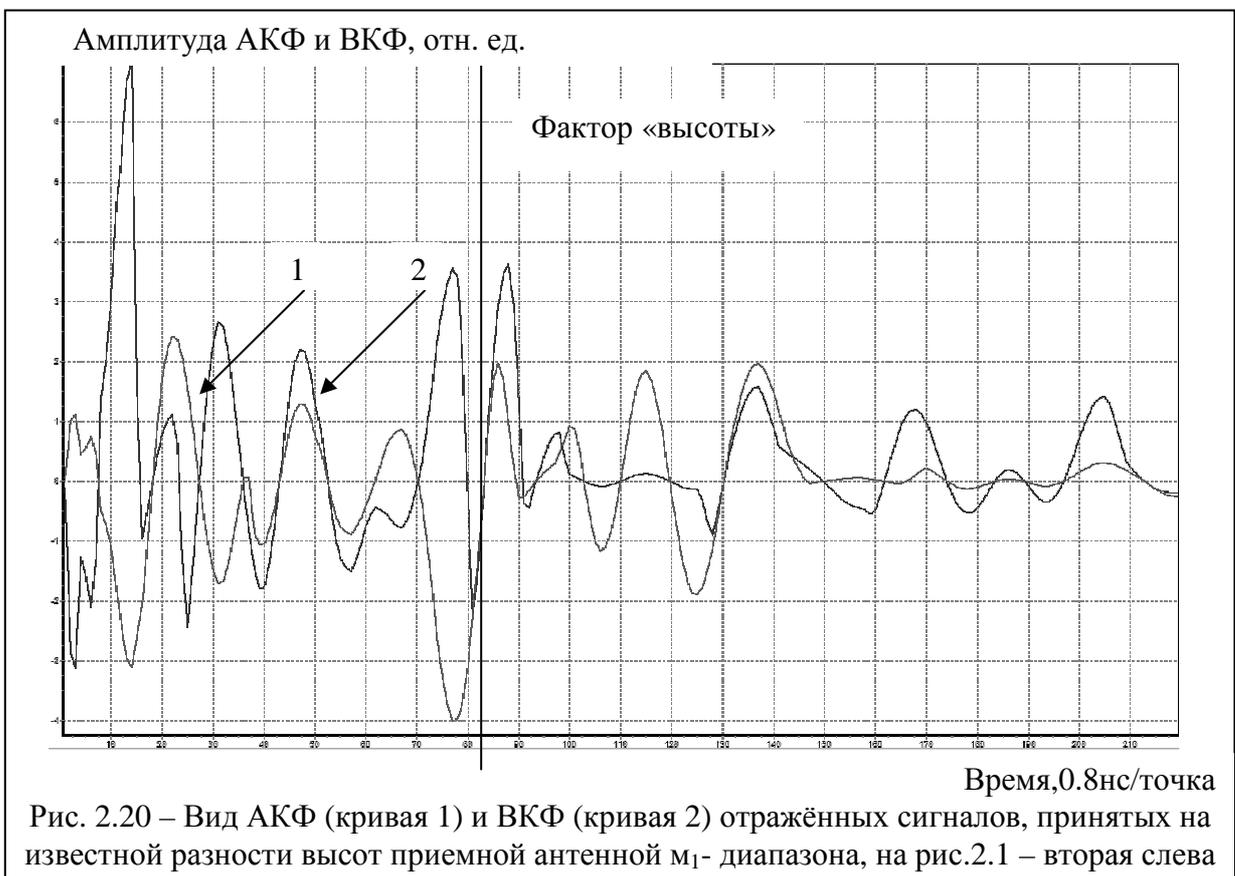
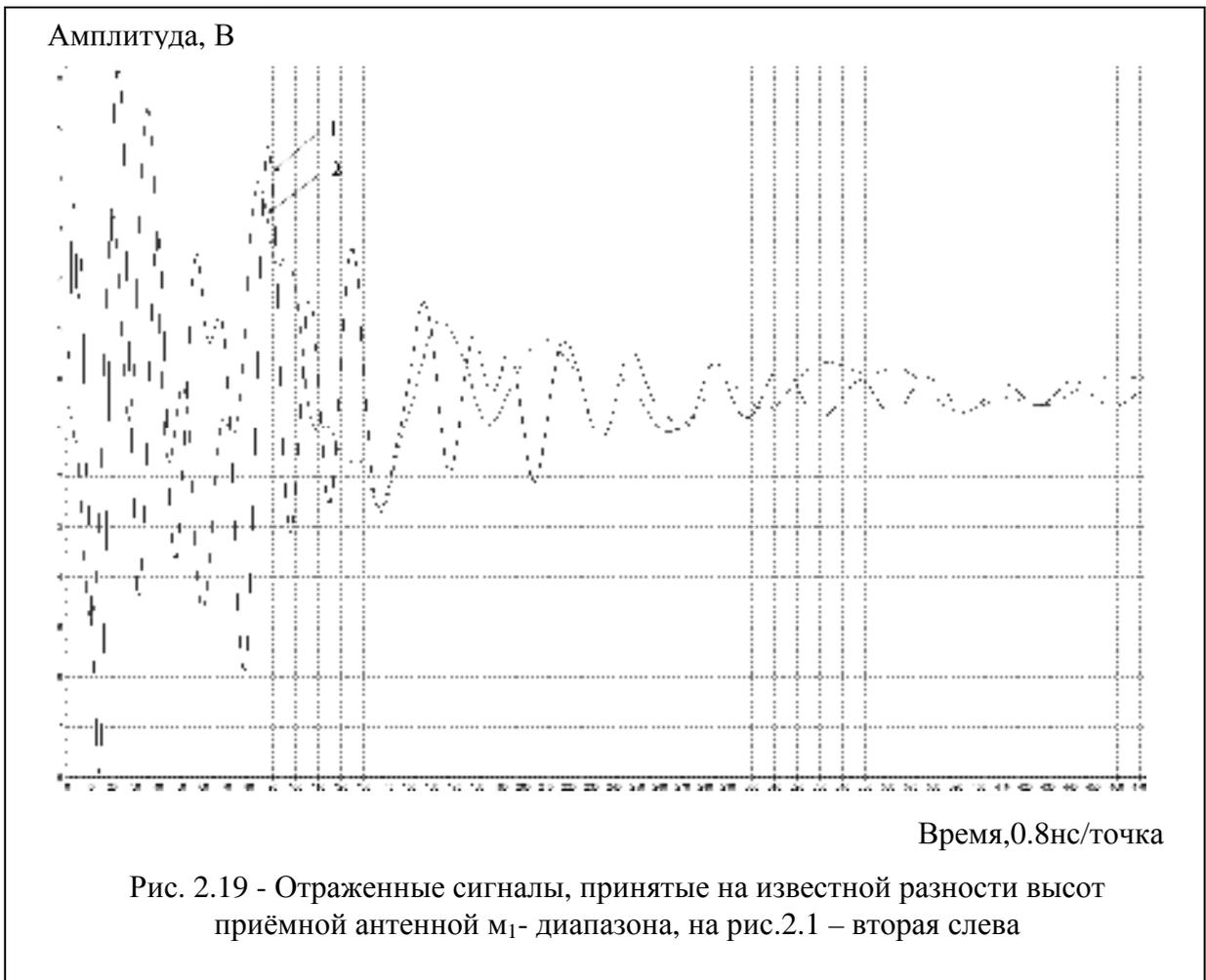
где  $c$  – скорость света;  $\Delta t$  – задержка зондирующего сигнала;  $\epsilon'_s$  - эффективное значение диэлектрической проницаемости.

Калибровка комплекса на известной разности высот позволяет по виду авто- и взаимокорреляционных (АКФ, ВКФ) функций сигналов определить  $\epsilon'_s$ . Например, для известной разности высот измерены ЭМИ СШП сигналы (рис. 2.19).

По виду АКФ и ВКФ (рис. 2.20) определён фактор «высоты» и величина эффективной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_s$ .

На рис. 1.6 приведена эталонная зависимость  $\epsilon'_s$  песчано – глинистых грунтов от объёмной влажности  $W, \%$  в частотном диапазоне 1 МГц ÷ 500 МГц, на рис. 1.6а - экспериментальные данные [310] для корундового песка, песчано – глинистых грунтов и почвенно – растительного слоя.

При ЭМИ СШП зондировании таких грунтов Фурье - образ отражённого сигнала всегда лежит между кривыми 10<sup>6</sup> Гц и 500 МГц (кривые 1 МГц и 500 МГц на рис. 1.6), поэтому задача по определению  $\epsilon'_s$  может быть сведена к результатам измерения влажности грунтов на поверхности или в забое с последующим прогнозом  $\epsilon'_s$ .



Если влажность первого слоя определена, по значению частоты центра тяжести Фурье – спектра определяется  $\varepsilon'_s$ , как точка между кривыми  $1 \div 500$  МГц на рис. 1.6 и по указанной выше формуле определяется  $L$ . Погрешность  $\delta L, \%$  данной методики  $\leq 1\%$ . Снижение  $\delta L$  возможно за счёт использования моделей  $\varepsilon'_s$  (Дебая, Коула – Коула, Коула – Девидсона, Хаврильяка – Негами; см. гл. I, п. 1.1) [196, 197, 301, 302].

Объединяя результаты экспериментов [35÷38, 82÷86] по определению  $\varepsilon'_s$  мелкозернистого кварцевого песка с данными лабораторных измерений [81] для эолового песка и лёсса, можно составить общую картину частотной дисперсии песчано - глинистых грунтов при положительных температурах, а именно: в интервале частот  $< 10^6$  Гц частотная дисперсия обусловлена сменой доминирования макродипольного механизма поляризации дипольно-релаксационным (частоты  $10^6 \div 10^7$  Гц).

Для глинистых влажных грунтов общая картина частотной дисперсии  $\varepsilon'_s$  считается сходной [273]. Таким образом, электрофизические свойства песчано – глинистых грунтов в переменных электромагнитных полях определяются их влажностью. Влияние минерального состава имеет второстепенный характер.

### 2.5.3 Идентификация наличия воды

Экспериментально установлено [300], что частотная характеристика  $\lg(tg\delta)$  воды имеет  $\min$  в районе 25 МГц.

Общим критерием диэлектрических спектров (А. Р. Хиппель, 1954) – синоним «релаксационные спектры» [300] – является то, что диэлектрическая проницаемость может оставаться постоянной или падать с возрастанием частоты, тогда как тангенс угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) как функция частоты может и возрастать и падать.

При прохождении поля электромагнитного импульса через среду наибольшим изменениям подвержена жидкая фаза среды, поэтому в сильных импульсных электромагнитных полях стало возможным выявление воды в природных средах с различным минеральным скелетом [302, 417].

Это особенно важно для пористых грунтов. В этом случае проводимость, определяющая их электрические свойства, является ионной (низкочастотной).

Диапазон частот выше  $10^8$  Гц – это область ориентационной поляризации молекул связанной воды, поэтому объяснить постепенное уменьшение диэлектрической проницаемости влажного образца в этом диапазоне можно постепенным переходом воды из свободного состояния в связанное при формировании органо-минерального комплекса (ОМГ) грунта.

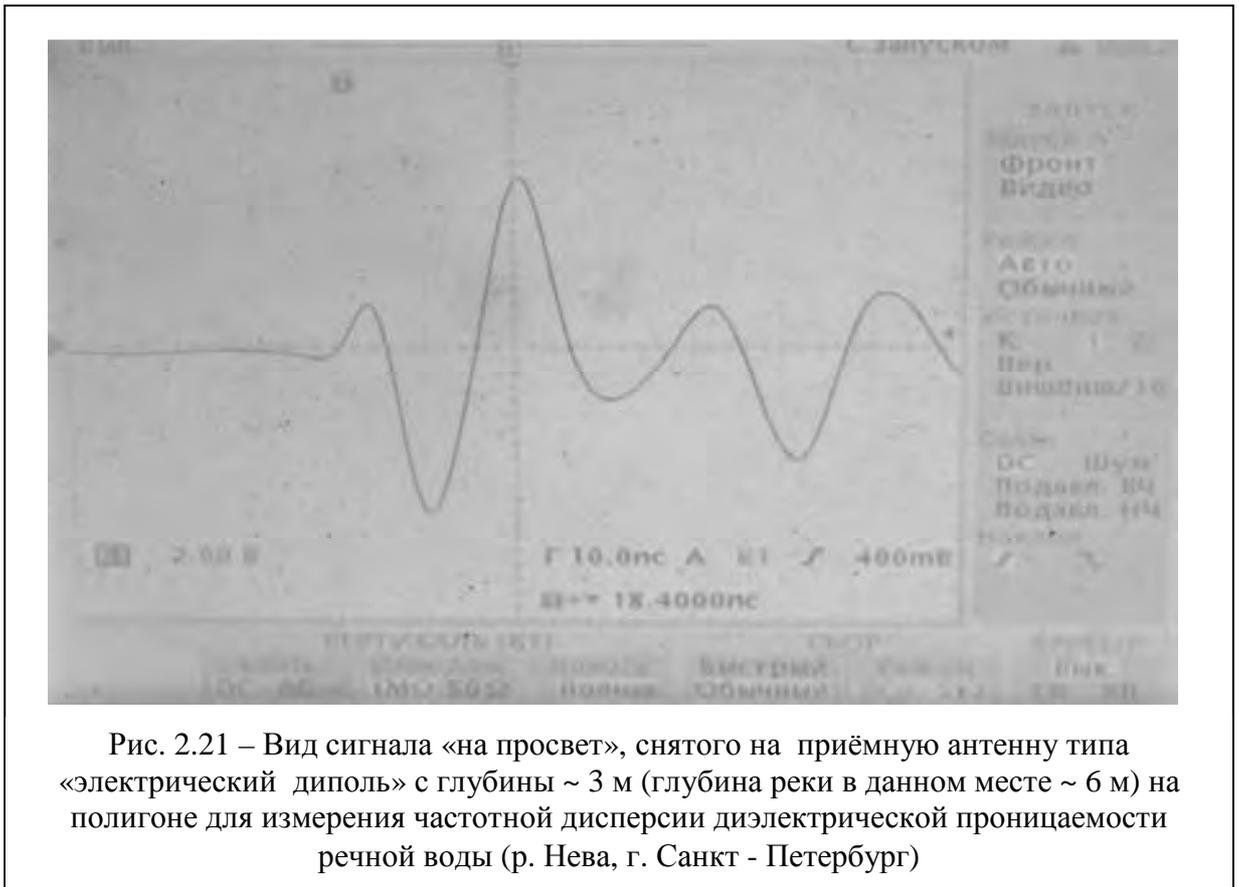
В диапазоне  $10^6$ – $3 \cdot 10^7$  Гц наблюдается межслойная поляризация Максвелла-Вагнера. Увеличение количества связанной воды приводит к увеличению площади эквивалентного конденсатора Максвелла-Вагнера и возрастанию величины действительной части КДП.

Вид сигнала «на просвет», снятый на приёмную антенну типа «электрический диполь» с глубины ~ 3 м, приведен на рис. 2.21. Расстояние между передающей антенной и приемным диполем ~ 30 м.

Анализ данных по этому вопросу [300, 303, 304, 305] позволяет обоснованно говорить как о наличии низкочастотной диэлектрической дисперсии, так и о её смещении при наличии водного раствора *NaCl* в область более высоких частот (кривая 5, рис. 2.22)<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Водный раствор солей в грунтах можно рассматривать как систему, состоящую из объёмной воды, воды в гидратных оболочках и ионных форм разного состава. Объёмная вода в растворе имеет структуру, сходную с чистой водой, размытый переходный слой на границе между гидратной оболочкой и объёмной водой отсутствует. Полагается, что концентрационная граница, выше которой объёмная вода в растворе отсутствует, в первом приближении соответствует максимуму удельной электропроводности раствора. Подобное представление о структуре водных растворов предлагает А. А. Потапов (1994). А. С. Лилеевым (2004) [306] установлено, что в водных растворах неэлектролитов наблюдается рост времени диэлектрической релаксации – экстремумы в частотной зависимости  $tg \delta$  смещаются в область более низких частот, т. к. в сетке водородных связей раствора происходит уменьшение вращательной подвижности молекул по сравнению с чистой водой.



На рис. 2.22 показана частотная зависимость  $\lg(tg\delta)$  воды [292] и водного раствора  $NaCl$  с проводимостью 100 мкСм/см. Из этих данных следует, что нижняя (по частоте) точка минимума функции  $\lg(tg\delta)$  имеет значение 25 МГц – частотный предел, к которому стремится функция  $\lg(tg\delta)$  при снижении концентрации солей в воде.

Для проверки возможности получения оценки обводнённости горных пород при строительстве подземных выработок были проведены серии экспериментов.

Первая серия состояла в прямых измерениях на полигоне для измерений частотной дисперсии диэлектрической проницаемости речной воды (р. Нева, г. Санкт - Петербург) в русле реки.

Результаты Фурье – преобразования сигнала, снятого с погружённой в реку антенной  $m_1$ - диапазона в разных точках, приведены на рис. 2.23; экстремум спектра сигнала соответствует значению 25 МГц по частоте.

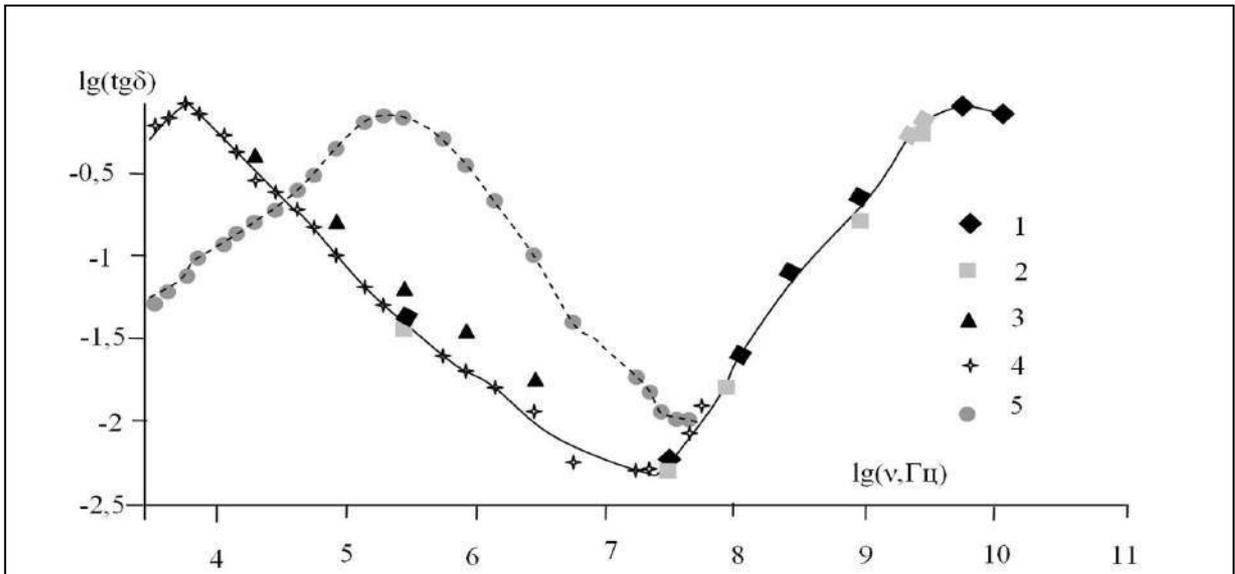
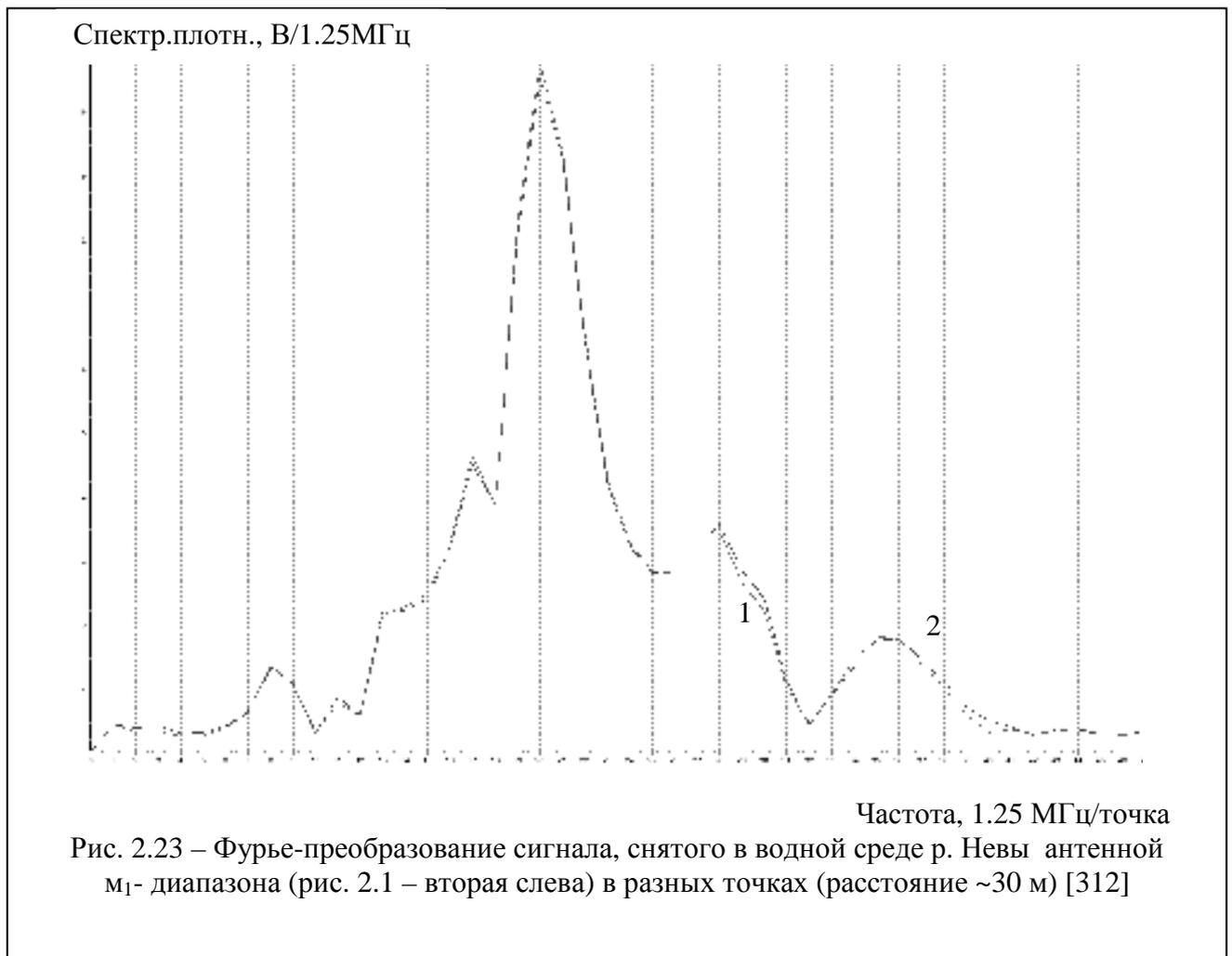
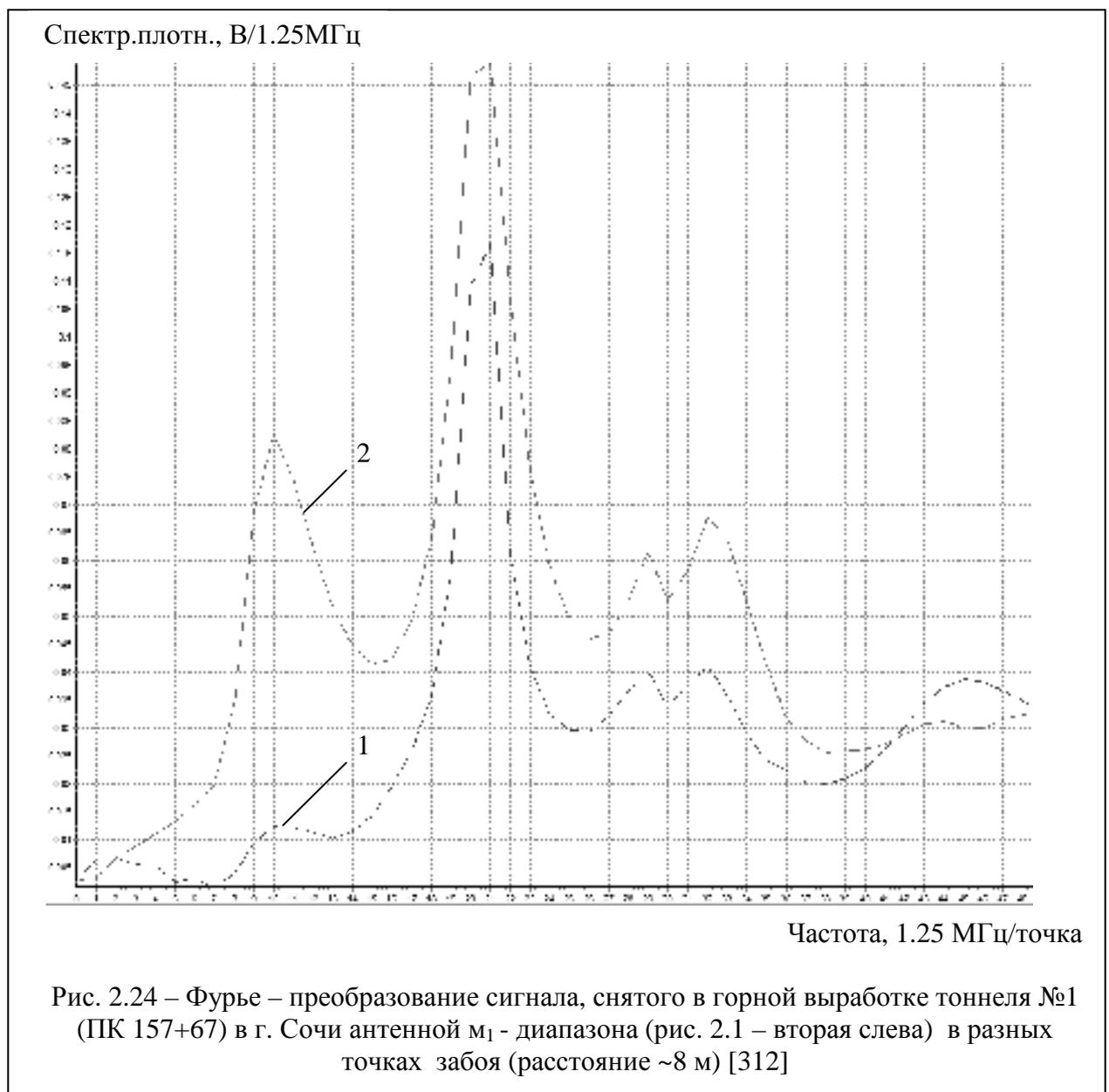


Рис. 2.22 – Частотная зависимость  $\lg(tg\delta)$  воды (1-4) и водного раствора  $NaCl$  с проводимостью 100 мкСм/см (5) по данным: 1- (Ахадов Я. Ю. 1972); 2 – (Хиппель А.Р. 1959); 3–(Тонконогов М.П., Векслер В.А., Биржанов К.Ж. 1975); 4 – (Семихина Л. П. 2007)



Вторая серия состояла из измерений в забое горной выработки (тоннель №1, ПК 157+67) г. Сочи. Здесь ПК – пикет, его длина строго 100м, +67 - 67м. Результаты Фурье – преобразования сигнала, снятого той же антенной в разных точках забоя, приведены на рис. 2.24; экстремум спектра сигнала соответствует значению 25.6 МГц по частоте. Размер окна Фурье – преобразования принят постоянным для первой и второй серий.

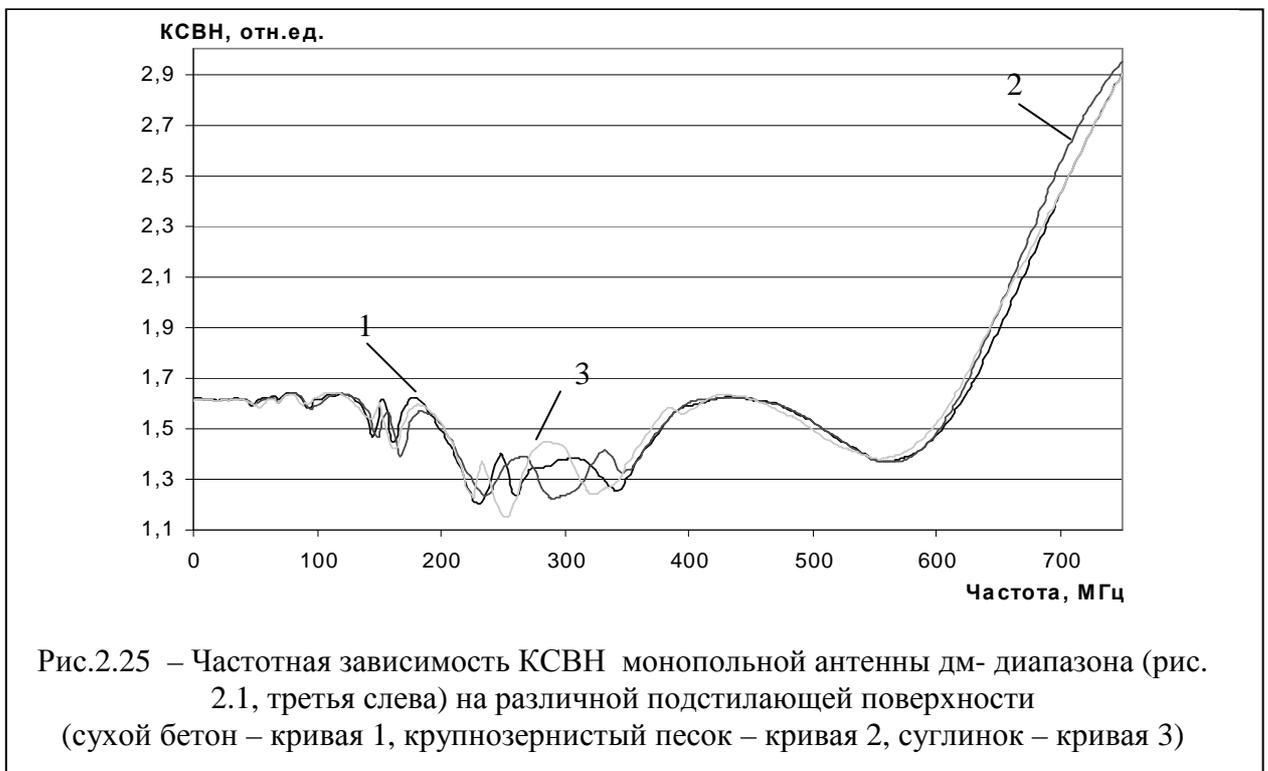
Сопоставление результатов, представленных на рис. 2.23, 2.24, позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования обводненности горной выработки.



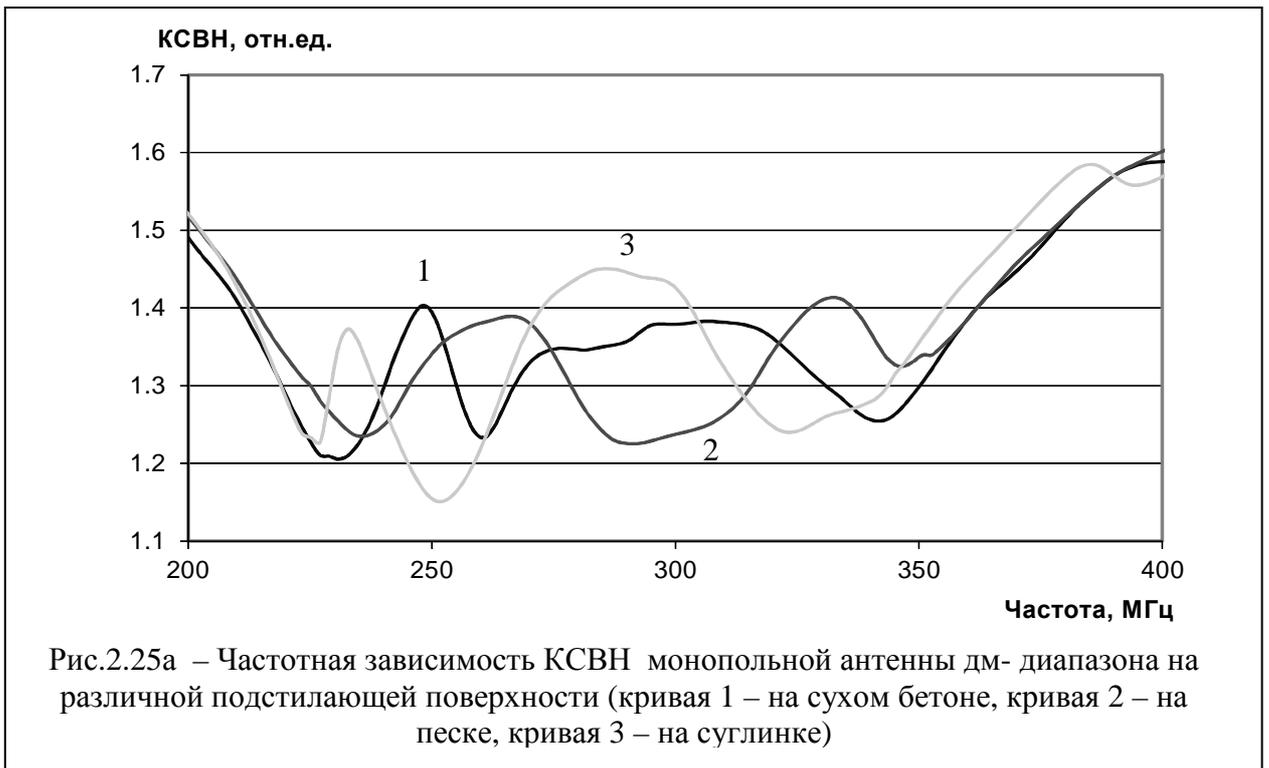
## 2.5.4 Оценка наличия связанной воды в горной выработке

Аномальное свойство связанной воды - понижение её относительной диэлектрической проницаемости в несколько раз по сравнению со свободной водой. По данным [307] прослойки связанной воды толщиной 0.5 – 0.6 нм имеют диэлектрическую проницаемость равную всего 3 - 4.

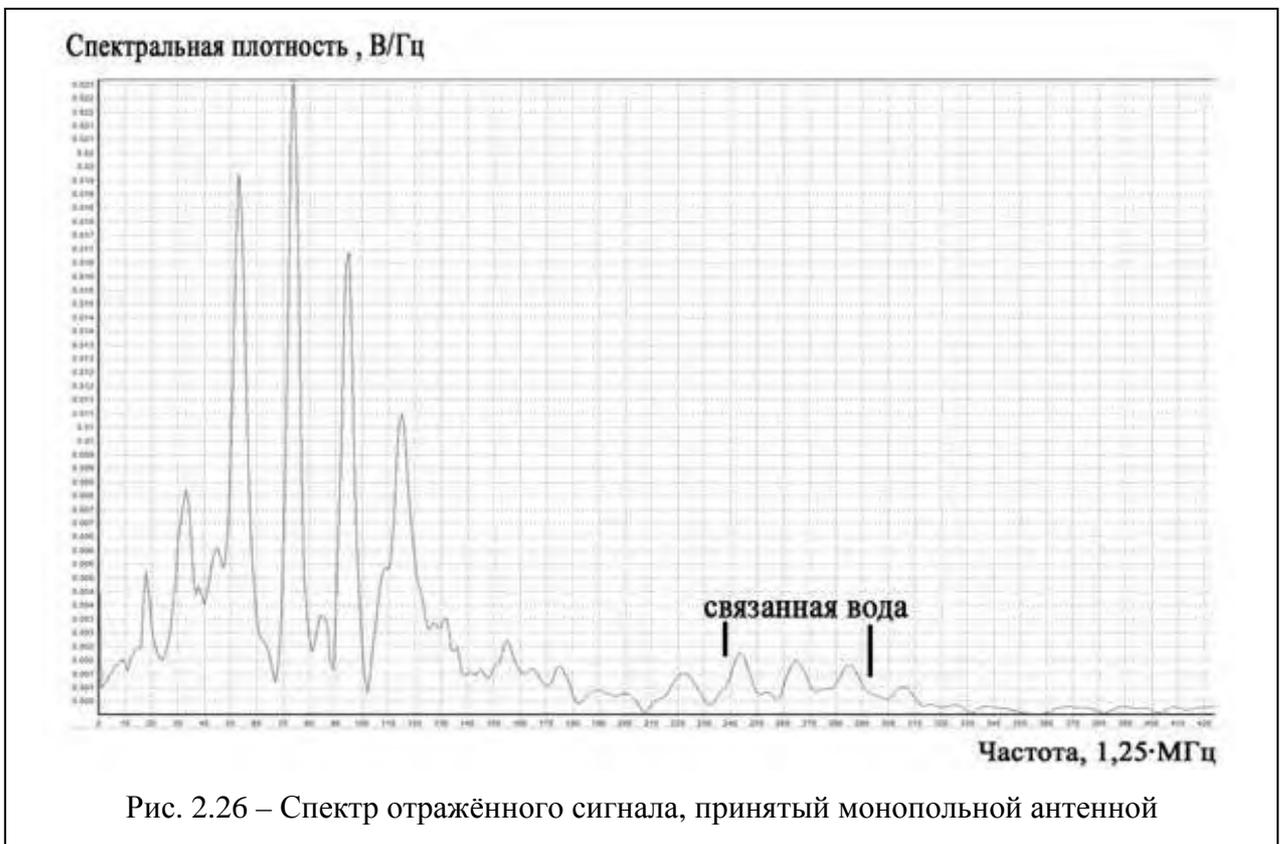
График частотной зависимости КСВН monopольной антенны дм- диапазона для инженерной подстилающей поверхности (сухой бетон) и грунтов (крупнозернистый песок, суглинок) представлен на рис. 2.25.



Из рис. 2.25 следует, что в случае отсутствия связанной воды (сухой бетон, крупнозернистый песок с минимальной для помещения влажностью) графики близки друг к другу, график для суглинков с влажностью ~10% резко отличается от них в диапазоне частот 230÷400 МГц (рис. 2.25а).



На рис. 2.26 представлен спектр отражённого сигнала, принятый monopольной антенной (рис.2.1, третья слева) на ПК 150+86 в штольне №1 тоннельного комплекса №1 09.10.2009 (г. Сочи). На нём в диапазоне частот 300÷370 МГц виден спектр связанной воды [144].



Характерным примером проявления связанной воды в подземном пространстве является авария на ул. Малая Дмитровка (Москва, 1998), когда при прокладке трассы подземного коллектора методом микротоннелирования произошло сползание в микротоннель погребённой древней речной палеодолины. Результат аварии – погибший тоннель и провалившееся здание в центре Москвы.

## 2.6 Проверка излучения комплекса ЭМИ СШП зондирования на электромагнитную совместимость

В соответствии с ГОСТ Р 51318.11 – 2006

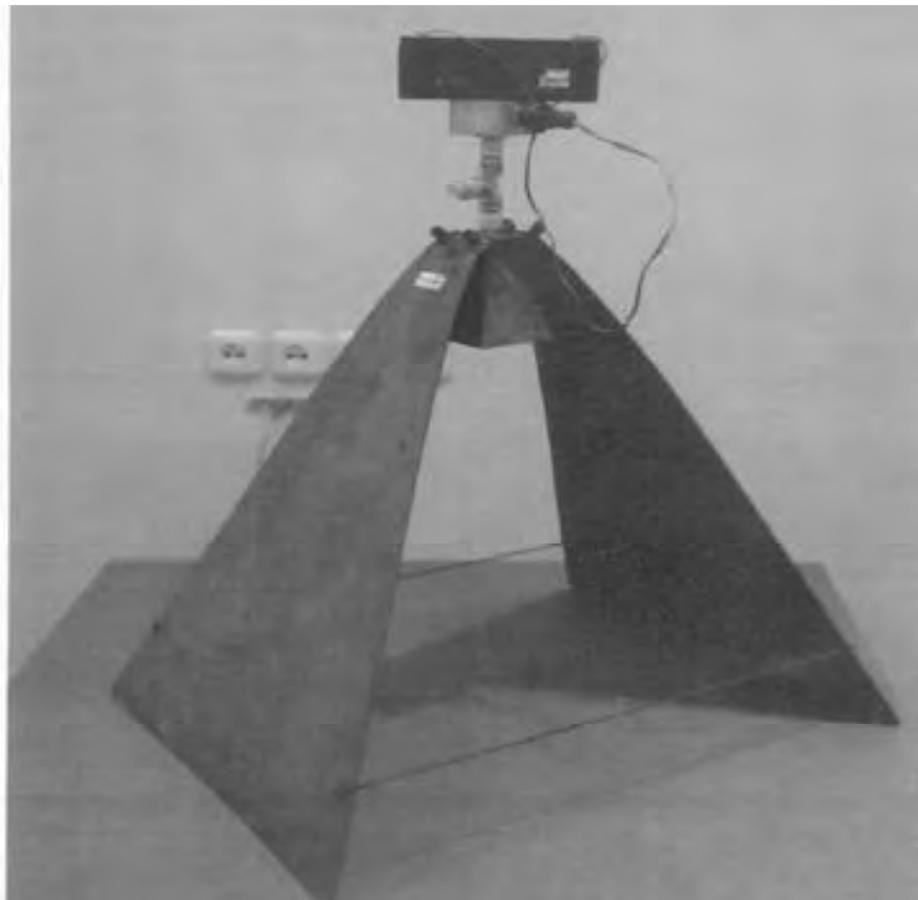


Рис. 2.27 – Вид излучающей антенны на лабораторном столе ИЛ «ТЕСТ- САНКТ- ПЕТЕРБУРГ»: неоднородная микрополосковая антенна с излучающим ДДРВ генератором проходят испытания на электромагнитную совместимость в диапазоне 0.15 ÷ 1000 МГц (внешний вид испытуемого устройства)

«Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от промышленных, научных, медицинских и бытовых (ПНМБ)

высокочастотных устройств. Нормы и методы испытаний» проведено испытание излучения неоднородной МПА с генератором 1 кВ (протокол № FGG2012/01/02/280-01 от 24.10.2012 г.).

На рис. 2.27 представлен вид излучающей антенны на лабораторном столе испытательной лаборатории (ИЛ) «ТЕСТ - САНКТ-ПЕТЕРБУРГ».

На рис. 2.28 – измерительная антенна для приёма электромагнитного сигнала в диапазоне  $0.15 \div 1000$  МГц.



На рис. 2.29 приведены результаты превышения нормы излучения над допустимыми (прямые линии).

Особенностью данных испытаний является то, что они проводятся в замкнутом пространстве (металлическая цистерна) и любые электромагнитные наводки от испытуемой аппаратуры попадают на анализатор спектра.



В табл. 2.3 приведена выписка из указанного протокола - результаты измерений напряжённости поля квазипиковым детектором анализатора спектра. Из результатов табл. 2.3 следует, что излучение комплекса ЭМИ СШП зондирования соответствует ГОСТ Р 51318.11 – 2006.

Таблица 2.3

Результаты измерений, дБмкВ/м		Нормированное значение, дБмкВ/м
Частота, МГц	QP	QP
67,63	30,87	56,0
81,28	32,59	56,0
86,47	21,66	56,0
92,52	50,25	56,0
92,52	50,25	56,0
103,00	30,76	56,0
206,70	30,42	56,0
241,90	30,57	56,0

Примечание:

- Спектр контролировался в диапазоне частот 0,15-1000,0 МГц.
- QP- квазипиковый детектор.

**Результат испытаний – Соответствует**

## ВЫВОДЫ

1. В соответствии с ГОСТ 23495-82 «Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь», который распространяется на твёрдые горные породы и предназначен «для расчётов процессов разрушения скальных горных пород с применением электромагнитных полей» данный метод может рассматриваться как обеспечивающий безопасность при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Например, при строительстве Евротоннеля под Ламаншем погибло 10 человек, при строительстве Северомуйского тоннеля – 57 (в горной выработке – 37, из них завалено - 32), после привлечения комплекса ЭМИ СШП зондирования в Северомуйском тоннеле погибших не было. При строительстве комплекса Сочинских авто- и ж/д. тоннелей, где при прогнозе проходки использовались данные непрерывного мониторинга ЭМИ СШП зондирования, погиб один человек. Таким образом, эффективность метода с точки зрения обеспечения безопасности очевидна.

2. Экспериментально установлено, что используемые в данном методе полоса и напряжённость излучаемого поля позволяет производить ЭМИ СШП зондирование через лёд, воду, железобетонные тубинги обделки тоннелей, дифференцируя геологические разности. Существенное ускорение и повышение точности определения местоположения обеспечивается за счет наличия материалов хотя бы одной калибровочной скважины, пробуренной на исследуемом объекте. Это позволяет откалибровать комплекс в соответствии с инженерно – геологическими разностями, слагающими разрез данного объекта.

3. Сформулированы и реализованы схемы и методы измерений и испытаний параметров ДДРВ генераторов. Для оценки выходной амплитуды импульса и уровня асимметрии импульса (фронт, длительность) применены соответствующие по полосе аттенюатор и осциллограф. Сформирована схема измерения параметров импульсов линейки ДДРВ генератора с амплитудой и асимметрией от

( $U_{\text{имп}} \sim 1.64$  кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 3.5$  нс) до ( $U_{\text{имп}} \sim 9.87$  кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 10$  нс) в полосе частот  $10^{-4} \div 17.44$  ГГц.

4. На примере четырёх вариантов построения приёмного тракта комплекса (с СИ от генератора, с СИ от сигнала из подстилающей среды, с записью на компьютер, с записью на флешкарту) для четырёх видов ИИС показано, что

- отказ от использования сигнала синхронизации от генератора повышает помехоустойчивость при наличии помехи, возникающий при низком качестве согласования антенн со средой и наводящейся в канал синхросигнала при импульсном стробоскопировании;
- отказ от компьютера и переход к записи цифрового сигнала на флешкарту существенно повышает техническую надёжность ИИС комплекса при работе в сложных условиях, например в тоннелестроении;
- переход на разъём типа CP-75 расширяет полосу исследуемого сигнала;
- отказ энергетической установки типа АБ (агрегат бензиновый) существенно повышает мобильность комплекса.

5. Вид распространяющегося импульса (рис. 2.21) хорошо согласуется с видом второй производной от гауссовского импульса в теории атомарных функций. Отклик многослойной среды на такой сигнал приближённо представляет собой временную последовательность узкополосных, почти гармонических сигналов.

6. Обратная задача по определению глубины залегания слоя решена на основании наличия низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости среды, которая обусловлена вызванной поляризацией с дипольно-релаксационным механизмом, описывающим поведение влажного грунта под воздействием сильного электромагнитного импульсного поля.

7. Оперативное решение по оценке наличия свободной и связанной воды в горной выработке позволяет существенно корректировать скорость проходки горной выработки, что свидетельствует об эффективности использования ЭМИ СШП зондирования в качестве метода, сопровождающего строительство тоннелей, например, при решении вопросов, связанных с прогнозной оценкой

инженерно-геологических и гидрогеологических условий на трассах строящихся тоннелей. Последнее способствует безопасному ведению горнопроходческих работ.

8. Испытания на электромагнитную совместимость показали, что излучение комплекса ЭМИ СШП зондирования соответствует ГОСТ Р 51318.11 – 2006. Неравномерность напряжённости электромагнитного поля в полосе частот  $0.15 \div 1000$  МГц не превышает  $\pm 15$  дБмкВ/м.

### **III АНТЕННЫ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОСТИ ПУТЁМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Основными элементом конструкции георадара являются антенны, поскольку они определяют полосу исследуемого процесса. Как правило, они должны быть демпфированными (резистивно – нагруженными) диполями (антенны Ву-Кинга), поскольку без дополнительного искусственного демпфирования на большинстве водонасыщенных почв антенны недопустимо долго «звонят» - излучаемые волны резонируют между антенной и подповерхностной средой из-за несоблюдения условий согласования. Применение демпфирования снижает энергетический потенциал георадара, а значит, и максимальную глубину исследований.

Оптимальный частотный диапазон антенн для подповерхностного локатора всегда является компромиссом, с одной стороны, между глубиной зондирования (1÷100 м и более) и разрешением (1÷10 см) [250] в зависимости от решаемой задачи для реальных геологических структур, с другой стороны – между частотными свойствами антенны (измеренными относительно импедансной подстилающей среды с известными характеристиками) и её габаритами.

Первые промышленные образцы СШП антенн с метрологически аттестованными характеристиками были созданы в СССР к середине 1970-х годов (измерительные антенны Пб-23, аттестованные в полосе 1...18 ГГц «по воздуху»), хотя первая публикация (В. С. Черноусов) относится к 1965 г.

Первый СШП комплекс на базе ЛБВ в качестве передатчика и стробоскопического осциллографа С1-91/4 в качестве приёмника был создан в ВИКИ им. А. Ф. Можайского (конец 1970-х). В качестве антенн использовались диполи Герца. Запись сигнала осуществлялась на микро-ЭВМ «Электроника».

Во втором комплексе (~ 1987 г.) передатчиком выступал генератор на базе дрейфового диода с резким восстановлением (гл. II, п. 2.2.2) с амплитудой тока в импульсе  $\approx 20A$  и стробоскопический осциллограф С9-9 в качестве приёмника. Запись сигнала осуществлялась на ЭВМ «СМ-4».

В этом комплексе использовался метод разнесённых приемной и передающей антенн (измерительные антенны П6-23). Оба комплекса имели ограничение по уровню входного сигнала ( $<1$  В).

Опыт работ по прецизионному измерению СШП радиолокационных характеристик, а также появление промышленной антенны П6-33, аттестованной в полосе 80...1000 МГц «по воздуху», и цифрового осциллографа С9-28 (ограничение по входу  $\leq 100$  В), способного записать сигнал на РС-ХТ, с учётом уже существующих генераторов на базе ДДРВ позволили осуществить первые работы по исследованию подповерхностной среды (1991) [299].

Это послужило отправной точкой к дальнейшему развитию и совершенствованию метода ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды [278], в котором особое место занимает антенная тематика, поскольку вопрос о согласовании импедансов антенны и подстилающей среды остаётся открытым.

Последнее обусловлено общими закономерностями поведения грунтов в переменном электромагнитном поле - почва любой подстилающей среды является многофазной гетерогенной дисперсной системой, состояние которой, как правило, неизвестно (гл. I, п.1.1÷1.3). Вопрос об определении абсолютной ёмкости поглощения<sup>1</sup> почв не может быть решен ни практически, ни даже теоретически, т.е. в нашем случае величина поверхностной проводимости, а следовательно, и поверхностного импеданса, является величиной умогнательной. Тем острее встаёт вопрос об исследованиях в области СШП антенн для подповерхностного зондирования.

До сегодняшнего дня не решён ряд задач по созданию приёмных антенн, минимально искажающих структуру наблюдаемого поля, например апланатических [255], и контролю излучения в подстилающей среде (восстановлению поля в дальней зоне).

К антеннам предъявляются жёсткие, порой трудно совместимые требования: стабильность электродинамических характеристик в широком частотном диапазоне, электромагнитная совместимость, малые вес и габариты,

---

<sup>1</sup> Определяется величиной поверхностной проводимости, ёмкостью поглощения органическими коллоидами; дипольной поляризацией за счёт ориентации органических коллоидов в сильном электромагнитном поле и процессами ионно – релаксационной поляризации (см.гл.I).

технологичность изготовления и т.д. В дополнение к перечисленному, при моделировании антенн, предназначенных для излучения и приёма ЭМИ СШП сигналов, изначально закладывается, что они должны иметь чётко выраженный фазовый центр, постоянную амплитудно - частотную и линейную фазо-частотную характеристики в полосе частот, содержащей доминирующую часть спектра сигнала<sup>2</sup>.

Процесс излучения СШП сигнала имеет значительные отличия от процесса излучения узкополосного сигнала и поэтому использование некоторых методов из теории антенн становится затруднительным [315]. Аналитическое решение внутренней задачи для антенн подповерхностного зондирования при возбуждении их токами  $10 \div 100A$  вызывает значительные математические трудности, связанные с тем, что при таких токах антенны автоматически начинают проявлять достаточно чётко выделяемые излучатели электрического и магнитного типов [316]. Успех разработки удачной конструкции антенны обычно связывают с наличием в ней конструктивных элементов, обеспечивающих возможность эффективного обмена энергией между этими излучателями [319].

### 3.1 Применение численных методов

Такой подход применяется, например, в [320, 321], но существует ряд вычислительных трудностей [322, 333].<sup>3</sup> На практике форма тока в антенне обычно задаётся исходя из удобства проведения расчётов [334]. Такая условность наиболее ощутима при наличии кривизны в антеннах, например, спиральных [331, 335].

По критерию использования тех или иных допущений методы анализа георадарных антенн можно классифицировать следующим образом [226]:

- методы ИУ, относящихся к классу уравнений Фредгольма первого рода;

<sup>2</sup> Здесь можно выделить такие антенны, как Impulse Radiating Antennas, Vivaldi Antennas, Scissor – Antennas, TEM – антенны. Их параметры и электродинамические характеристики весьма обстоятельно представлены в [317, 318].

<sup>3</sup> Не следует забывать, что применение сложных численных методов имеет свою «цену» и может быть весьма затратным как по времени, так и по стоимости. Более того, численное моделирование в полном смысле этого слова включает в себя не только расчёты электродинамических параметров, но и ряд других вопросов, включая оптимизацию системы/проекта в целом. Тем не менее, рано или поздно этим приходится заниматься. При этом следует предостеречь пользователя от применения некоторых «универсальных» моделирующих программ, недостаточно приспособленных для моделирования поведения структур со сложными индуктивными связями.

- методы ИУ, относящихся к классу уравнений Фредгольма второго рода;
- методы сингулярных ИУ;
- методы обобщённых эквивалентных цепей.

Работы, посвященные расчёту характеристик микрополосковых и щелевых линий, — [336-365]. При решении ИУ методом Галёркина [328, 329, 332, 347] наблюдается медленная сходимость решения. Причина этого — поведение электромагнитного поля вблизи металлического ребра [368-376] или способ задания системы базисных функций, имеющих особенность соответствующую условию Мейкснера [377]. Используют функции Бесселя полуцелого индекса [402]<sup>4</sup>, полиномы Гегенбауэра [397, 404], тригонометрические функции [403, 404], полиномы Чебышева [411, 395÷401] с соответствующими весовыми функциями. Родственный метод решения, учитывающий поведение поля на металлическом ребре, в применении к МПЛ приводится в [408]. В отличие от вышеперечисленных работ в [408] метод Галёркина используется в спектральной области. Базисные функции правильно учитывают асимптотику Фурье - образцов токов на полосках, которая определяется особенностью поведения токов на металлическом ребре. Методом Галёркина в спектральной области с учетом особенности поведения поля на ребре исследуются характеристики периодической микрополосковой линии [208] и экранированной щелевой линии [410].

Математическое моделирование микрополоскового вибратора в многослойных средах основано на выводе ИУ для его тока. Одномерное ИУ для полного тока вибратора [366] с учётом тензорной функции Грина слоистой среды имеет логарифмическую особенность. Это определяет ИУ для полного тока как уравнение Фредгольма первого рода. Изменение активной и реактивной составляющих входного импеданса из [366] представлено в Прил. А на рис. П.А.1.

Математическое моделирование тонкопроволочной антенны рассмотрено как частный случай уравнения Фредгольма первого рода – ИУ Поклингтона

---

<sup>4</sup> Математические особенности подобных расчётов крайне сложны - автор приводит результаты собственного расчёта  $\Gamma$  – функции Стирлинга и хочет отметить, что это очень трудно считаемые величины, для сравнения см. [468, 421, 519].

[224÷226]. Изменение активной и реактивной составляющих входного импеданса представлено в [520].

Значительно возрос интерес к исследованиям, направленным на более тщательное изучение факторов, определяющих полосу пропускания антенн, поскольку частотная зависимость входного импеданса антенны, обусловленная влиянием подстилающей среды, затрудняет качественное согласование антенны в широкой полосе частот.

Расширение рабочей полосы частот по качеству согласования входного импеданса возможно двумя способами:

- применением так называемых широкополосно – согласующих цепей на входе антенны при неизменной конструкции излучающей системы;
- оптимизацией формы (конструкции) излучающей системы с целью получения входного импеданса, мало меняющегося по частоте, - утолщение вибраторов, увеличение ширины щелей; различные приёмы взаимной компенсации нескольких отражений внутри излучающей системы путём рационального выбора точек питания и соответствующих шунтов [383].

Как правило, при анализе ЭМИ СШП излучения рассматривают возбуждение апертурной антенны [384, 385], реже - антенны с бегущей волной [386]. Однако перспективность применения антенны с бегущей волной (АБВ) как набора связанных отрезков плавных неоднородных линий передачи (НЛП) обусловлена тем, что частотные свойства таких отрезков зависят не только от длины линии, как у отрезков однородных линий передачи, но и от закона изменения волнового сопротивления. Кроме этого, в плавных НЛП легко реализуется один из эффективных способов трансформации волнового сопротивления за счёт изменения погонных параметров линии.

Термин «нерегулярная (неоднородная) линия передачи» является в известном смысле обобщающим. Он включает объекты различной физической природы, внешние параметры которых могут быть описаны ДУ, имеющими вид телеграфных уравнений длинной линии [387, 388]. Расчету классических и волновых матриц  $n$ -проводных связанных линий посвящены работы [389-393]. Отличительная особенность таких уравнений применительно к НЛП проявляется в зависимости коэффициентов ДУ от пространственных неоднородностей.

Вследствие этого элементы классических и волновых матриц отрезка НЛП, рассматриваемого в качестве некоторого эквивалентного четырехполюсника, также будут функциями координат.

Разработка теории плавных неоднородных линий и их проектирование основывается на теории цепей [394] и является важным самостоятельным разделом современной прикладной электродинамики. Наиболее полные данные по строгому подходу к анализу основных типов НЛП содержатся в [275].

В последнее время получили развитие методы, позволяющие рассчитать характеристики излучения СШП антенн, основанные на решении уравнения Поклингтона относительно неизвестного распределения тока в тонком электрическом вибраторе [322, 323, 333, 335, 413].

В общем случае в связанных токоведущих линиях распространяются волны, имеющие сложную структуру с продольными  $E$ - и  $H$ - составляющими [324]. Классификация волн, исходя из анализа условий их существования, представляет собой относительно мало изученную проблему даже в отношении простых конструкций одиночных токоведущих линий [210], не говоря уже о связанных структурах [275, 380]. Поэтому при моделировании токоведущих линий чаще всего исходят из концепции существования так называемых «квази  $T$ - волн» [380]<sup>5</sup>.

Существует несколько причин введения квази  $T$ - приближения:

- в настоящее время альтернативные решения, предоставляющие разработчикам ВЧ узлов более эффективный матричный аппарат анализа, крайне сложны [169];
- концепция нормальных волн как естественное расширение понятия «квази  $T$ - волна» применима для анализа структур с почти поперечными волнами, а также для структур с более сложной конфигурацией электромагнитного поля [325, 387, 388].

Ввиду сложности нахождения точных решений [437] основных уравнений НЛП для произвольной функции волнового сопротивления  $\rho_{волн}(x)$  широкое распространение получили приближённые методы, или методы параметрической оптимизации, которые можно разбить на две группы:

<sup>5</sup> Ранее они назывались ТЕМ – волнами:  $H_{10} \div TE_{10}, E_{11} \div TM_{11}, H_{11} \div TE_{11} \dots$  (ГОСТ 18238 – 72. Линии передачи СВЧ: Термины и определения).

- первая объединяет стандартные методы теории ДУ (метод неопределенных коэффициентов, представление в виде степенных рядов, разложение по малому параметру, сведение ДУ к ИУ с их последующим решением);

- вторая группа в своей основе содержит физические предпосылки, упрощающие исходные уравнения настолько, что могут быть найдены их замкнутые решения. Далее для простоты и наглядности представлены результаты второй группы.

### 3.2 Индуктивность как объект параметрической оптимизации

Классическим примером НЛП является длинная линия с непрерывно изменяющимися погонными параметрами – плавная неоднородная линия передачи, для которой коэффициент отражения  $\Gamma(x)$  как элемент матрицы рассеяния  $\|S\|$  и функция пространственной координаты  $x$  описываются уравнением Риккати (А. Л. Фельдштейн и Ф. Болиндер [275]):

$$\frac{d\Gamma}{dx} + 2 \cdot \gamma \cdot \Gamma + N \cdot \Gamma^2 - N = 0, \quad (3.1)$$

где  $\gamma(x)$  - постоянная распространения волны;  $N(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dx} \cdot \ln \rho_{волн}(x)$  - характеристическая функция НЛП (функция местных отражений).

Приближённое решение (3.1) идентично элементу  $S_{11}$  матрицы рассеяния  $\|S\|$  [275]. Как правило, оно ищется для граничных условий  $\rho_{волн}(0) = 50; 75$  Ом и  $\rho_{волн}(l) \approx 376.68$ (воздух);  $94.25$ (среда) Ом.

Из (3.1) следует, что волновое сопротивление и коэффициент замедления являются сложными функциями пространственной координаты. Это означает, что в процедуре параметрической оптимизации антенны подповерхностного зондирования компонентами вектора варьируемых параметров являются размеры поперечных (параллельных дневной поверхности) сечений токоведущих линий антенны.

Здесь из четырёх антенн, представленных на рис. 2.1, используется микрополосковая антенна (МПА) [419], поэтому особый интерес представляют две постоянные времени, характерные для эквивалентной схемы несимметричной

связанной полосковой линии -  $\tau_I = L/R$ ,  $\tau_U = C/G$ <sup>6</sup>. Первая постоянная времени обуславливает трансформацию тока в телеграфных уравнениях, вторая – трансформацию напряжения.

Поскольку ударное возбуждение антенны производится ДДРВ генератором, излучение антенны подповерхностного зондирования происходит в режиме больших импульсных токов, когда антенна проявляет себя как магнитный диполь [316], наиболее полной электродинамической характеристикой которого является погонная индуктивность. Покажем это.

Пусть отрезок НЛП длиной  $l$  включен между двумя полубесконечными регулярными линиями передачи с различными волновыми (характеристическими) сопротивлениями  $\rho_{волн1}$  и  $\rho_{волн2}$  (рис. 3.1). Выделим элементарный участок длиной  $\Delta x$ , малый настолько, что в его пределах погонные сопротивление  $R(x)$ , проводимость  $G(x)$ , индуктивность  $L(x)$  и ёмкость  $C(x)$  можно полагать не зависящими от координаты  $x$ . Допуская в пределах этого отрезка поперечный характер электромагнитного поля (основное допущение теории НЛП для  $T$ -волн [326]), можно записать систему ДУ для напряжения  $U(x)$  и тока  $I(x)$  в виде

$$\frac{dU(x)}{dx} = Z(x) \cdot I(x), \quad \frac{dI(x)}{dx} = Y(x) \cdot U(x), \quad (3.2)$$

где  $Z(x) = R(x) + j\omega \cdot L(x)$  и  $Y(x) = G(x) + j\omega \cdot C(x)$  – комплексные сопротивление и проводимость на единицу длины. Связь (3.1) и (3.2)

устанавливает величина  $\rho_{волн}(x) = \sqrt{\frac{Z(x)}{Y(x)}}$  – характеристическое (волновое)

сопротивление, тогда в (3.1)  $\gamma(x) = \sqrt{Z(x) \cdot Y(x)}$ . Для совместного решения (3.1) и (3.2) вводят понятие «входной импеданс» как

$$Z_{вх}(x) = \rho_{волн}(x) \cdot \frac{1 + \Gamma(x)}{1 - \Gamma(x)},$$

имеющий Фурье - образ вида  $Z_{вх}(\omega) = [R_a(\omega) + j \cdot X_a(\omega)]^7$ ; где  $R_a(\omega)$ ,  $X_a(\omega)$  – измеряемые величины. Аналогичные Фурье - образы можно получить как из

<sup>6</sup>Известное условие Хевисайда -  $L / C = R / G$ , которое равнозначно равенству  $\tau_I = \tau_U$ . Линию, удовлетворяющую таким требованиям, называют линией без искажений [394]. Для электродинамики использовано А.Зоммерфельдом [509].

прямых измерений  $K_U$  нахождением коэффициента отражения  $\Gamma(\omega)$  для  $\Gamma(x)$  из (3.1), так и составляющих  $Z(x)$  и  $Y(x)$  из (3.2) -  $L_a(\omega)$  и  $C_a(\omega)$ , при этом  $R_a(\omega)$ - Фурье - образ  $R(x)$ ,  $G_a(\omega)$ - Фурье - образ  $G(x)$ . Таким образом, для всех входящих в уравнения (3.1) и (3.2) величин существуют измеряемые Фурье - образы.

Компоненты вектора варьируемых параметров в виде элементов R,L,G,C можно представить как импеданс четырехполюсника в виде:

$$\rho_{волн} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt[4]{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{G^2 + \omega^2 C^2}} \cdot e^{j\theta}, \quad (3.3)$$

$$\text{где } \theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\omega(G \cdot L - R \cdot C)}{R \cdot G + \omega^2 \cdot L \cdot C}.$$

фаза между током и напряжением.

Импеданс подстилающей среды запишем как

$$Z_{среда} = \sqrt[4]{\frac{\mu_\alpha^2}{\epsilon_\alpha^2 + \frac{\sigma_\alpha^2}{\omega^2}}} \cdot e^{j\theta_{среда}}, \quad (3.4)$$

где  $\theta_{среда} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( -\frac{\sigma_\alpha / \omega}{\epsilon_\alpha} \right)$  - фазовая характеристика среды.

Здесь аргумент функции  $\theta_{среда}$  в (3.4) - известные граничные условия Леонтовича – Щукина [291]: отношение плотности токов проводимости  $\delta_{np}$  к плотности токов смещения  $\delta_{см}$ :

$$\frac{\delta_{np}}{\delta_{см}} = \frac{\sigma_\alpha}{\omega} : \epsilon_\alpha.$$

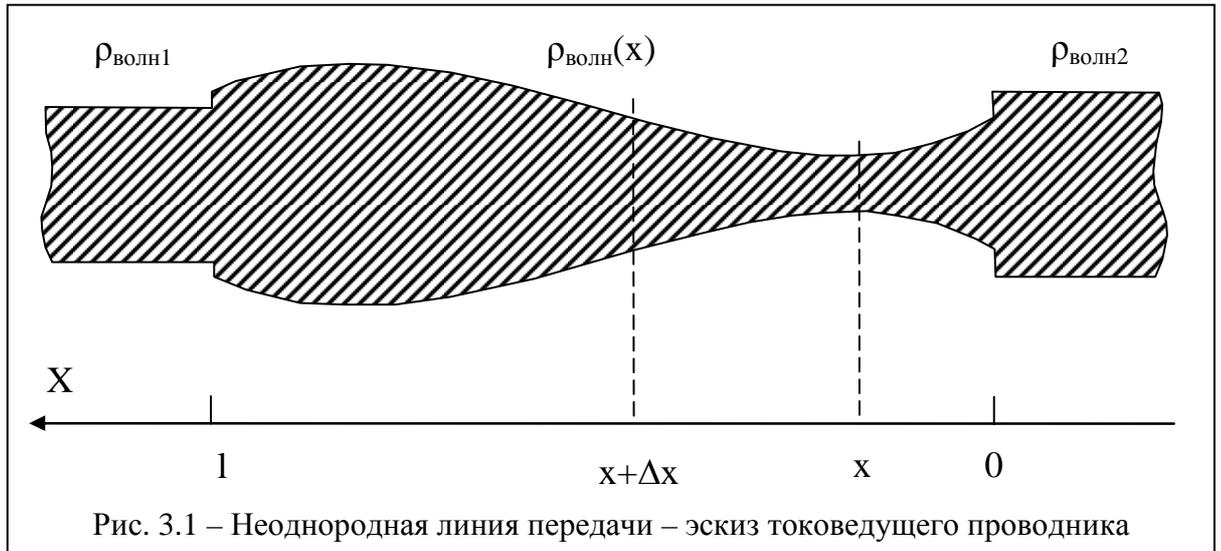
Рассмотрим синфазность волнового сопротивления антенны и импеданса среды:

$$\theta = \theta_{среда} \Rightarrow \frac{\omega(G \cdot L - R \cdot C)}{R \cdot G + \omega^2 \cdot L \cdot C} = -\frac{\sigma_\alpha / \omega}{\epsilon_\alpha}, \quad (3.5)$$

ИЛИ

<sup>7</sup> Очевидно, что при учёте подстилающей среды входной импеданс антенны изменится на величину взаимного импеданса между антенной и её зеркальным отражением  $Z_{12}$  [383].

$$\frac{\omega^2(G \cdot L - R \cdot C)}{R \cdot G + \omega^2 \cdot L \cdot C} = -\frac{\sigma_s}{\varepsilon_\alpha} \quad (3.6)$$



Очевидно, что

$$\lim_{G \rightarrow 0} \frac{\omega^2(G \cdot L - R \cdot C)}{R \cdot G + \omega^2 \cdot L \cdot C} = -\frac{R}{L} \quad (3.7)$$

и

$$\lim_{G \rightarrow 0} \frac{R}{L} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_\alpha} \quad (3.8)$$

Следовательно, для согласования волновых сопротивлений антенны и среды по фазовым распределениям необходимо соблюдение соотношения (3.8), где  $\varepsilon_\alpha = \varepsilon \varepsilon_0$ ;  $\varepsilon_0 = 1/36\pi \cdot 10^9$  [Ф/м];  $\varepsilon_\alpha, \sigma_s$  - чисто электродинамические характеристики [281]. Для большинства сред правая часть (3.8) в низкочастотном пределе составляет величину порядка 7 МГц.

### 3.2.1 Моделирование параметров погонной индуктивности с учётом влияния земли

Наиболее характерным примером НЛП (рис. 3.1) является неоднородная несимметричная полосковая линия передачи [334]. Для неё рассмотрим поведение  $R(x), L(x), C(x), G(x)$  с учётом влияния поверхности [414]. Расчет  $C(x)$  производится методом конформных отображений [275] с учётом рис. 3.2. При малых  $t$  (без учёта влияния земли)

$$C(x) = 17.7 \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon) \cdot \left\{ 1 + \frac{2 \cdot \rho}{b} + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{t}{b} \left[ 1 + \ln \left( 1 + \frac{b}{t} \right) \right] \right\} \approx \frac{17.7 \cdot \varepsilon}{36\pi \cdot 10^9} = 1.565 \cdot \varepsilon \cdot 10^{-10} [\Phi / \text{м}].$$

С учётом влияния земли [291] для положения антенны, показанного на рис. 3.3б,

$$C(x) = \frac{\pi \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon)}{\ln \left( \frac{h}{\rho} \cdot \frac{d}{\sqrt{4 \cdot h^2 + d^2}} \right)} = \frac{\pi \cdot (\varepsilon_0 \cdot \varepsilon)}{\ln \left( \frac{d}{\rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{4 + d^2 / h^2}} \right)} \approx \frac{\pi \cdot \varepsilon}{3.6 \cdot 36\pi \cdot 10^9} \approx 7.7 \cdot \varepsilon \cdot 10^{-12} [\Phi / \text{м}].$$

По порядку величин для  $C(x)$  выбирается выражение без учёта влияния земли как наилучший вариант. Его можно записать как

$$C(x) = a + \kappa_1 \cdot \rho, \text{ где } a, \kappa_1 - \text{Const.}$$

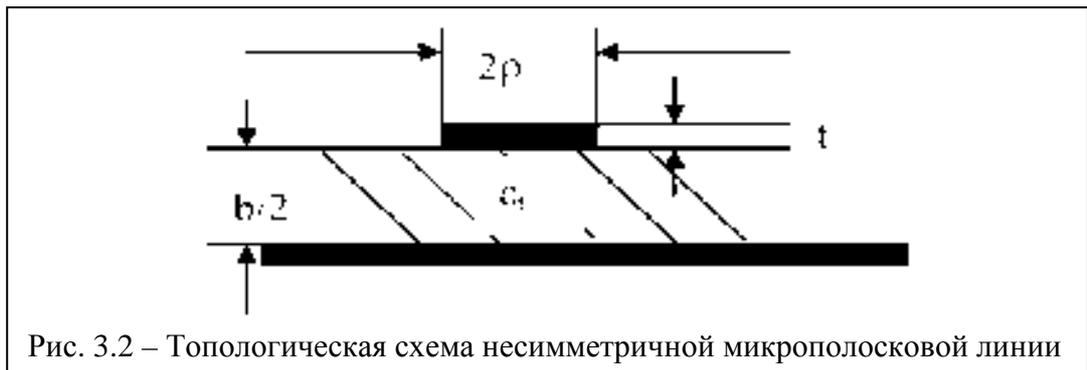
Для схемы НЛП (рис. 3.2) с проводимостью токоведущего проводника  $\sigma$

$$R(x) = (\sigma \cdot 2\rho \cdot t)^{-1},$$

т. е.  $R(x) = (\kappa_2 \cdot \rho)^{-1}$ , где  $\kappa_2 - \text{const}$ . Поскольку проводимость  $G(x)$  состоит из параллельно включённых проводимостей токоведущего проводника  $\sigma$  и проводимости материала подложки  $\sigma_{\text{подл}}$ , то  $G(x) = \sigma + \sigma_{\text{подл}} \rightarrow \sigma$  из-за малой величины тангенса угла диэлектрических потерь в подложке. Тогда закон изменения  $\rho_{\text{волн}}(x)$  примет вид

$$\rho_{\text{волн}}(x) = \sqrt{\frac{(\kappa_2 \cdot \rho)^{-1} + j\omega \cdot L(x)}{\kappa_2 \cdot \rho + j\omega \cdot (a + \kappa_1 \cdot \rho)}}.$$

$L(x)$  берем из схемы, предложенной в [414] и представленной на рис. 3.3.



Из обхода контура «крыло АБВ – подстилающая поверхность – крыло АБВ» (рис. 3.3б) следует, что приложенное напряжение расходуется на преодоление э.д.с. самоиндукции  $L_{11} dx \cdot \frac{dI_1}{dt}$  и э.д.с. взаимоиндукции  $L_{12} dx \cdot \frac{dI_2}{dt}$  ( $I_1$  – ток в

первом «крыле»,  $I_2$  - ток во втором «крыле»). Собственная индуктивность<sup>8</sup> АБВ состоит из индуктивностей «крыльев»  $L_{11}$ ,  $L_{22}$ , их взаимной индуктивности  $L_{12}$  и может быть представлена как

$$L(x) = L_{11} + L_{22} + L_{12}. \quad (3.9)$$



Рис. 3.3 – Схема учета взаимного расположения элементов АБВ и подповерхностной среды ( $d$  – погонное расстояние между токоведущими элементами (о-«крыльями») антенны;  $h$  – погонная высота токоведущего элемента антенны (о) над поверхностью измерения);  
Рис. 3.3а- положение и расстояния между токоведущими элементами антенны (о) – в плане;  
Рис. 3.3б- положение и расстояния между токоведущими элементами микрополосковой антенны в разрезе

Без учёта влияния земли так называемая индуктивность с расщеплёнными проводами (рис. 3.3а)

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{d^2}{\rho \cdot \Delta} + \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{\xi}{4} \right). \quad (3.10)$$

В (3.10)  $\xi$  - коэффициент, учитывающий поверхностный эффект - зависимость изменения составляющей погонной индуктивности от циклической частоты  $\omega$ , проводимости материала антенны  $\sigma$  и ширины токопровода  $\rho$  [414]:

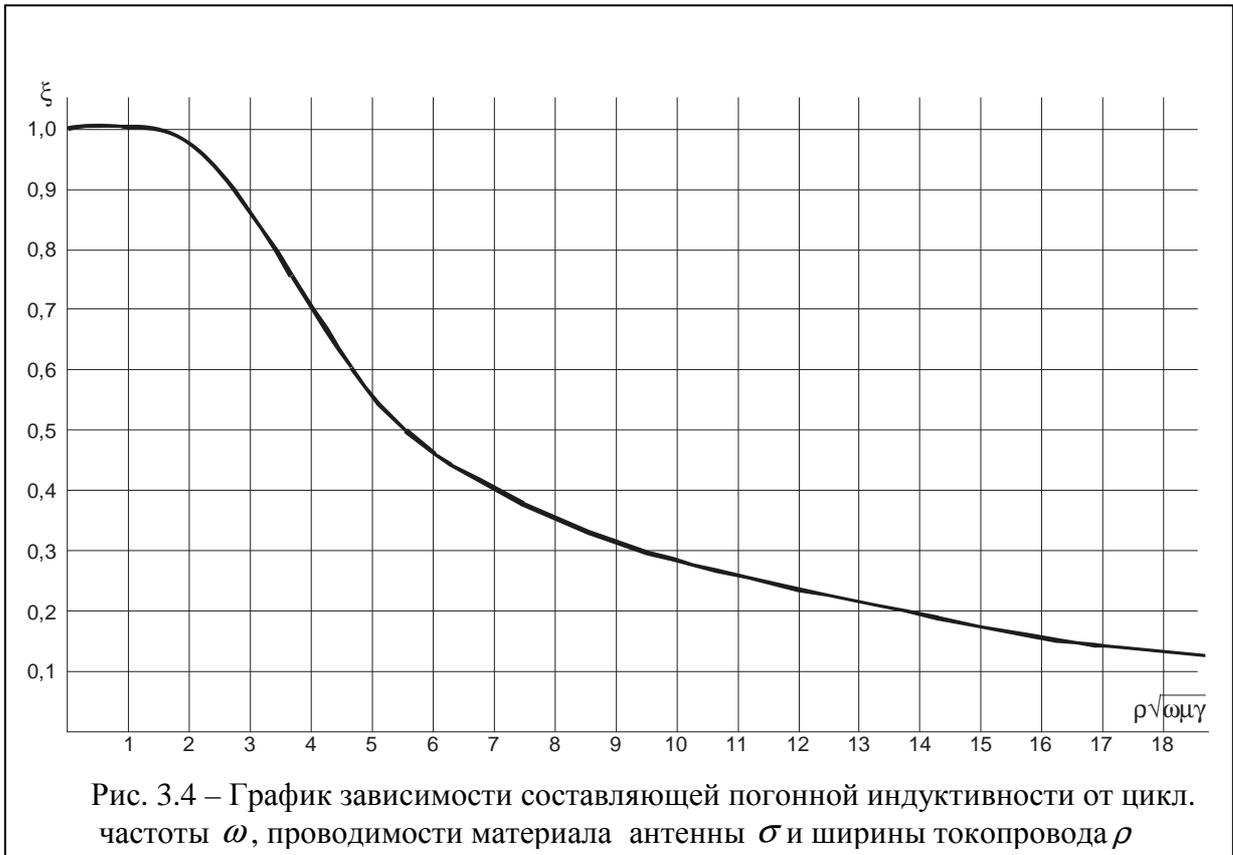
$$\xi = \frac{4}{k \cdot \rho} \cdot \frac{ber(k \cdot \rho) \cdot ber'(k \cdot \rho) + bei(k \cdot \rho) \cdot bei'(k \cdot \rho)}{(ber'(k \cdot \rho))^2 + (bei'(k \cdot \rho))^2},$$

где  $ber(...)$ ,  $bei(...)$  – функции Томсона и их производные [469];  
 $k = \sqrt{\omega \mu \sigma}$ ,  $\dim[k] = m^{-1}$ ;  $\dim[\xi] = \text{отн.ед.}$   $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Зависимость коэффициента  $\xi$  от  $k \cdot \rho = \rho \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$  приведена на рис. 3.4 (составлена по данным табл. 2.1 [414]). Например, для ширины полосы ( $\Delta f$ ) частот в две октавы (10 МГц ÷ 1 ГГц), положив  $2\rho \approx 0.0168$  м,  $\sigma = 5.814 \cdot 10^7$  См/м - проводимость меди при  $t = 20^\circ C$ , находим:

<sup>8</sup> Здесь и далее под индуктивностью понимается погонная индуктивность с размерностью  $\dim = \text{Гн/м}$ .

$$k \cdot \rho = \rho \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma} \in \left[ \rho (\sqrt{\sigma \cdot \mu \cdot 2\pi \cdot 10\text{MHz}} \div \sqrt{\sigma \cdot \mu \cdot 2\pi \cdot 1\text{GHz}}) \right] \approx \\ \approx [569.1 \div 5691] \Rightarrow \xi \rightarrow 0.$$



Из этих результатов оценивания  $k \cdot \rho$  для коэффициента  $\xi$  следует, что физические параметры антенны, при которых  $\xi \rightarrow 0$ , существуют.

По определению

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln g, \quad \ln g = \frac{1}{S_1 \cdot S_2} \int_{S_1} \int_{S_2} \ln \eta \cdot ds_1 \cdot ds_2, \quad (3.11)$$

где  $g$  - среднее геометрическое расстояние (с.г.р.) площади поперечного сечения токопровода, определение дано в [414];  $\eta$  - расстояние между произвольными металлическими элементами площади первого и второго крыльев антенны  $ds_1$  и  $ds_2$ .

Общепринятая фигура для нахождения с.г.р.  $g$  приведена на рис. 3.3 для схемы учета взаимного расположения элементов антенны (рис. 3.3а) и подповерхностной среды (рис. 3.3б). С учётом влияния подстилающей поверхности и результатов моделирования коэффициента  $\xi$  ( $\xi \rightarrow 0$ )

индуктивность с расщеплёнными проводами  $L_{11}$  из (3.9) можно записать как [414]

$$L_{11} = L_{11}(\xi = 0) - \Delta L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{4 \cdot d^2 \cdot h^2}{(4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta} \rightarrow const, \quad (3.12)$$

где  $\Delta L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \ln \left( 1 + \frac{d^2}{4 \cdot h^2} \right) \right)$  – изменение индуктивности за счёт влияния земли.

Требование  $L_{11} \rightarrow const$  вытекает из очевидного условия согласования антенны со средой  $\Gamma(\omega) \rightarrow \Gamma(x) \rightarrow 0$ , тогда из (3.3) и (3.4) следует  $L_{11} \rightarrow \mu_a \rightarrow const$  в пространстве.

«Крылья» антенны симметричны, поскольку они через угол раскрыва антенны задают направление излучения, т. е.  $L_{11} = L_{22}$ , а значение под логарифмом – масштабный коэффициент антенны, в (3.12) коэффициент «4» можно вынести за  $\ln(\dots)$ . Предположим

$$\ln \frac{d^2 \cdot h^2}{(4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta} = 1, \quad (3.13)$$

тогда  $\frac{d^2 \cdot h^2}{(4h^2 + d^2) \rho \Delta} = e = 2.78\dots$ , или  $d^2 \cdot h^2 = 2,78 \cdot (4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta$ . (3.14)

Из этого следует, что текущая толщина токопроводов  $\rho$  и расстояние между ними  $\Delta$  (ширина щели) являются функцией вида антенны  $d = f(h)$ , где  $h$  – высота над уровнем подстилающей поверхности. Требование  $L_{11} \rightarrow const$  означает, с одной стороны, что для  $L(x)$  из (3.12) переходим к погонным параметрам с учётом влияния поверхности земли (рис. 3.3б), с другой стороны – возможно задание целевой функции для размеров поперечных сечений токоведущих линий антенны.

Размеры поперечных сечений токоведущей линии и щели вида

$$\rho \cdot \Delta = \frac{d^2 \cdot h^2}{2,78(4 \cdot h^2 + d^2)} \quad (3.15)$$

представляют собой уравнение АБВ подповерхностного зондирования [279, 419, 420].

Из (3.15) можно получить целевую функцию в виде

$$\chi = \rho \cdot \Delta - \frac{d^2 \cdot h^2}{2,78(4 \cdot h^2 + d^2)}, \quad \chi \rightarrow \min.$$

Изменение условия (3.14) приводит лишь к изменению коэффициента в знаменателе, т.е. значение логарифма - масштабный коэффициент антенны.

Рассчитанная (Прил. А) суммарная индуктивность  $L_{\text{расч}}$  СШП антенны (рис. 3.5)  $\sim 14.9$  нГн; измеренная с помощью лабораторной установки на базе ОБЗОР-103 интегральная по частоте индуктивность  $L_{\text{изм}} \sim 16.65$  нГн (рис. 3.7). Погрешность  $\Delta L \sim 5.4$  %. Погрешность самого метода среднего геометрического расстояния  $\approx 8\%$  [368].

Таким образом, при соблюдении условия (3.15) погонная индуктивность может

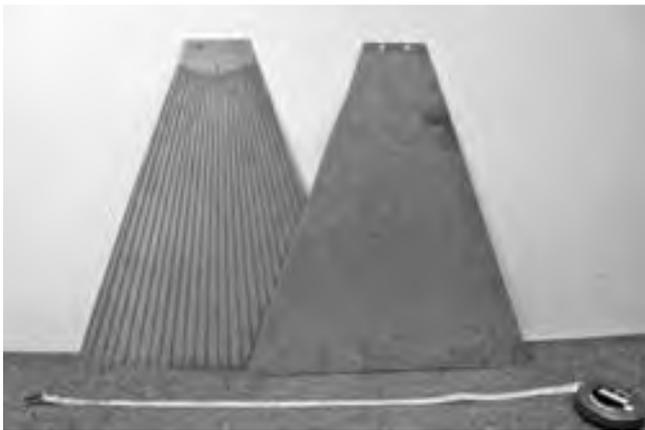


Рис.3.5 – Внешний вид микрополосковой антенны



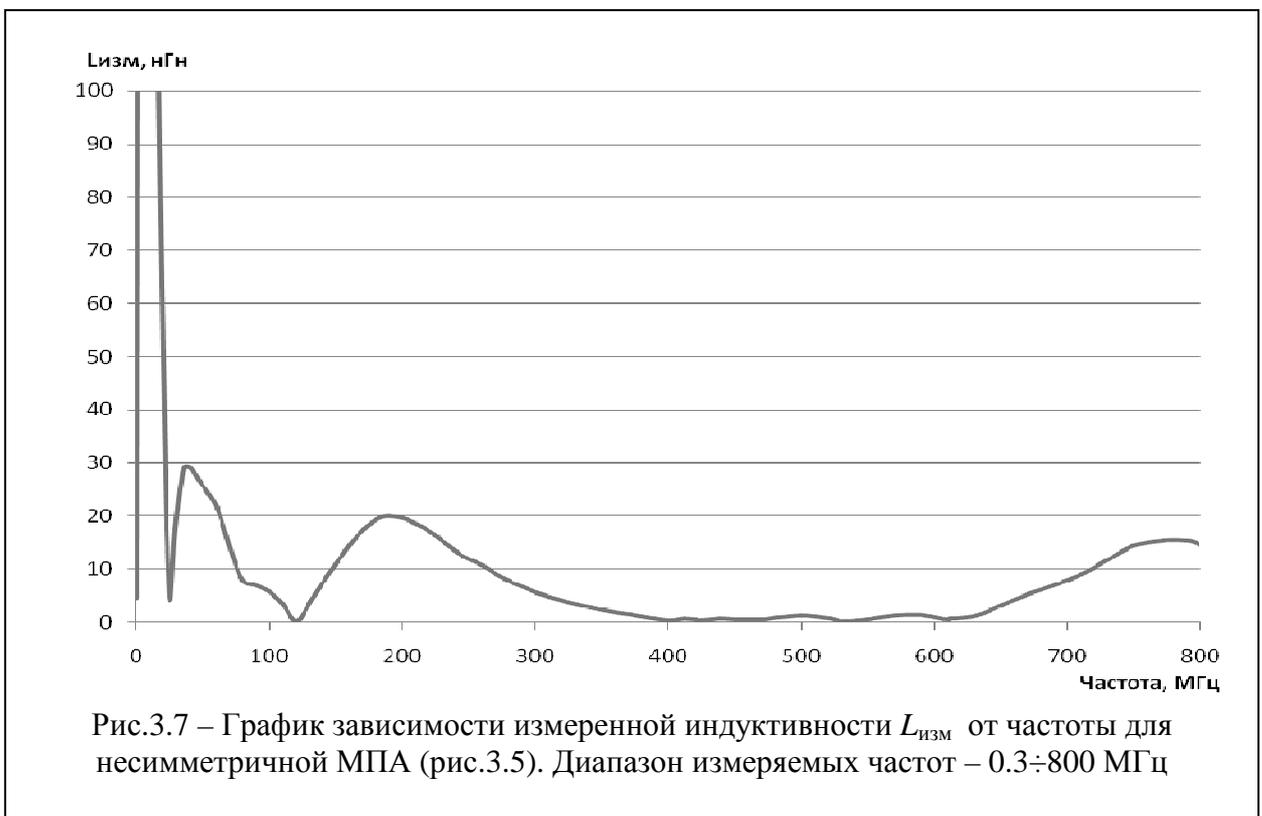
Рис.3.6 – Размеры поперечных сечений токопровода и щели вида (3.15)

не зависеть от высоты до поверхности измерения и от расстояния между токоведущими элементами («крыльями») антенны. Ранее считалось, что должно быть  $d \geq 5..6 \cdot b$  [415].

### 3.2.2 Результаты экспериментальных измерений частотных характеристик неоднородной МПА подповерхностного зондирования

Антенна бегущей волны, разработанная в соответствии с (3.15), состоит из связанных неоднородных несимметричных микрополосковых линий (рис. 3.5,

3.6)<sup>9</sup>, т.е. представляет собой неоднородную МПА подповерхностного зондирования [279, 419, 420]. Для проверки работоспособности зависимости (3.15) для антенны зондирования [279, 419, 420] проведены измерения её частотных характеристик как АБВ подповерхностного зондирования (измерения проводились на сухом бетоне). Частотные характеристики антенн в полосе от 300 кГц до 1.5 ГГц получены с помощью измерителя параметров четырехполюсника ОБЗОР-103. Вид лабораторной установки на базе ОБЗОР-103 представлен на рис. 2.2, её характеристики даны в [290, 299]. Сравнивались две антенны: для первой  $\chi \rightarrow \min$ , для второй —  $\rho = \Delta$  («меандровая» полоска).



Внешний вид неоднородной (переменной по ширине токопровода) МПА приведен на рис. 3.5, 3.6.

Известно, что для получения низкого КСВН ( $K_V$ ) в длинноволновой части диапазона приёмных СШП антенн распределённая нагрузка должна быть протяжённой (например, РК - кабель), поэтому для согласования собственно

<sup>9</sup> Антенна аналогичного вида в устройстве для поиска мин приведена на с.151-152 в Daniels, D. J. Ground Penetration Radar. – 2004; The Institution of Electrical Engineers, London. UK.-723 p.

приёмной СШП антенны и РК–кабеля с приёмным устройством рациональнее использовать сосредоточенный резистор. Для обеспечения согласования в широкой полосе частот [369, 370] желательно резистор установить в торце регулярной короткозамкнутой коаксиальной линии. Для резисторов паразитную ёмкость можно ориентировочно определить по формуле

$$C_p = 0.885 \cdot \epsilon_r \cdot l \cdot b / h,$$

где  $l, b, h$  – геометрические параметры резистора. Для резисторов типа Сб-4, Сб-9 ёмкость составляет 0.085 пФ.

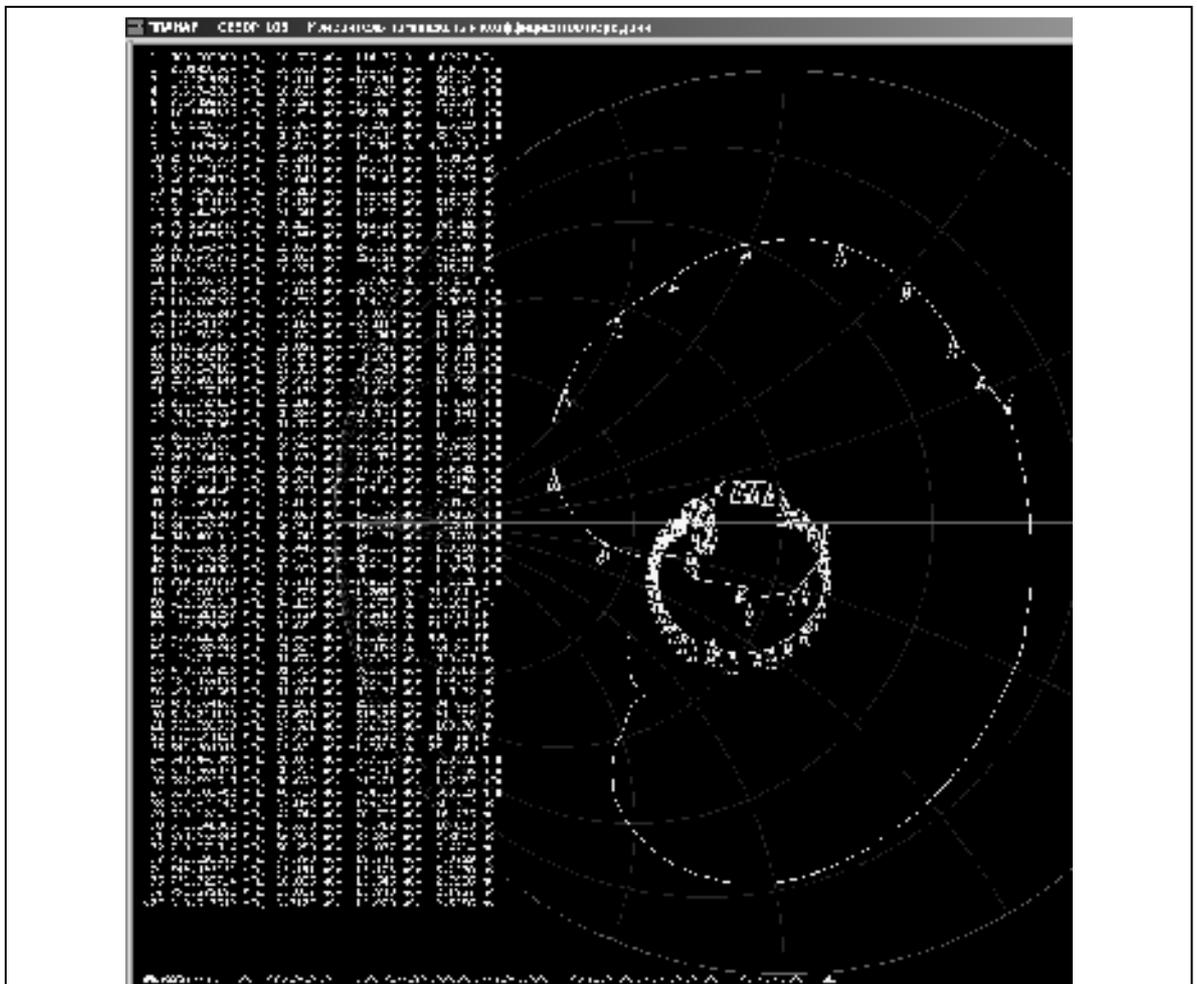


Рис. 3. 8 - Результаты измерений погонных параметров по столбцам: - № измерений по порядку; - значение частоты, на которой проводилось измерение; - величина проводимости на данной частоте; - изменение проводимости по отношению к значению на предыдущей частоте; - значение индуктивности или ёмкости на данной частоте. Справа показано положение точки значения частоты на диаграмме Вольперта - Смита, соответствующей данной антенне

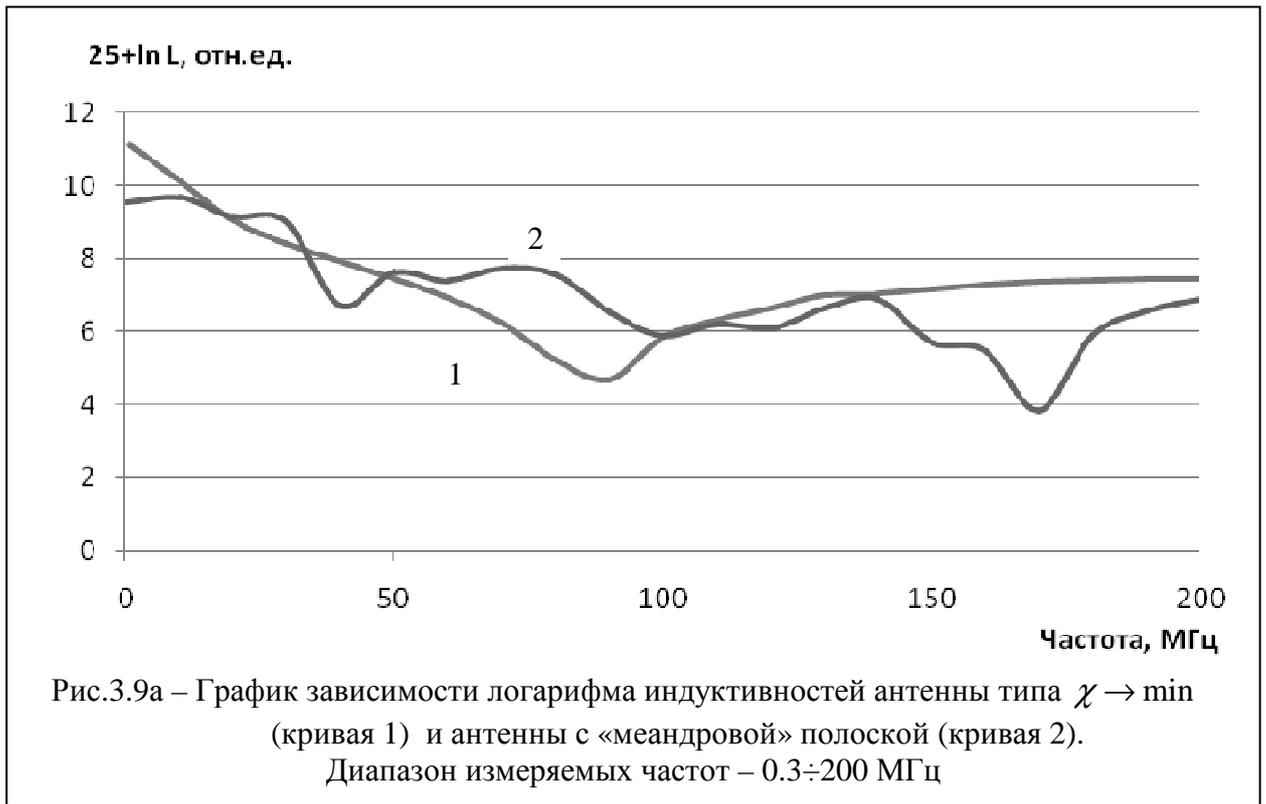
Компенсация емкостей может быть выполнена введением компенсирующей индуктивности. Погонная индуктивность находится по формуле:

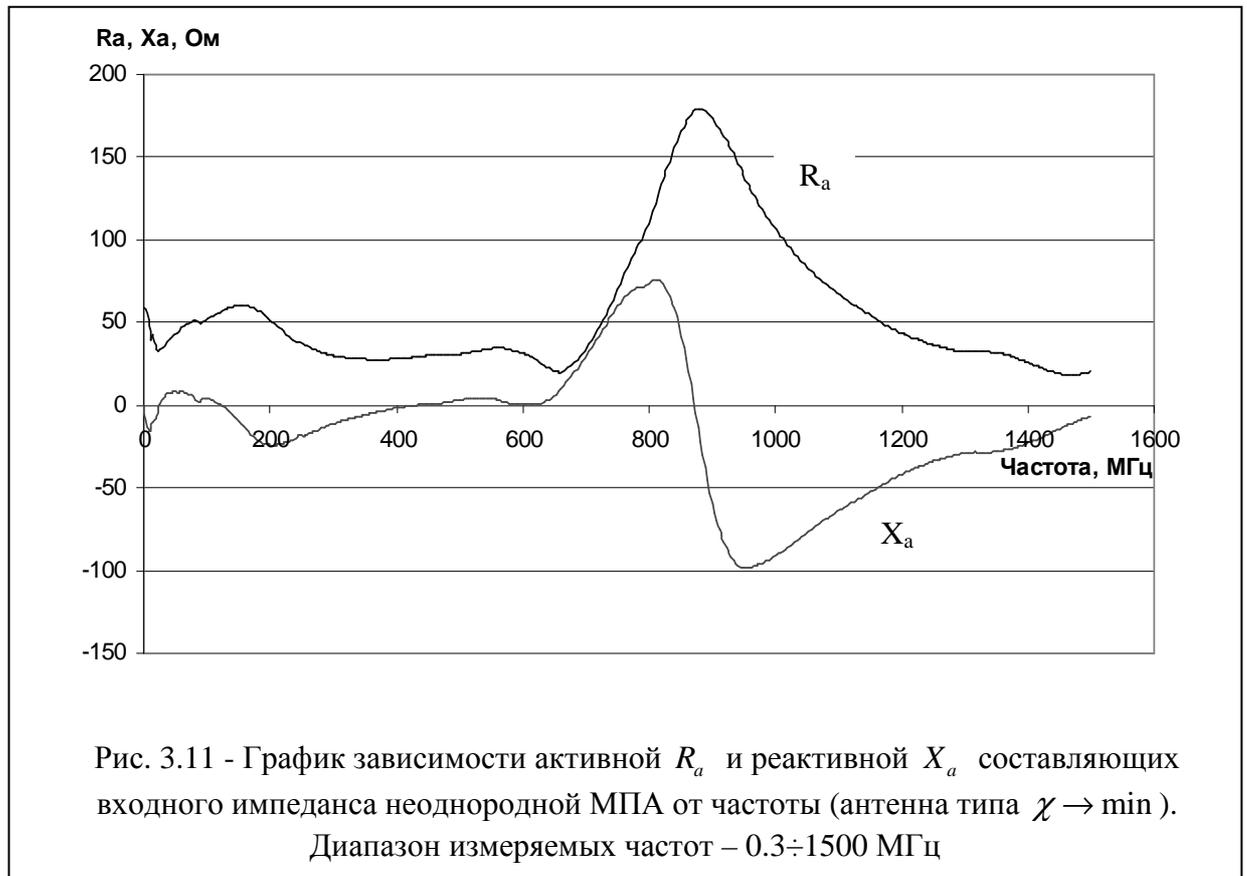
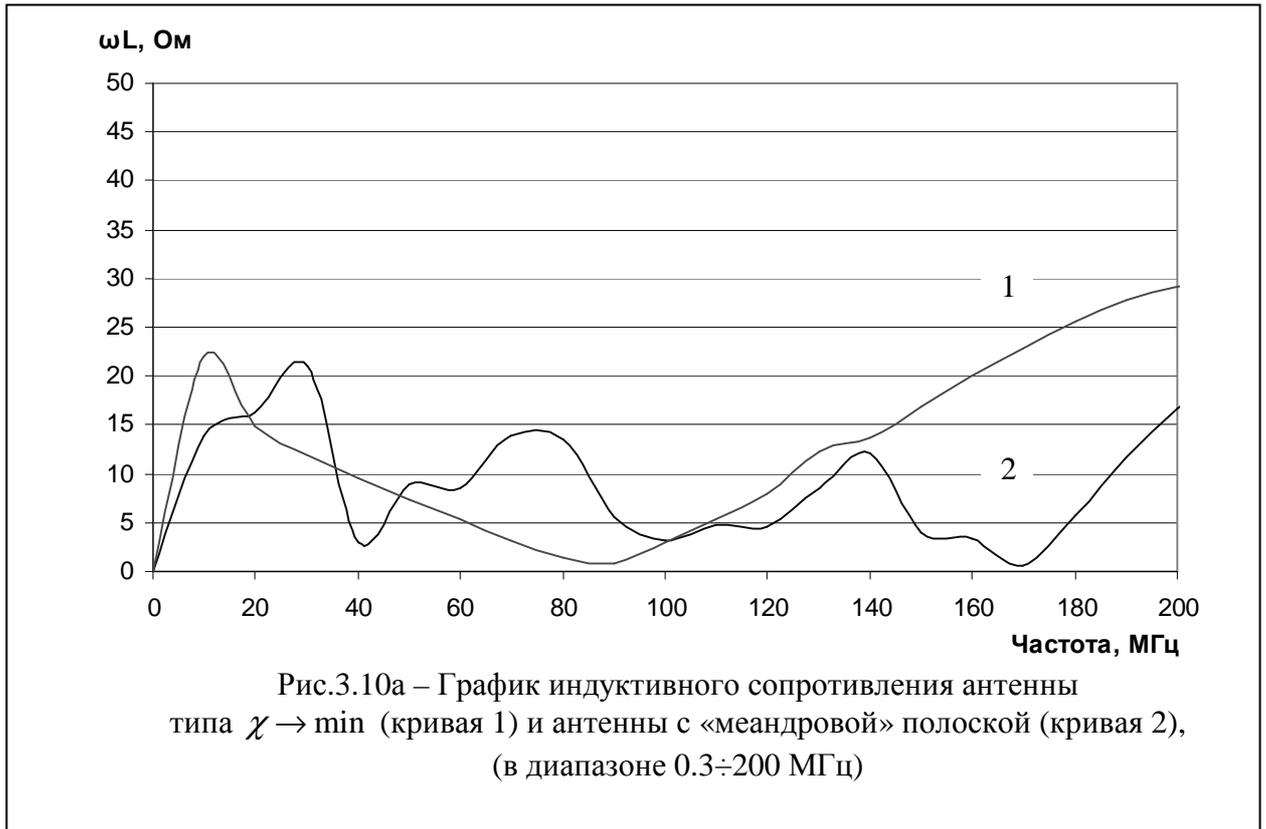
$$L_p = (\mu_0 / 2\pi) \cdot \ln(D / d),$$

где  $D$ ,  $d$  – диаметры внешнего и внутреннего торца регулярной короткозамкнутой коаксиальной линии. Для такого антенно – фидерного устройства (собственно антенна; РК- кабель; СВЧ – тройник с согласующим резистором) выполнены измерения погонных параметров в частотной области. Результаты измерений приведены на рис. 3.8. Обращают на себя внимание значения индуктивности на частоте 120.58 МГц – 195.92 пГн ( $195.92 \cdot 10^{-12}$  Гн), в районе 400 МГц —  $68.1 \cdot 10^{-12}$  Гн и т.д. Подобные величины позволяют говорить о том, что такой способ задания индуктивности позволяет реализовывать величины в десятки пикагенри и единицы пикофарад.

По результатам измерений компонент Фурье - образа входящих в (3.3) варьируемых параметров (рис. 3.8) построены графики зависимостей индуктивностей от частоты для двух антенн (рис. 3.9, 3.9а). Очевидно, что  $\tau_1$  первой антенны меньше  $\tau_1$  второй в диапазоне частот 0.3÷700 МГц.







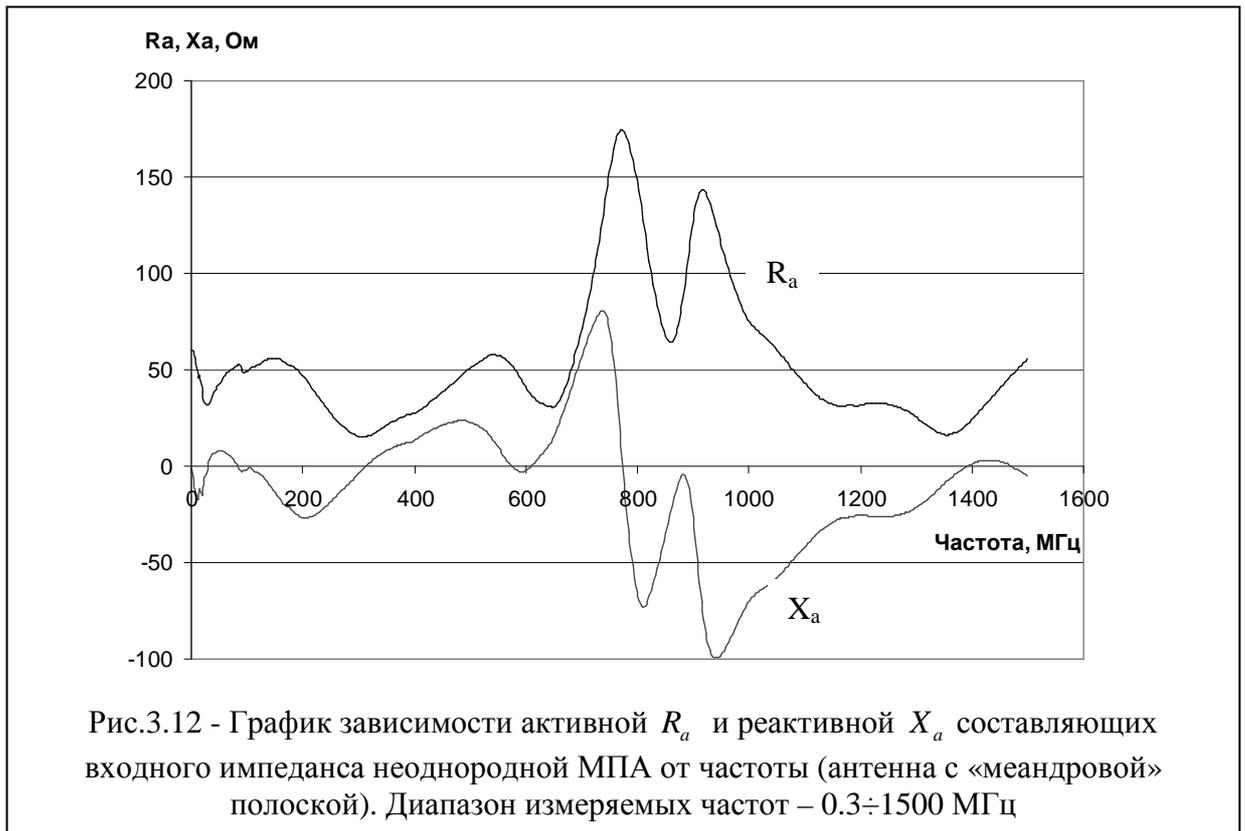
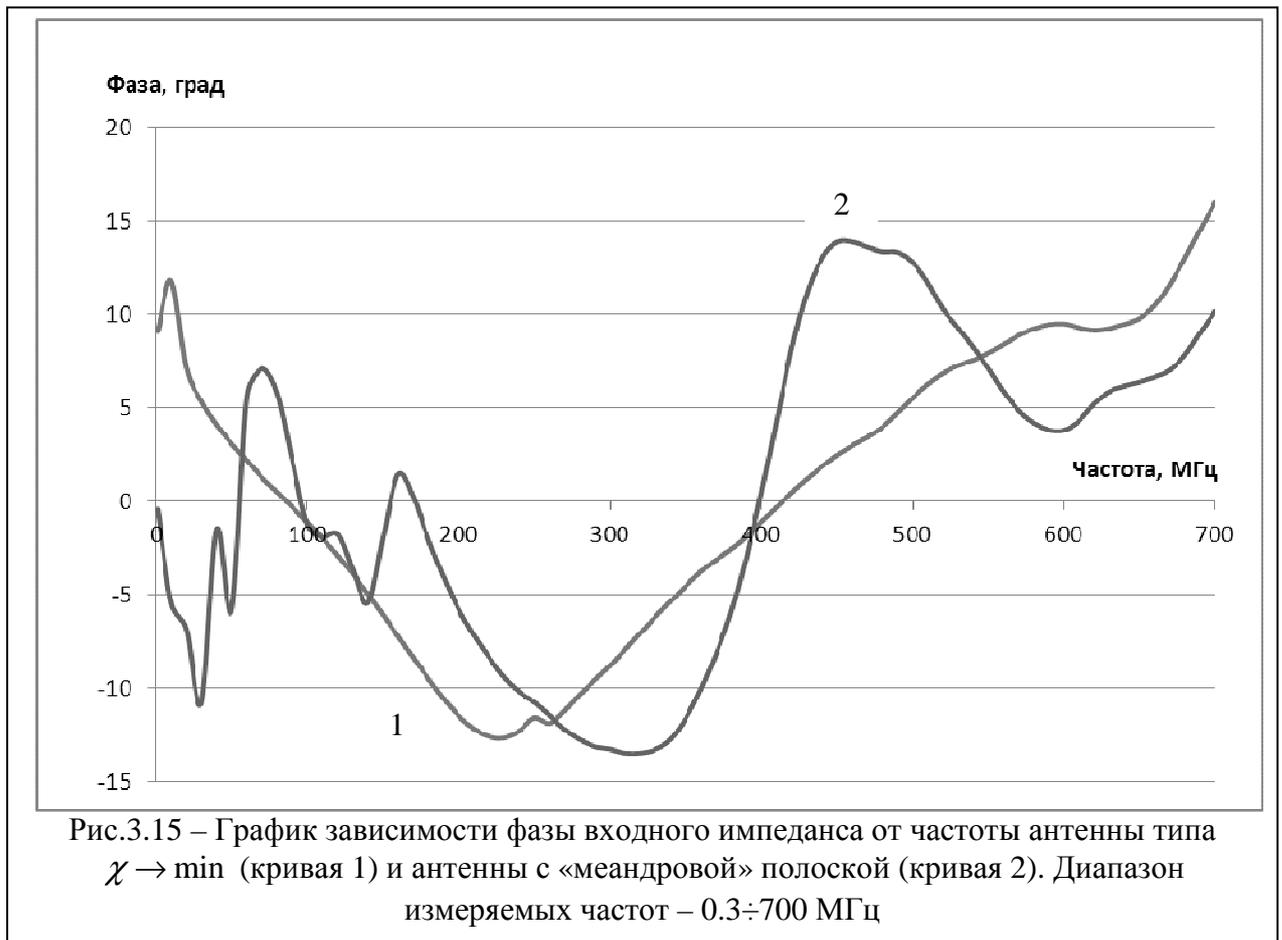
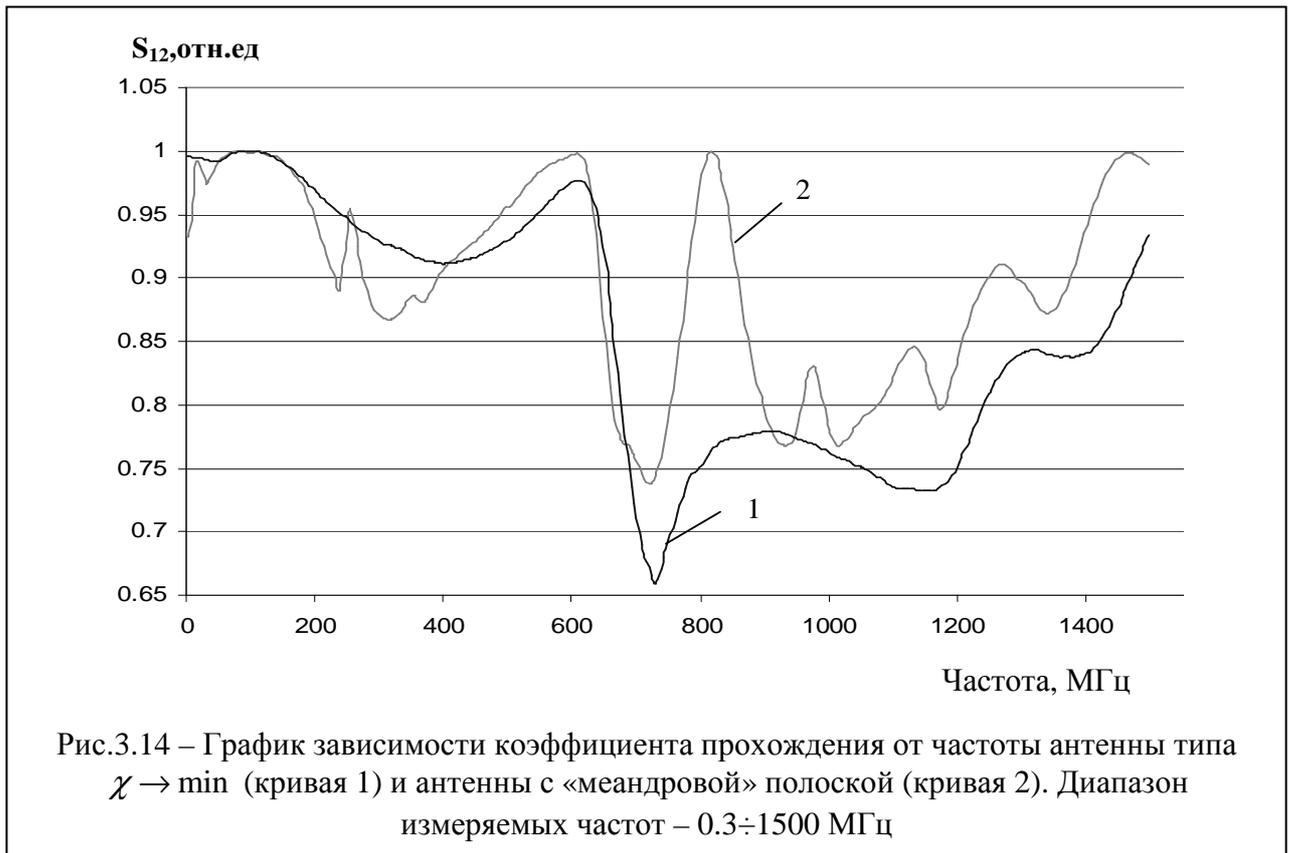


Рис.3.12 - График зависимости активной  $R_a$  и реактивной  $X_a$  составляющих входного импеданса неоднородной МПА от частоты (антенна с «меандровой» полоской). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷1500 МГц



Рис.3.13 – График зависимости коэффициента отражения от частоты антенны типа  $\chi \rightarrow \min$  (кривая 1) и антенны с «меандровой» полоской (кривая 2). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷1500 МГц



Все данные, представленные на рис.3.7÷3.15, получены экспериментально на лабораторной установке (рис. 2.2), включающей ОБЗОР-103<sup>10</sup>.

### 3.2.3 Анализ полученных экспериментальных данных<sup>11</sup>

Из приведенных на рис. 3.11, 3.12 графиков зависимости активной  $R_a$  (кривая 1) и реактивной  $X_a$  (кривая 2) составляющих входного импеданса очевидно, что  $\partial R_a / \partial f$  первой антенны меньше  $\partial R_a / \partial f$  второй (рис. 3.11, 3.12 – кривая 1), т.е. первая антенна частотно менее зависима, чем вторая; у первой антенны резонанс токов по частоте выше ( $R_a \rightarrow R_a \max$  при 882 МГц), чем у второй -  $R_a \rightarrow R_a \max$  при 770.7 и 917 МГц. Реактивная составляющая  $X_a$  первой антенны (рис. 3.11 – кривая 2) в диапазоне частот 20÷100 МГц носит индуктивный характер ( $0 \leq X_a \leq 12$  Ом), в диапазоне частот 100÷400 МГц – емкостной ( $X_a \max - 25$  Ом), в диапазоне частот 400÷600 МГц - индуктивный ( $0 \leq X_a \leq 6$  Ом). У второй антенны во всём диапазоне частот  $X_a$  носит переменный индуктивно – ёмкостной характер  $\pm 25$  Ом (рис. 3.12 - кривая 2). В диапазоне частот 0÷700 МГц у первой антенны  $Z_{ex} = 40.1 + j \cdot 27.1$  Ом, у второй -  $Z_{ex} = 39.8 + j \cdot 40.1$  Ом.

Спектр собственных частот обеих антенн: число точек резонансов напряжений ( $X_a = 0$ )- 3 у первой (24.66; 122.15; 429.6 МГц) и 6 у второй (28.42; 86.4; 313.3; 575.6; 609.5; 774.5 МГц); резонансов токов ( $R_a \rightarrow R_a \max$ ) у первой антенны – 1 (882 МГц), у второй – 2 (770.6; 917 МГц). Это свидетельствует о том, что влияние  $L(x)$  первой антенны много меньше влияния  $L(x)$  второй антенны (3.15). Поведение кривых 1, 2 на рис. 3.11 соответствует поведению кривых расчёта входного сопротивления микрополоскового вибратора (Прил. А, рис. П. А.2) по интегральному уравнению Фредгольма первого рода [335, 366].

<sup>10</sup> Пределы допускаемой относительной погрешности измерений КСВН в диапазоне от 1,03 до 3 составляют  $\pm(2,4 \times \text{КСВН}) \%$ . Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений фазы при КСВН входа исследуемого устройства от 1.03 до 3 – соответственно  $\pm(4 / \text{КСВН} + 3)^\circ$ . Аттестуется в «ЛЕНТЕСТ» г. Санкт-Петербург.

<sup>11</sup> Порядок анализа дан в соответствии с тем, как он приведен в [383, 413].

Из сравнения кривых 1, 2 графика зависимости  $|\Gamma|$  от частоты (рис. 3.13) следует, что у антенны типа  $\chi \rightarrow \min$  эта зависимость более гладкая. На рис. 3.14 представлены коэффициенты прохождения первой и второй антенн, пересчитанные как элемент  $S_{12}$  матрицы рассеяния  $\|S\|$  реактивного четырехполюсника<sup>12</sup> [275]:

$$|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 = 1.$$

Преимущества первой антенны над второй: более гладкая кривая  $S_{12}$ ; на рис. 3.13 показано, что неравномерность кривой  $S_{12}$  в диапазоне частот 0.3 ÷ 700 МГц у первой антенны – 8.5%; у второй – 13.5%.

На рис. 3.15 представлены фазы входных импедансов первой и второй антенн. Здесь фаза входного импеданса определена как

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{X_a}{R_a} \right), \text{ [град.]}$$

Фазы входных импедансов первой и второй антенн определяют запаздывание токов смещения относительно токов проводимости в антенне.

### 3.2.4 Экспериментальная проверка чувствительности антенны к изменению импеданса подстилающей среды

Хорошо известно [274] существование ярко выраженных минимумов  $|\Gamma|$  для границы «воздух-грунт». Так, при различных температурах и соленостях (проводимости) модуль коэффициента отражения параллельной поляризации  $|\Gamma|$  монотонно уменьшается с увеличением угла падения волны  $\vartheta_0$ , с ростом частоты и понижением температуры ( $t, C^0$ ), т.е. с уменьшением влияния токов проводимости. С понижением  $t, C^0$  грунта глубина минимума  $|\Gamma|$  на низких

<sup>12</sup>Реактивными называются четырёхполюсники, в которых диссипативные потери энергии пренебрежимо малы. В нашем случае потерями на излучение антенны при измерениях её характеристик на приборе ОБЗОР-103 можно пренебречь.

частотах уменьшается, а на высоких возрастает. При этом зависимость угла падения становится более заметной на высоких частотах.

С целью подтверждения этой зависимости для разных углов раскрыва антенны (рис. 3.6) были измерены значения  $K_U$  как функции частоты со значениями  $|\Gamma|$  близкими к минимальным значениям ( $|\Gamma| \rightarrow \Gamma_{\min}$ ) и для угла падения волны  $\vartheta_0=90^\circ$  (графики зависимости  $K_U$  - рис. 3.16, 3.16а). Из значений  $K_U$ , приведенных на рис. 3.16, 3.16а, видно, что использование угла раскрыва антенны, обеспечивающего угол падения волны  $68^\circ < \vartheta_0 < 72^\circ$ , расширяет полосу антенны ~ на 10% по сравнению с углом раскрыва антенны, обеспечивающим угол падения волны  $\vartheta_0=90^\circ$ , что подтверждает наличие ярко выраженных минимумов модуля коэффициента отражения для границы «воздух-грунт».

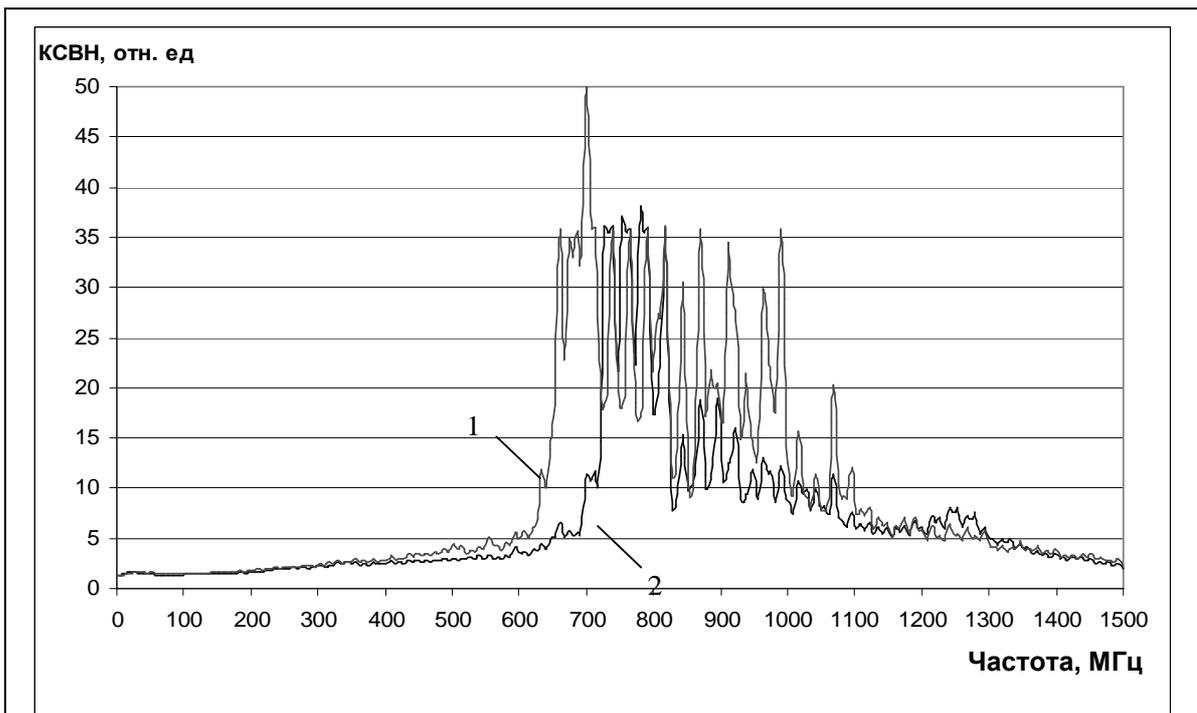
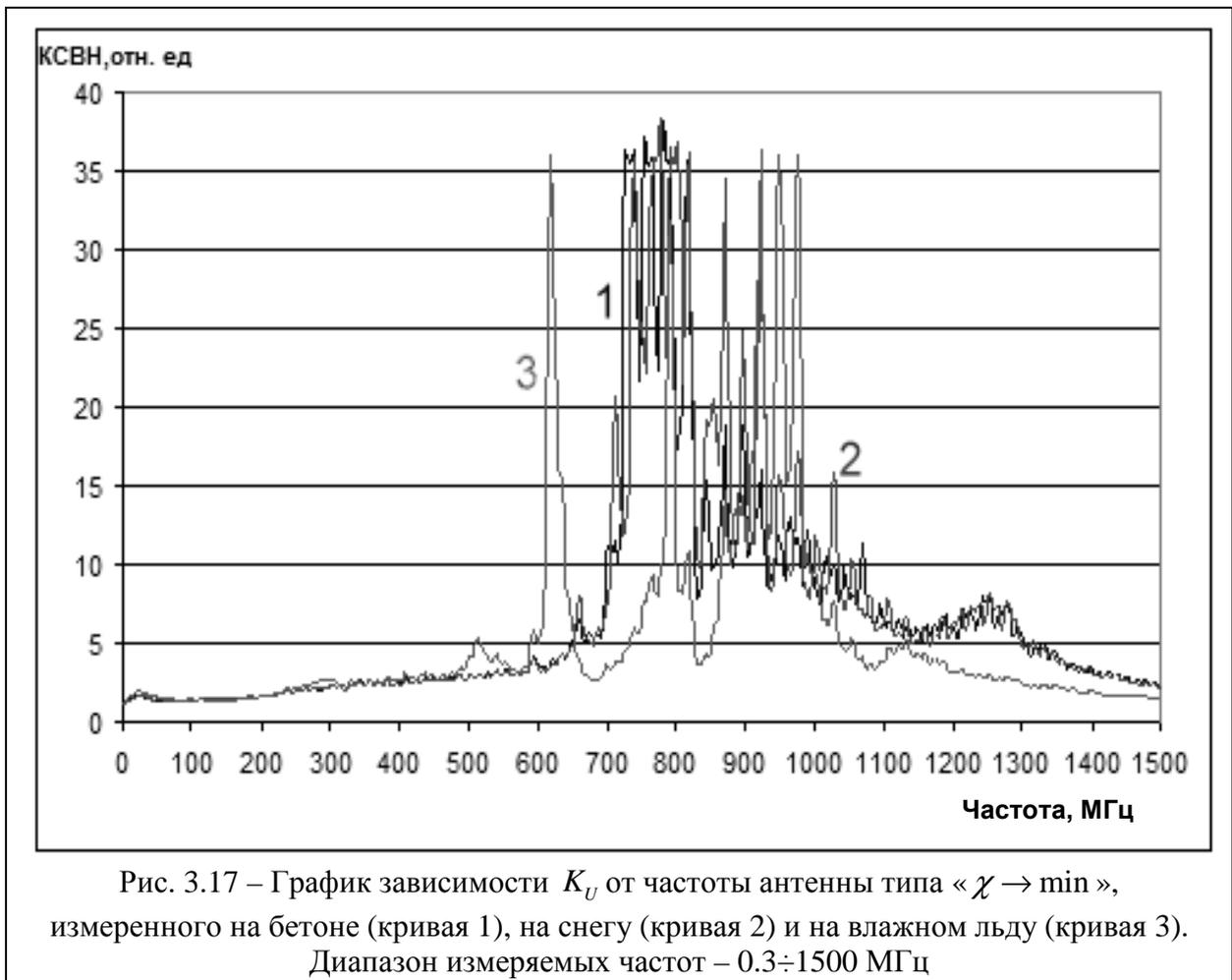


Рис. 3.16 - График зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению ( $K_U$ ) от частоты для  $\vartheta_0 = 90^\circ$  (кривая 1) и для углов  $|\Gamma| \rightarrow \Gamma_{\min}$  (кривая 2). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷1500 МГц, антенна типа « $\chi \rightarrow \min$ »



Для проверки чувствительности антенны к изменению поверхностного импеданса подстилающей среды проведены измерения  $K_U$  антенн, расположенных на различных подстилающих поверхностях (сухой бетон, снег). Результаты измерений приведены на рис. 3.17, 3.17 а. Из результатов измерений следует, что изменение импедансных свойств подстилающей поверхности влияет на характеристики антенны двойко (кривые 1, 2 на рис. 3.17а). Расхождение результатов на рис. 3.17, начиная с 800 МГц, говорит о наличии реакции антенны на расхождение импедансов бетона и снега. Подобие результатов, представленных на рис. 3.17а (кривые 1, 2), позволяет судить о близких по величине значениях импедансов. Кривая 3 на рис. 3.17, 3.17а соответствует измерениям, когда в качестве импедансной поверхности выступает влажный лёд.



Это может быть обусловлено тем, что в этих структурах вода отсутствует полностью, а значит, она не участвует в формировании импедансных свойств подстилающей поверхности - в сухом бетоне скелет представляет собой чешуйчатую структуру и влажность не превышает сотых долей процента, в снеге

( $t \leq -20^{\circ}\text{C}$ ) вода выморожена полностью, и снег представляет чисто кристаллическую структуру. Различия между кривыми 1, 2 и 3, соответствующими сухому бетону, снегу и влажному льду, очевидны. Следует отметить, что для влажного льда резко возрастает коэффициент отражения в диапазоне частот 17-28 МГц, что может рассматриваться как признак частотной дисперсии поверхностного импеданса, обусловленной наличием водной плёнки на поверхности льда<sup>13</sup> [312].

### 3.3 Природа волн, излучаемых неоднородной МПА

Неоднородная МПА заканчивается линией, разомкнутой на конце. Порядок расчёта краевой ёмкости этой линии дан в [380].

При построении излучающей системы МПА можно учесть поверхностные электрические токи, текущие по металлической (медной) пластине и по экрану, а также вертикальные токи электрической поляризации в диэлектрической подложке - область растекания этих токов заметно превышает размеры пластины [383].

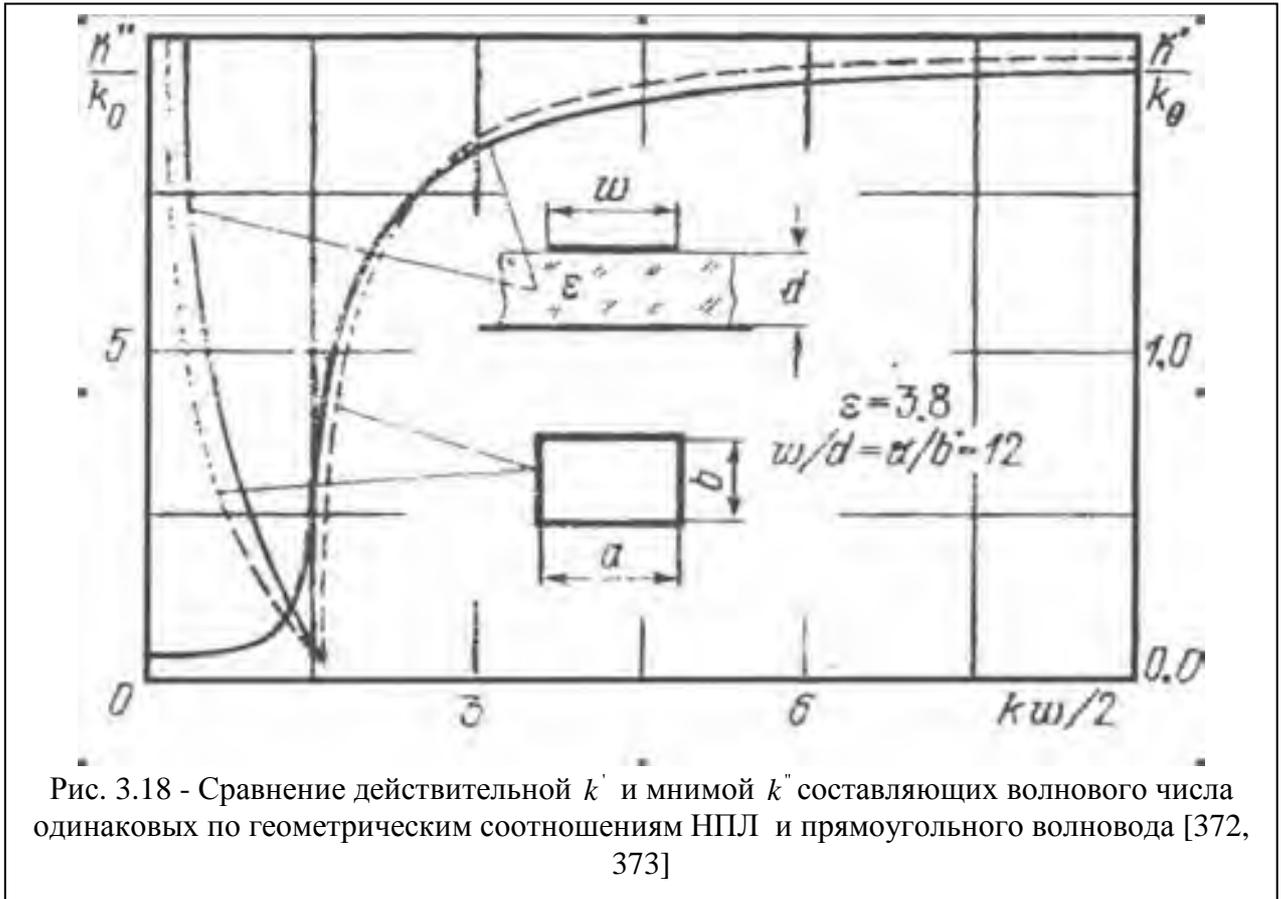
Неоднородность в виде открытого конца МПЛ (торца антенны) также приводит к дополнительной концентрации электромагнитного поля вблизи открытого конца линии, что эквивалентно увеличению электрической длины линии (Прил. А), а также к дополнительному излучению.

Одним из наиболее распространённых подходов к анализу этого излучения является метод Олинера (Arthur A. Oliner) [498], в соответствии с этим методом отрезок МПЛ заменяется эквивалентным волноводом с магнитными боковыми стенками шириной  $2\rho_{эф}$  и заполненного диэлектриком с проницаемостью  $\epsilon_{эф}$ . Величины  $2\rho_{эф}$  и  $\epsilon_{эф}$  выбираются из условия равенства характеристических сопротивлений и постоянных распространения МПЛ и волновода, эквивалентного по геометрическим параметрам [371, 373].

На графиках, представленных на рис. 3.18, показано поведение нормированного

<sup>13</sup> По экспериментальным данным (Хиппель А.Р., 1959; Ахадов Я. Ю., 1972; Тонконогов М.П., Векслер В.А., Биржанов К.Ж., 1975; Семихина Л. П., 2007) частота резонанса воды ~25МГц.

продольного числа  $k'/k_0$  и  $k''/k_0$  в сравнении с волноводом, эквивалентным по геометрическим параметрам несимметричной полосковой линии.



Поскольку электромагнитное поле НПЛ сосредоточено в основном в области под токонесущим проводником и с ростом частоты поле всё более концентрируется в этой области, то имеет смысл сравнивать свойства НПЛ и прямоугольного волновода. Строго говоря, продольное волновое число в НПЛ с идеально проводящими проводниками и идеальным диэлектрическим заполнением есть комплексная величина  $k = k' + i \cdot k''$  [372]. Выражение для погонной проводимости имеет вид [334]:

$$\tilde{B} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \frac{\sin(\tilde{\xi}_1 \cdot k_0 \cdot b/2)}{\tilde{\xi}_1 \cdot k_0 \cdot b/2} \right]^2 \cdot \frac{(\tilde{\xi} \cdot \epsilon_{\phi})^2}{(\epsilon_{\phi} \cdot \tilde{\xi} \cdot \cos \tilde{\xi}_1 \cdot k_0 \cdot b/2)^2 + (\tilde{\xi}_1 \cdot \sin \tilde{\xi}_1 \cdot k_0 \cdot b/2)^2} \cdot \frac{d\tilde{\xi}}{\sqrt{\tilde{\xi}^2 - 1}},$$

где  $\tilde{\xi}_1 = \sqrt{\epsilon_{\phi} - 1 + \tilde{\xi}^2}$ ,  $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0}$ ,  $\lambda_0$  - длина волны в воздухе.

Наличие мнимой части связано с дифракционным излучением волны из линии [373]. Увеличение емкостной составляющей концевой проводимости вычисляется

через погонную проводимость щели, которая образована проводящей полуплоскостью, лежащей на слое диэлектрика с экраном. Из выражения для погонной проводимости очевидно, что при  $\xi \rightarrow 1$  величина  $B$  приобретает комплексное значение, что соответствует комплексному значению продольного волнового числа. Обозначения даны по [373], или  $w = 2 \cdot \rho, d = b/2$ . Здесь же приведены значения продольного волнового числа прямоугольного волновода с поперечным сечением  $a \times b$ , приведённого к размерам НПЛ. Наличие дифракционных потерь в ней приводит к существованию волны в закритичной области (в прямоугольном волноводе с идеальными проводящими стенками распространение волны в этой области отсутствует:  $k' = 0$ ).

### 3.3.1 Экспериментальная проверка наличия волны $H_{10}$

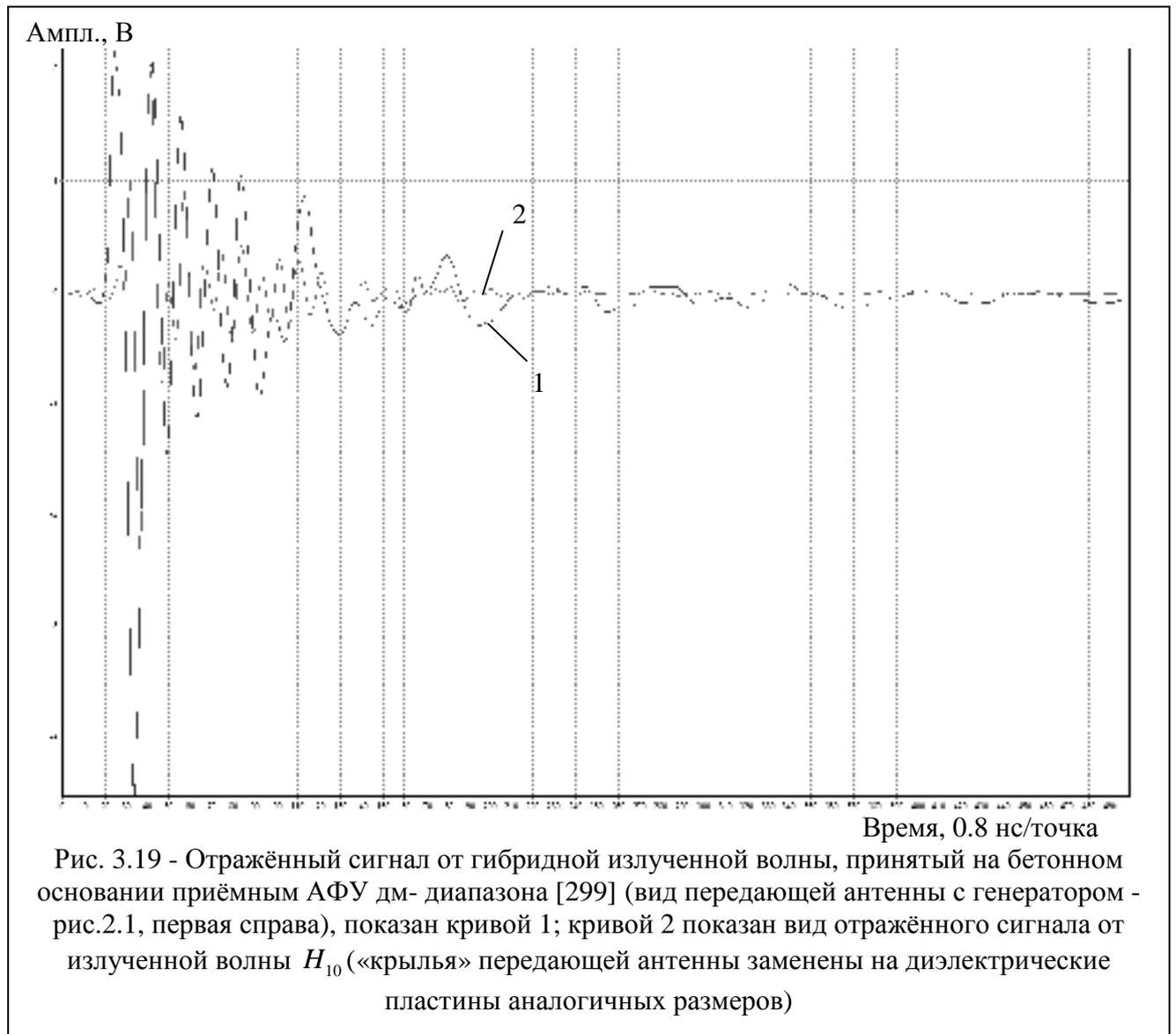
Продольное волновое число не является характеристикой волн чисто  $E$  – или  $H$  – типов, а представляет собой характеристику гибридной  $T$  – волны [373].

Это хорошо видно из графиков отраженных сигналов (рис. 3.19), принятых на бетонном основании приемным АФУ дм - диапазона: для передающей антенны (рис. 3.6), излучающей гибридную волну, отражённый сигнал представлен кривой 1; кривой 2 показан вид отражённого сигнала от излученной волны  $H_{10}$  («крылья» передающей антенны заменены на диэлектрические пластины аналогичных размеров, волна  $H_{10}$  в диэлектрической пластине возбуждается поперечным металлическим штырём). Характеристики участвующего в измерениях комплекса даны в [299].

Из графиков, представленных на рис. 3.19, следует, что амплитуда волны  $H_{10}$  меньше амплитуды гибридной  $T$ -волны (61% от сигнала для гибридной  $T$ -волны), её спектр более высокочастотен, что обуславливает её быстрое затухание по глубине. Анализ электродинамического приближения приведен в Прил. В.

Основная волна относится к классу подполосочных волн<sup>14</sup>. Их поля преимущественно сосредоточены внутри подложки [210]. Для приближённого описания подполосочных волн может быть использован метод А. Олинера, в соответствии с которым полосковая линия заменяется прямоугольным волноводом (рис. 3.18).

Перераспределение энергии волны в пользу подполосочной области будет происходить при увеличении ширины полоски [210].



<sup>14</sup>Высшие типы волн, т.н. экранные, слабо зависят от ширины полоскового проводника и мало отличаются от соответствующих характеристик прямоугольного волновода. Дисперсия этих волн определяется размерами экрана. Деление волн на экранные и подполосочные является условным [209].

### 3.3.2 Неоднородная МПА как экранированная симметричная щелевая линия

Поскольку в рассматриваемой антенне одновременно возбуждаются плоские вибраторы в виде металлических (медных) полос и диэлектрическая подложка неоднородной МПА, то подобные антенны можно одновременно рассматривать и как плоский вибратор с собственным входным сопротивлением и как щелевой излучатель (магнитный вибратор), обладающий таким же сопротивлением, поскольку это одна и та же антенна<sup>15</sup>.

Этот принцип гласит: всегда найдётся такой угол поворота, когда металлическая полоска ложится в металлическую [374]. В нашем случае принцип комплементарности описывается уравнением (3.15), задающим размеры поперечных сечений токоведущей линии и щели.

Такой щелевой излучатель представляет собой симметричную щелевую линию (СЩЛ), вырезанную в металлической плоскости, расположенной на одной из сторон диэлектрической подложки с металлическим экраном на другой стороне подложки (рис. 3.6). Волна  $H_{10}$  в диэлектрической пластине возбуждается поперечным по отношению к толщине пластины металлическим штырём, являющимся продолжением точки запитывания металлических (медных) полос МПА. Штырь, выходящий со стороны металлического экрана диэлектрической подложки, электрически развязан с ним.

К настоящему времени не существует достаточно точной теории СЩЛ и такого отчётливого физического понимания принципа работы СЩЛ, которое характерно для НПЛ [416]. При толщине диэлектрика  $d \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны в диэлектрической подложке ( $w = 2 \cdot \rho$ , рис. 3.2; рис. 3.18) напряжение между краями протяжённой регулярной щели можно заменить магнитным током (Прил.А). При этом продольная составляющая магнитного поля записывается в виде уходящей волны [373]:

<sup>15</sup>Так называемый принцип самодополнительности, или комплементарности, введён Ясуто Мушияки [374].

$$H_z(r) = A \cdot H_0^{(1)}(g \cdot r),$$

$$g^2 = \beta^2 + k_0^2,$$

где  $r$  - расстояние от начала координат до точки наблюдения;  $H_n^{(1)}(g \cdot r)$ <sup>16</sup> - функция Ханкеля первого рода  $n$ - порядка (здесь  $n=0$  - порядка);  $\beta = j \cdot 2 \cdot \pi / \lambda$  - продольное волновое число;  $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{эф}}$  - длина волны в СЦЛ;  $k_0 = 2 \cdot \pi / \lambda_0$  - волновое число для длины волны в воздухе  $\lambda_0$ ;  $\epsilon_{эф}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость СЦЛ, порядок определения дан в [330, 382];  $j = \sqrt{-1}$ ;  $A = const$ .

В подобных структурах полный спектр волн, удовлетворяющих граничным условиям, состоит из волн  $H_{1,2n}$  для  $n \geq 0$  и  $E_{1,2n}$  для  $n \geq 1$ . В волноводе без диэлектрика волна  $H_{10}$  и все высшие типы волн не распространяются. В диэлектрике подложки распространяется волна  $H_{10}$ , а распространение высших типов волн зависит от ширины волновода.

Особого внимания здесь заслуживает замедление волн, составляющих гибридную  $T$ -волну, относительно друг друга: по мере увеличения размера щели фазовый набег между токами проводимости и смещения увеличивается (рис. 3.15), с другой стороны – волны в «меандровой» антенне (рис. 3.20, кривая 1) медленнее волн в антенне, реализующей целевую функцию « $\chi \rightarrow min$ ». Из них медленнее более тонкая антенна (рис. 3.20, кривые 2,3).

Данные для рис. 3.20 рассчитаны по формуле [209]

$$\epsilon_{эф} = 1 + q \cdot (\epsilon - 1), \quad (3.16)$$

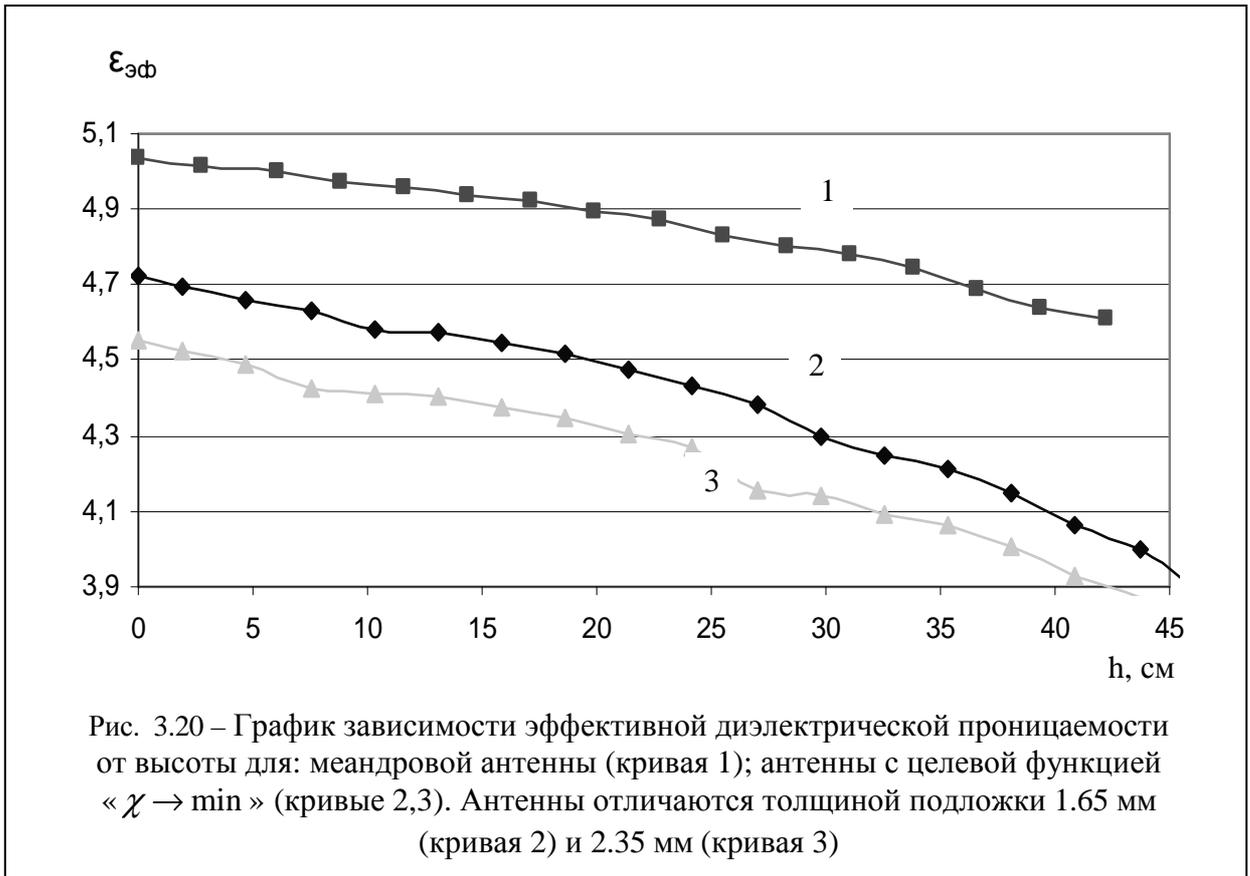
где коэффициент диэлектрического заполнения [373]

$$q = 0.5 \left[ \left( 1 + 10 \cdot \frac{d}{w} \right)^{-0.555} + 1 \right]. \quad (3.17)$$

Для рис.3.20 за величину  $\epsilon$  взята относительная диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита  $\sim 5.5$ .

---

<sup>16</sup>  $H_n^{(1)}(g \cdot r) \approx \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot g}} \cdot \exp[i \cdot (g \cdot r - \pi / 4)]$



### 3.3.3 Вид распространяющегося в среде поля

Лабораторная установка для экспериментального определения вида распространяющегося в среде поля от сигнала, излучаемого неоднородной МПА комплекса, содержит:

- неоднородную микрополосковую излучающую антенну  $m_1$  – диапазона (рис. 2.1, первая справа);
- ДДРВ генератор (рис. 2.7), параметры: ампл.~1 кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 4$  нс;
- датчик поля - МПА в виде диполя Герца;
- трёхслойную среду (бетон – 25 см; асфальт – 8 см; среднезернистый песок – 20см);
- приёмник - осциллограф TDS3052B (рис. 2.13).

На рис. 3.21 представлен внешний вид излучающей «на просвет» антенны  $m_1$ -диапазона. Антенна «нагружена» на бетонную поверхность.



Рис. 3.21 – Излучающая «на просвет» антенна м-диапазона с ДДРВ генератором и аккумулятором питания

На рис. 3.22 представлен внешний вид датчика поля на границе раздела «воздух - кафель» и датчик поля в песке (в материальной среде).

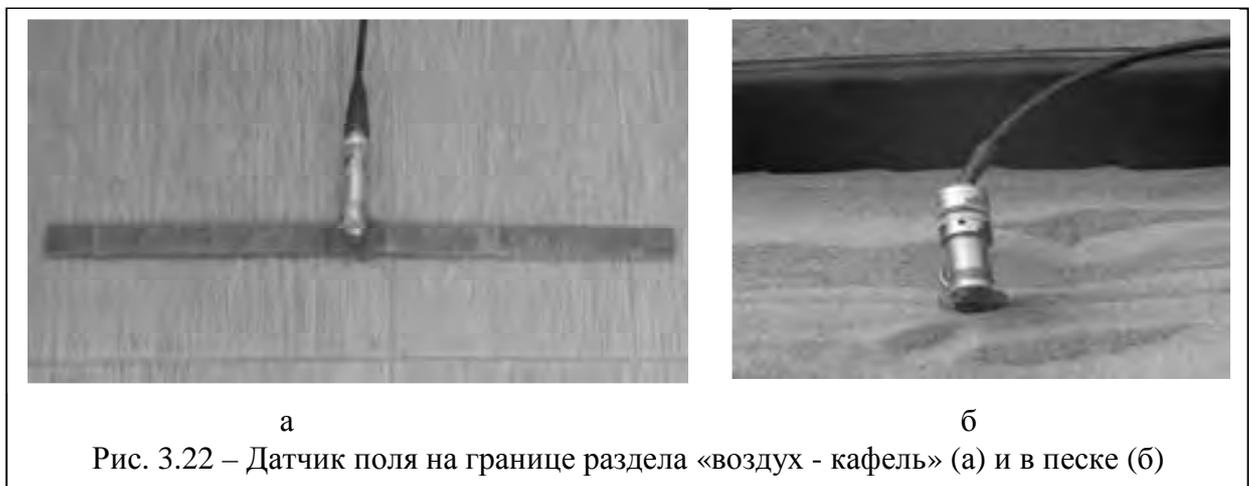
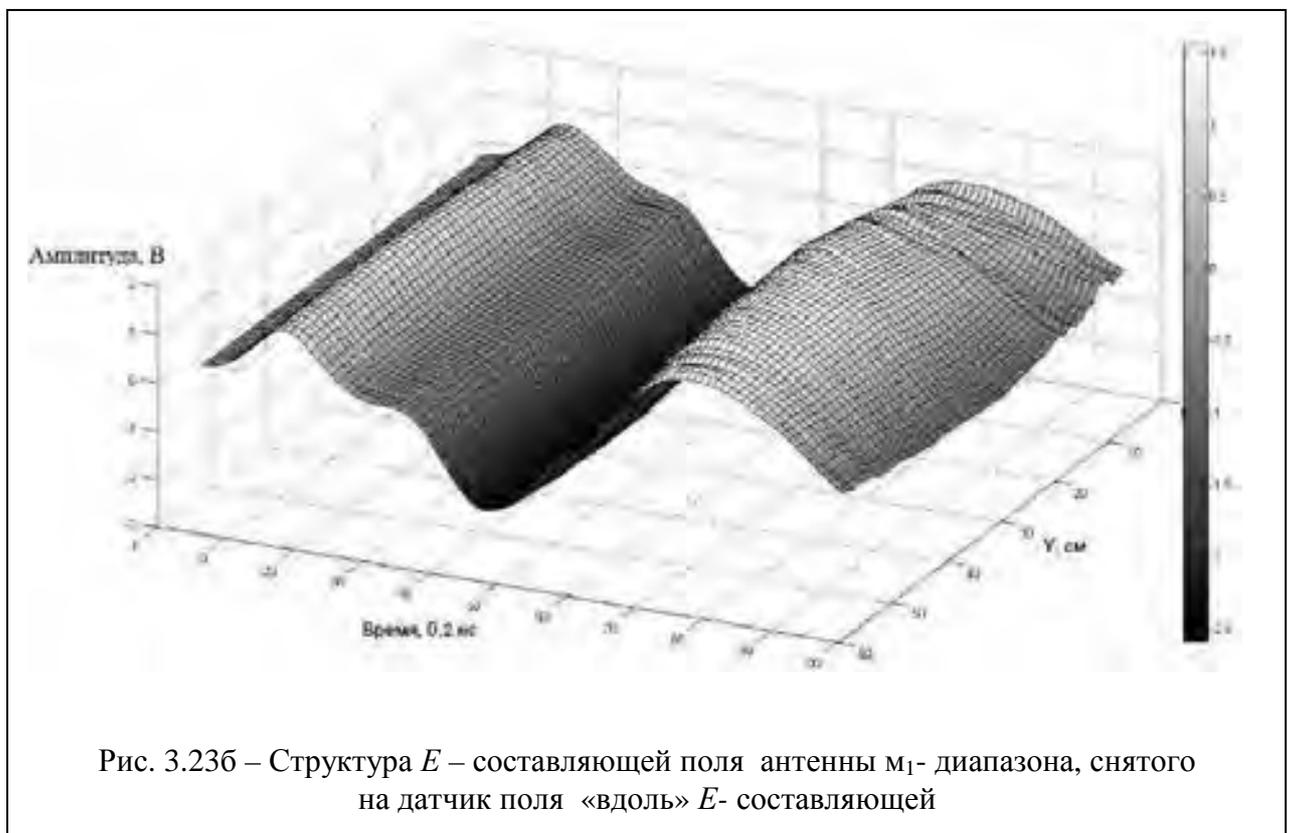
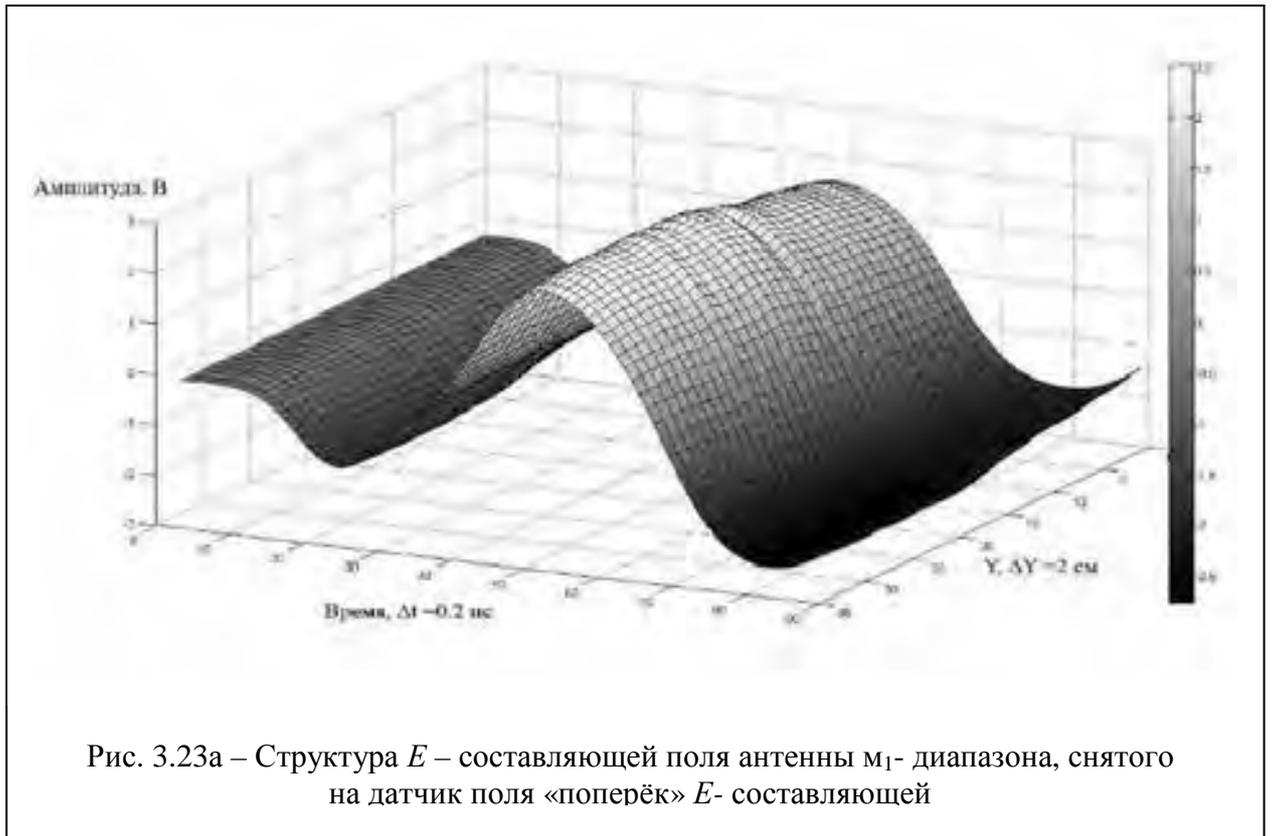


Рис. 3.22 – Датчик поля на границе раздела «воздух - кафель» (а) и в песке (б)

МПА типа «диполь Герца» перемещается в материальной среде вдоль и поперёк излучаемого вектора  $E$  напряжённости поля в раскрытие антенны. Структура  $E$  – составляющей распространяющегося от антенны м<sub>1</sub>-диапазона поля представлена на рис. 3.23а, 3.23б.



### 3.3.4 Голографическое восстановление поля в дальней зоне по полю, измеренному на плоскости

На практике в настоящее время применяются три вида поверхностей сканирования: плоская, цилиндрическая и сферическая. Ближнее поле (рис. 3.23а, 3.23б) измеряется в каждой точке поверхности сканирования  $S$ ; результатом измерений является векторная комплексная функция  $E^u(r_s)$  ( $r_s$ ) – векторная координата на поверхности  $S$ . Составляющие вектора есть значения сигнала на выходе измерительной антенны (рис. 3.22б) при различных её ориентациях, различающихся поворотом  $E$ - плоскости измерительной антенны на  $90^\circ$ ; они пропорциональны распределённой на  $S$  тангенциальной компоненте электрического поля исследуемой антенны (рис. 3.21). Тогда искомое поле должно находиться как решение краевой задачи для однородных (без источников) уравнений Максвелла, удовлетворяющее условию излучения и краевому условию  $E_t = E^u$  на  $S$  [151].

Строгое решение уравнений Максвелла даётся интегралами типа Гюйгенса – Кирхгофа по поверхности  $S$  от функций тангенциальных  $E_t, H_t$ .

$$\vec{E} = \left( \frac{k}{4\pi i R_0} \right) \exp(-ikR_0) \cdot \iint_S \left[ \left( \frac{\mu}{\varepsilon} \right) \cdot \vec{i}_{R_0} \times (\vec{H}_t \times \vec{n}) - (\vec{E}_t \times \vec{n}) \times \vec{i}_{R_0} \right] \cdot \exp(ik\vec{\rho} \cdot \vec{i}_{R_0}) dS, \quad (3.18)$$

$$\vec{H} = \vec{i}_{R_0} \times \vec{E} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}},$$

где  $R_0$  – расстояние от начала системы координат, расположенной внутри  $S$ , до точки наблюдения;  $\rho$  – радиус - вектор точек на поверхности  $S$ ;  $i_{R_0}$  – единичный вектор из начала системы координат в точку наблюдения;  $n$  - единичный вектор внешней нормали к поверхности  $S$ ;  $k$  – волновое число;  $\varepsilon, \mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды вне  $S$  (предполагается, что среда однородная). Значения тангенциальных составляющих ближнего поля должны быть известны на замкнутой поверхности, охватывающей антенну.

Для определения поля в дальней зоне необходимо подставить в (3.18) функции измеренных тангенциальных составляющих и выполнить интегрирование по поверхности  $S$ . Используемое преобразование дано в [152].

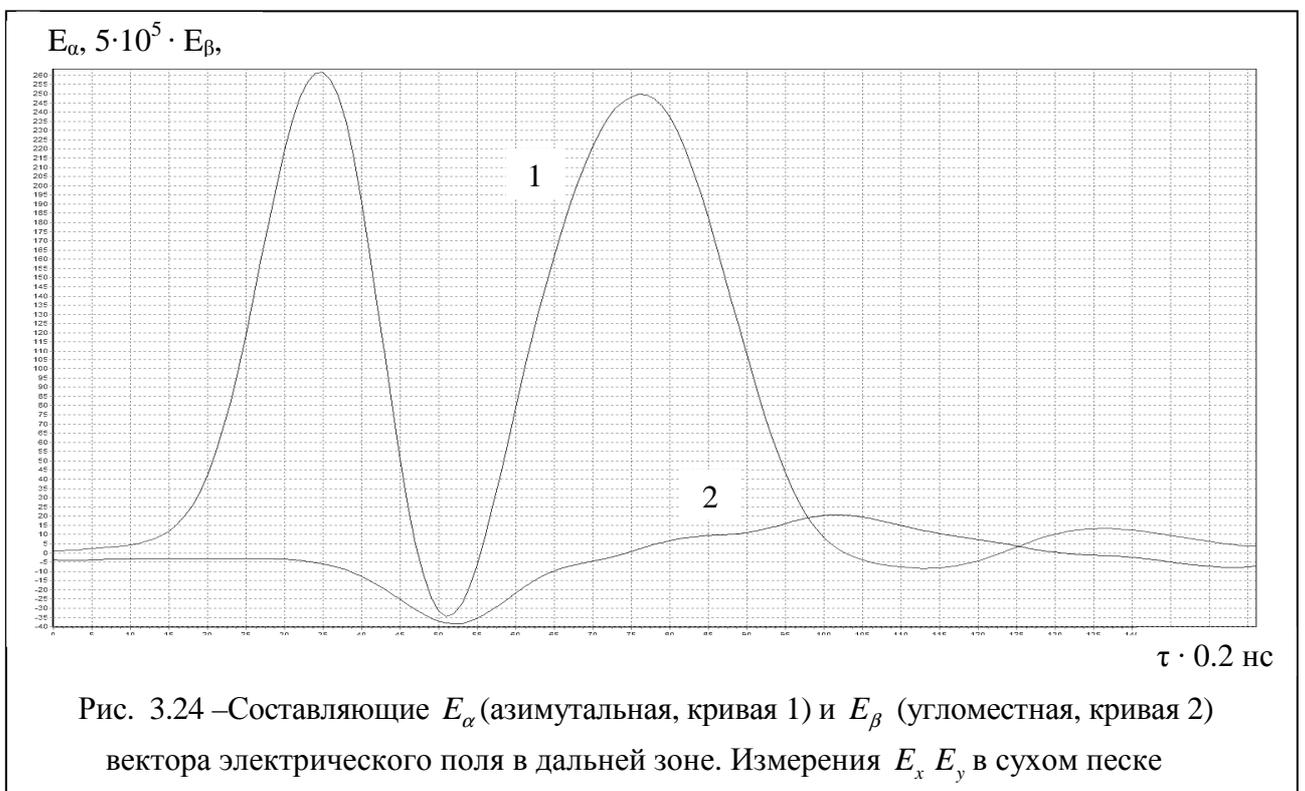
Измерение поля на плоскости  $z=0$  осуществляется в системе координат  $x, y$  (плоскость раскрыва антенны). Поле в дальней зоне рассматривается как функция сферических координат  $\alpha, \beta$  (угол  $\alpha$  отсчитывается от соответственно декартовой и сферической систем координат), из (3.18) в системе координат  $\alpha, \beta$  можно получить следующие выражения для составляющих вектора электрического поля в дальней зоне

$$E_{\alpha}(t) = A \int_S (E_x(t) \cdot \cos\beta + E_y(t) \cdot \sin\alpha \cdot \sin\beta) \cdot \exp[ik(x \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta + y \cdot \sin\beta)] dx dy,$$

$$E_{\beta}(t) = A \cdot \cos\alpha \int_S E_y(t) \cdot \exp[ik(x \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta + y \cdot \sin\beta)] dx dy,$$

$$\text{где } A = \left( \frac{k}{4\pi i R_0} \right) \exp(-ikR_0), k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon}.$$

Результаты восстановления поля в дальней зоне по полю, измеренному на плоскости, представлены на рис. 3.24.



Очевидно, что угломестная составляющая поля  $E_{\beta}(t)$  близка к нулю, следовательно поляризация поля излучаемого импульса линейная.

### 3.4 Влияние составляющих неоднородной МПА

Конструктивно МПА состоит из оголовка и крыльев, которые в свою очередь делятся на составляющие: платформу и нанесённые на неё полосковые проводники.

Электродинамическими свойствами обладают лента и ребро полоскового проводника. Ребро полоскового проводника представляет собой геометрическую сингулярность, которая определяет особенность электромагнитного поля (см. гл. I, п.1.6.2).

Учёт этой особенности обеспечивается на этапе моделирования путём использования специальных базисов для представления полей или токов на границах областей, имеющих точки геометрической сингулярности. Эти базисы должны представлять собой систему функций, каждая из которых удовлетворяет условию Мейкснера<sup>17</sup> на ребре [496, 497] и граничным условиям, где нет сингулярности [209].

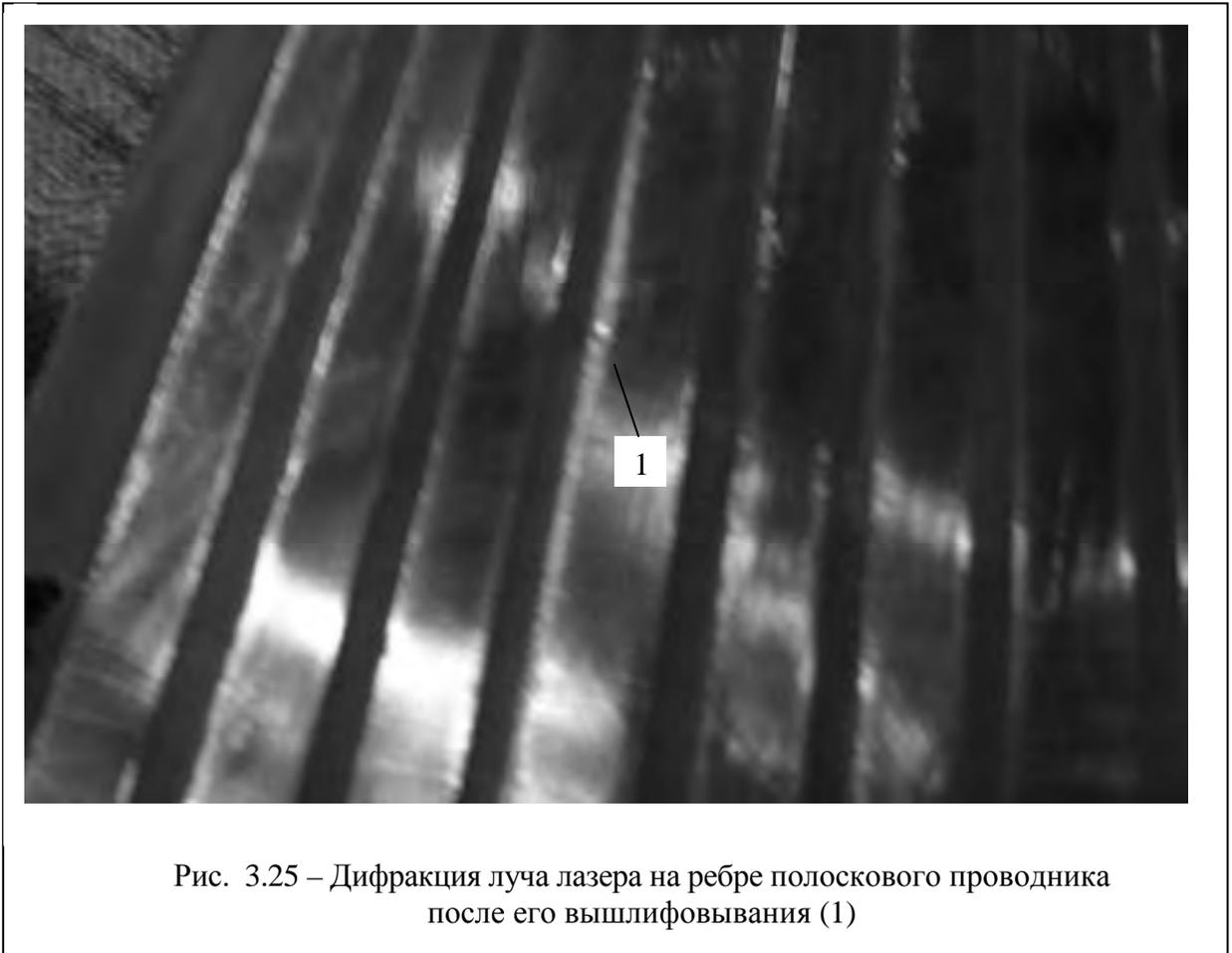
#### 3.4.1 Учёт влияния ребра полоскового проводника

В случае неоднородной МПА особенность представляет собой ребро проводника конечной толщины. Технологическим путём (вышлифовыванием ребра) задача о дифракции волн на ребре может быть переведена в задачу о дифракции на клине, одна из сторон которого импедансная (задача Г. Д. Малюжинца, 1958).

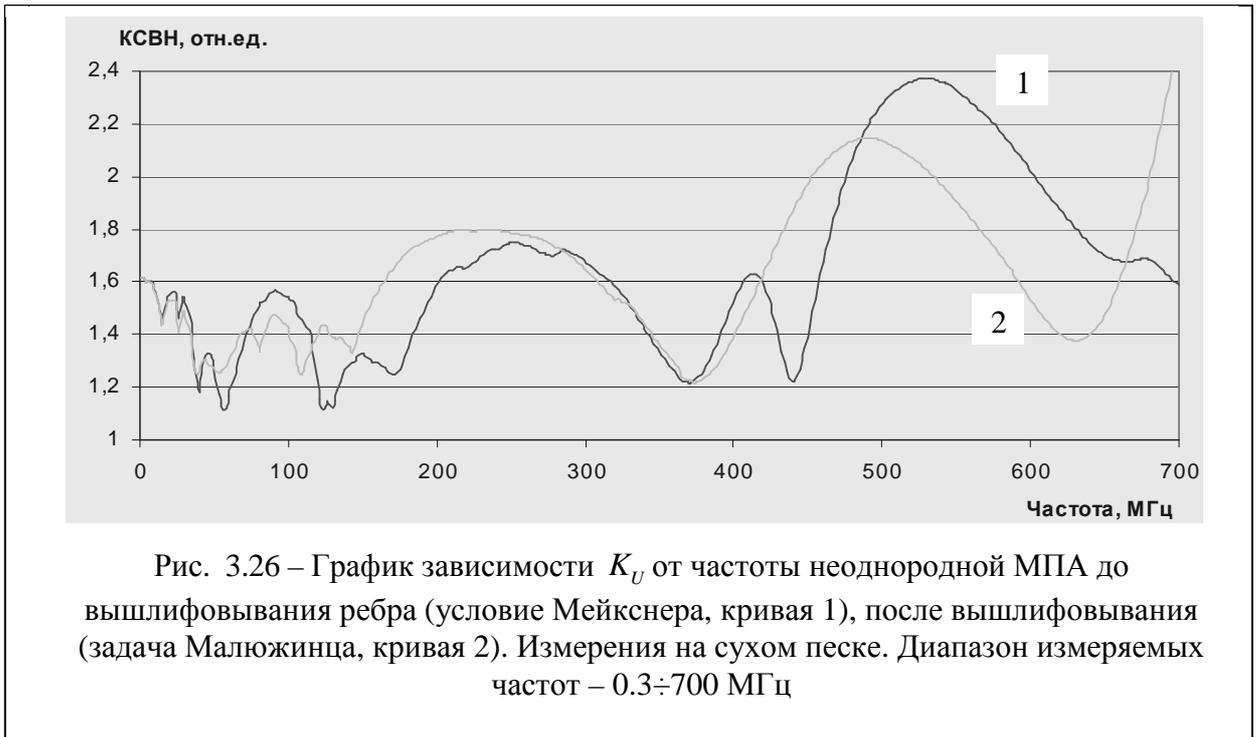
---

<sup>17</sup> Одно из условий, необходимых для однозначной разрешимости задачи дифракции на экране. Является естественным требованием конечности рассеянного поля в конечной области. Исходя из строгих результатов для полуплоскости, Дж. Мейкснер предположил, что напряжённость поля в окрестности ребра экрана имеет особенность вида  $r^{-\alpha}$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $r$  – расстояние до ребра. Для определения степенного показателя  $\alpha$  он раскладывал в ряд по степеням  $r$  компоненты поля в окрестности ребра и получил  $\alpha = 1/2$  (это согласуется с результатами для полуплоскости).

Асимптотические формулы для двумерной задачи дифракции плоской волны на импедансном клине приведены в [501, 502]. На рис. 3.25 показан пример проверки качества удаления ребра его вышлифовыванием.

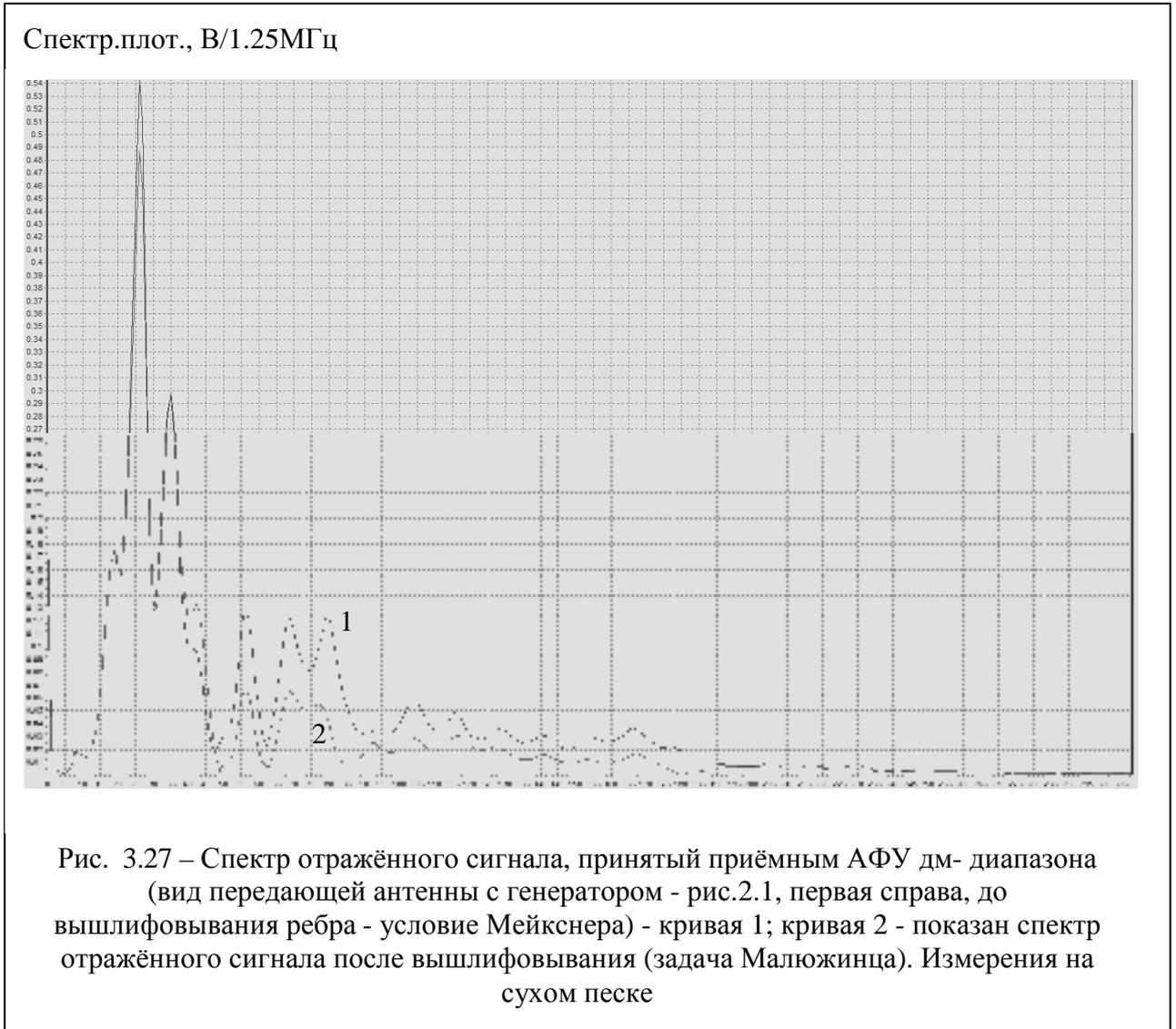


Появление такой дифракционной картины от луча лазера свидетельствует о том, что ребро удалено. На рис. 3.26 приведено сравнение антенн до вышлифовывания ребра и после по величине  $K_U$ . Из поведения кривой 1 на рис. 3.26 очевидно, что выигрыш в АЧХ неоднородной МПА после вышлифовывания каждого ребра антенны (задача Малюжинца [507, 508] о дифракции на импедансном клине) составляет величину  $\sim 3\%$  (неравномерность параметра  $S_{12}$  матрицы рассеяния антенны составляет величину  $< 6\%$  в диапазоне частот  $0.3 \div 700$  МГц) для измерений на сухом песке.



Наличие антенных измерений, представленных на рис. 3.26 и 3.26а, позволяет, во-первых, обнаружить сам факт изменения полосы излучения, во-вторых, оценить точность Фурье преобразования отражённого сигнала. Из рис. 3.26а

следует, что изменения в спектре отражённого сигнала следует ожидать начиная с частоты  $\geq 282$  МГц ( $f_{КСВН}$ ).



Для проверки этого на открытом пространстве (для исключения наводок) на гранитно – песчаной крошке проведены два измерения: в качестве генераторной антенны использовалась неоднородная МПА до вышлифовывания ребра (условие Мейкснера) – первое измерение, и второе измерение: в качестве генераторной антенны использовалась та же антенна после вышлифовывания ребра (задача Малюжинца, рис. 3.27). Приёмной выступала монополярная антенна дм – диапазона (рис. 2.1, третья слева).

Спектры результатов измерений представлены на рис. 3.27, 3.27а.



Из данных на рис. 3.27а видно, что спектральная плотность у антенны после вышлифовывания выше, чем у антенны с ребром, начиная с 274 МГц ( $f_{\text{фурье}}$ ) и до 326 МГц. Это позволяет оценить точность используемого Фурье-преобразования ЭМИ СШП сигнала как

$$\Delta_{\text{ФУРЬЕ}} = \left| \frac{f_{\text{квн}} - f_{\text{фурье}}}{f_{\text{квн}}} \right| \cdot 100\% \approx 2.84\%.$$

### 3.4.2 Влияние анизотропии материала подложки, оголовка и толщины неоднородной МПА

В приведенном выше анализе предполагается, что материал подложки изотропен, хотя анализ свойств структур с анизотропными включениями весьма сложен [353, 499, 509].

Для проверки изотропности материала подложки на установке на базе прибора ОБЗОР-103 проведены измерения  $K_U$  для ламината и фольгированного стеклотекстолита (рис. 3.28, 3.29).



Рис. 3.28 – Определение изотропности подложки из ламината на установке ОБЗОР-103



Рис. 3.29 – Определение изотропности подложки из фольгированного стеклотекстолита на установке ОБЗОР-103 (рис.2.2)

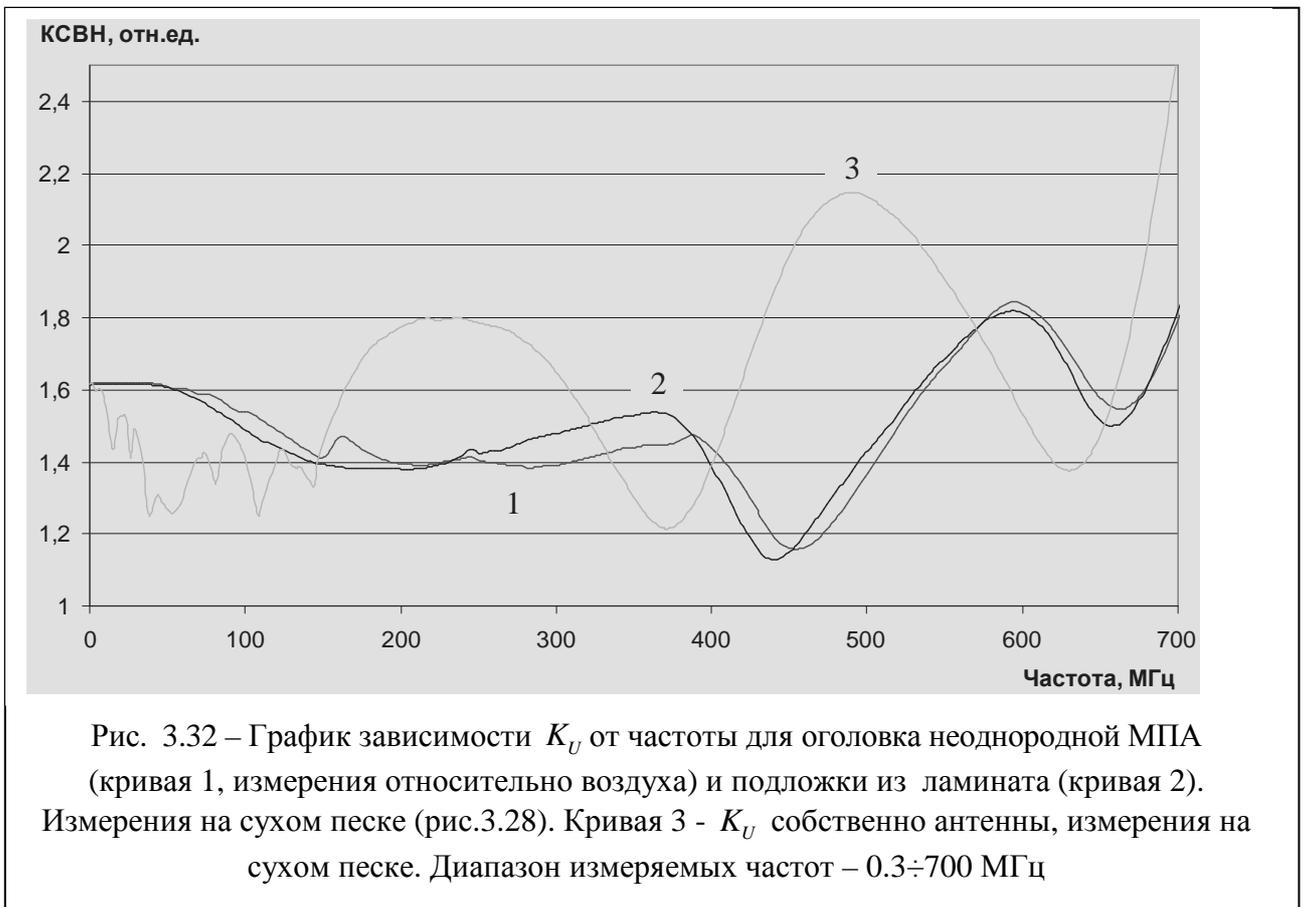
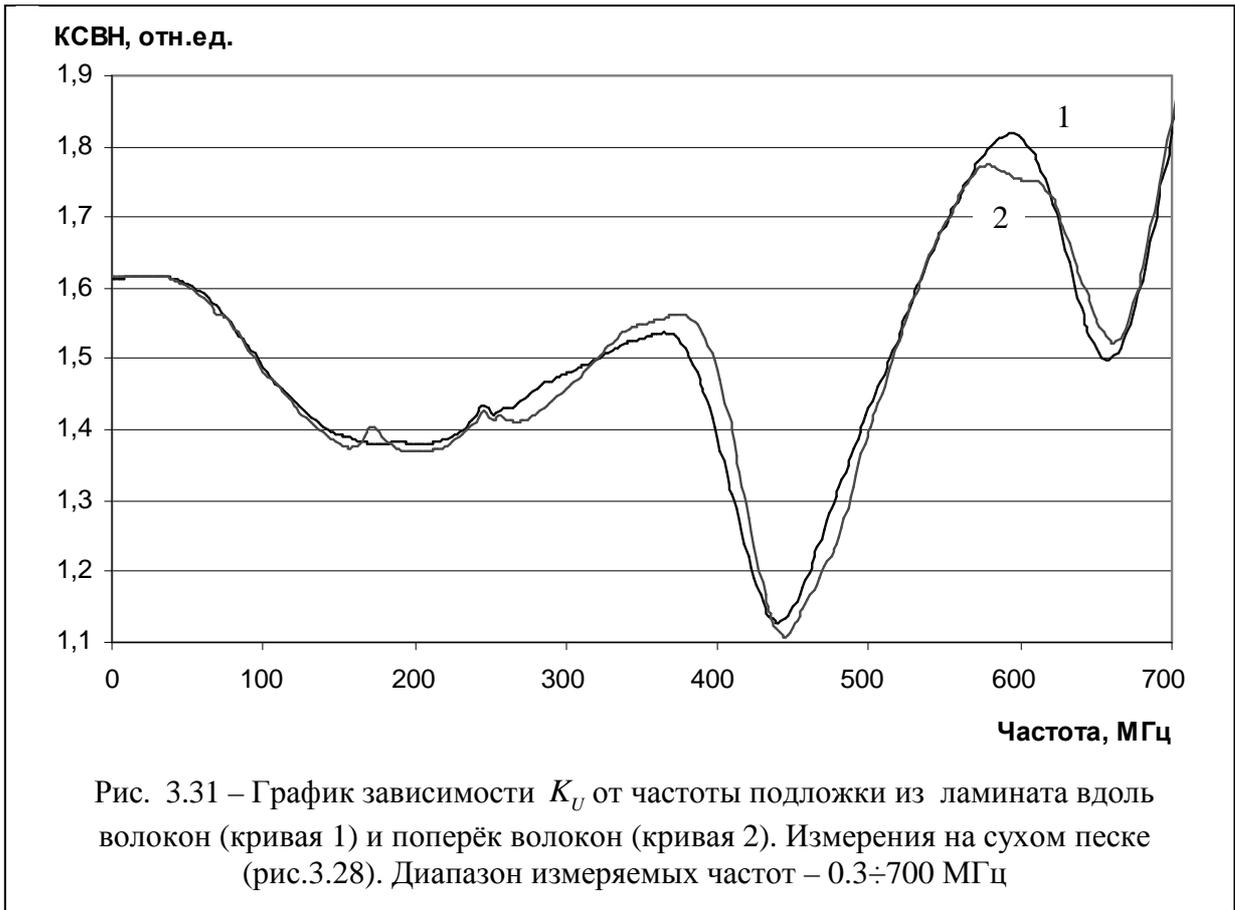
Для этого секция PLANAR прибора подключается к оголовку неоднородной МПА, а оголовок подключается к подложке по схеме как в антенне. В обоих измерениях подложки замкнуты на подстилающую поверхность в виде мелкозернистого песка (рис. 3.29, справа внизу).

На рис. 3.30 представлен график зависимости  $K_U$  от частоты для подложки из фольгированного стеклотекстолита (кривая 1) и подложки из ламината (кривая 2). На рис. 3.30 видна дифракция металлической составляющей (кривая 1) фольгированного гетинакса в виде «дребезга»  $K_U$ .



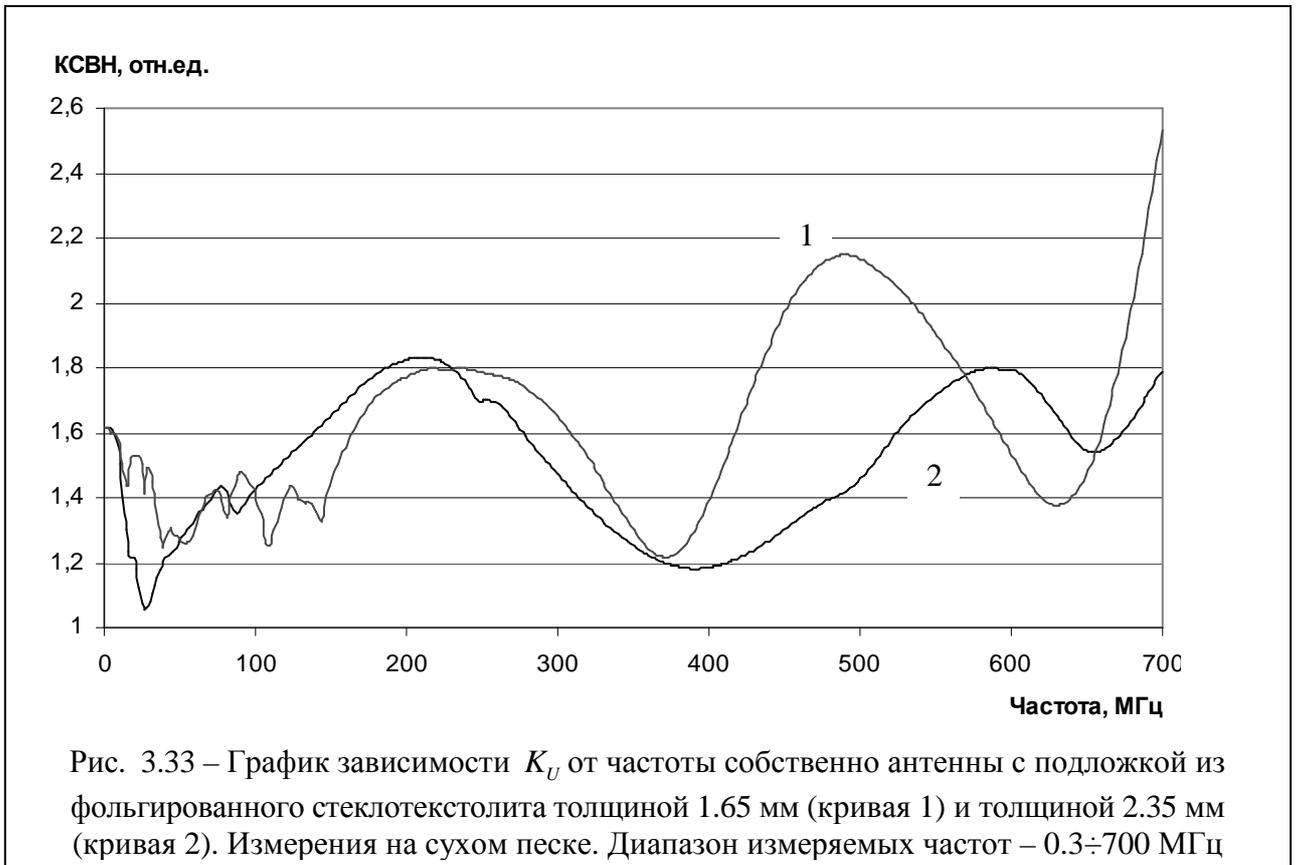
На рис. 3.31 представлен график зависимости  $K_U$  от частоты подложки из ламината вдоль волокон (кривая 1) и поперёк волокон (кривая 2), очевидно, что свойства подложки изотропны<sup>18</sup>. На рис. 3.32 представлен график зависимости  $K_U$  от частоты для оголовка лепестковой антенны (кривая 1), подложки из ламината (кривая 2), собственно антенны (кривая 3).

<sup>18</sup>Первая «классическая» МПА изготовлена на однородной подложке из ламината компанией Rogers RO4003C ( $\epsilon=3.38-j0.0074$ ) [331].



Измерения зависимости  $K_U$  от частоты антенны после вышлифовывания ребра, проведенные на песке (рис.3.32, кривая 3), по виду сопоставимы с поведением кривой 1 (рис.3.30) в диапазоне частот 0.3÷140 МГц, где коэффициент отражения изменяется в диапазоне 0.115÷0.23, а его поведение определяется медной фольгой.

На рис. 3.33 представлен график зависимости  $K_U$  от частоты подложки из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1.65 мм (кривая 1) и толщиной 2.35 мм (кривая 2).



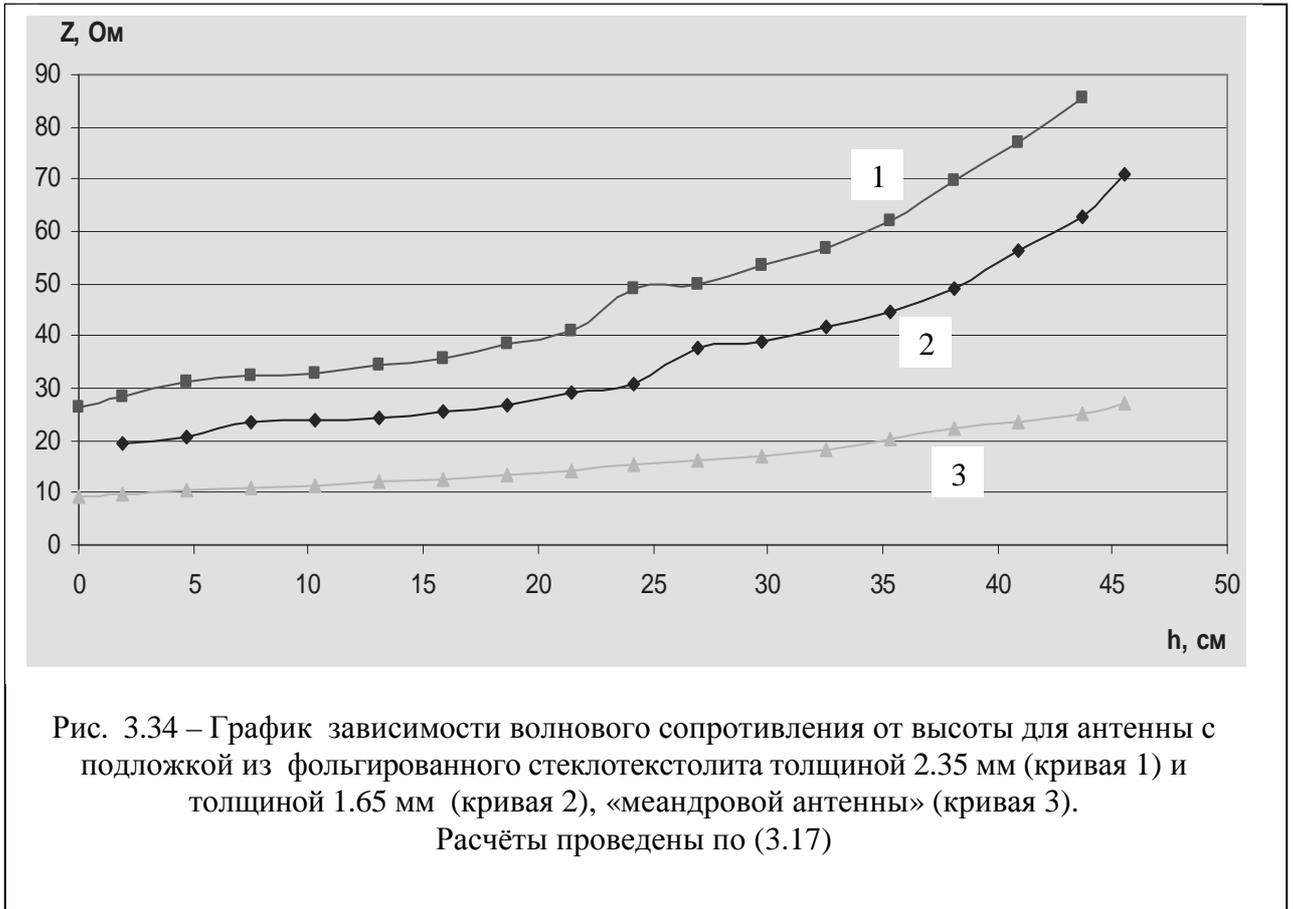
Очевидно, что уменьшение толщины подложки убирает эффект «дребезга» медной фольги в диапазоне частот 0÷150 МГц и снижает  $K_U < 1.85$ .

Это подтверждается измерениями, приведенными на рис. 3.33, где расхождение в толщинах подложки составляет величину ~ 0.7 мм.

В [509] для квазистатического приближения приведено выражение для волнового сопротивления НПЛ для проводников с  $w/d > 1$ :

$$Z = \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\epsilon_{эф}} \cdot \left[ \frac{w}{d} + 1.393 + 0.667 \cdot \ln \left( \frac{w}{d} + 1.444 \right) \right]}, \quad (3.17)$$

из которого видно, что толщина подложки НПЛ функционально сложно связана с его волновым сопротивлением. Результаты расчёта по (3.17) для трёх антенн приведены на рис.3.34.



Очевидно, что по разности между  $Z$  из (3.17) и измеренными значениями  $R_a$ ,  $X_a$  можно оценить расхождение рассчитываемых и измеряемых параметров:

$$\Delta Z = \left| \frac{\bar{Z}_{изм}(f) - Z}{(\bar{Z}_{изм}(f) + Z) / 2} \right| \cdot 100\% \approx 3.77\%.$$

### 3.5 Монопольная антенна<sup>19</sup> подповерхностного зондирования как антенна в материальной среде

Суть идеи монопольной антенны продемонстрирована на рис. 3.35, 3.35а.

<sup>19</sup>Наиболее полный анализ, начиная с названия антенн, дан в кн. Melvin M. Weiner Monopole Antennas, Marcel Dekker, Inc., New York – Basel, 2003, 721 p.



Полностью несогласованная на границе раздела сред «воздух - сухой бетон» МПА типа диполя Герца (рис. 3.35, 3.35а, кривая 1) переходит в разряд полностью согласованной при её полном погружении в воду (кривая 2), зарывании в песок (кривая 3) и в свободном пространстве (кривая 4).

Таким образом, перенос антенны с границы раздела сред в саму среду позволяет получить почти идеальное согласование. Вопрос согласования и поведения антенны в материальной среде разработан Р. Кингом [162, 188, 189], Г.А. Лавровым [128].

Переход от дипольной антенны к монополюльной состоит в замене распределённого в пространстве плеча диполя сосредоточенным в пространстве элементом Гюйгенса с сохранением распределённого в пространстве второго плеча диполя. При этом элемент Гюйгенса замыкается на оплётку СВЧ кабеля, а плечо диполя – на его центральную жилу. В качестве заполнителя внутриантенного пространства между плечом диполя и элементом Гюйгенса используется высококачественный диэлектрик.

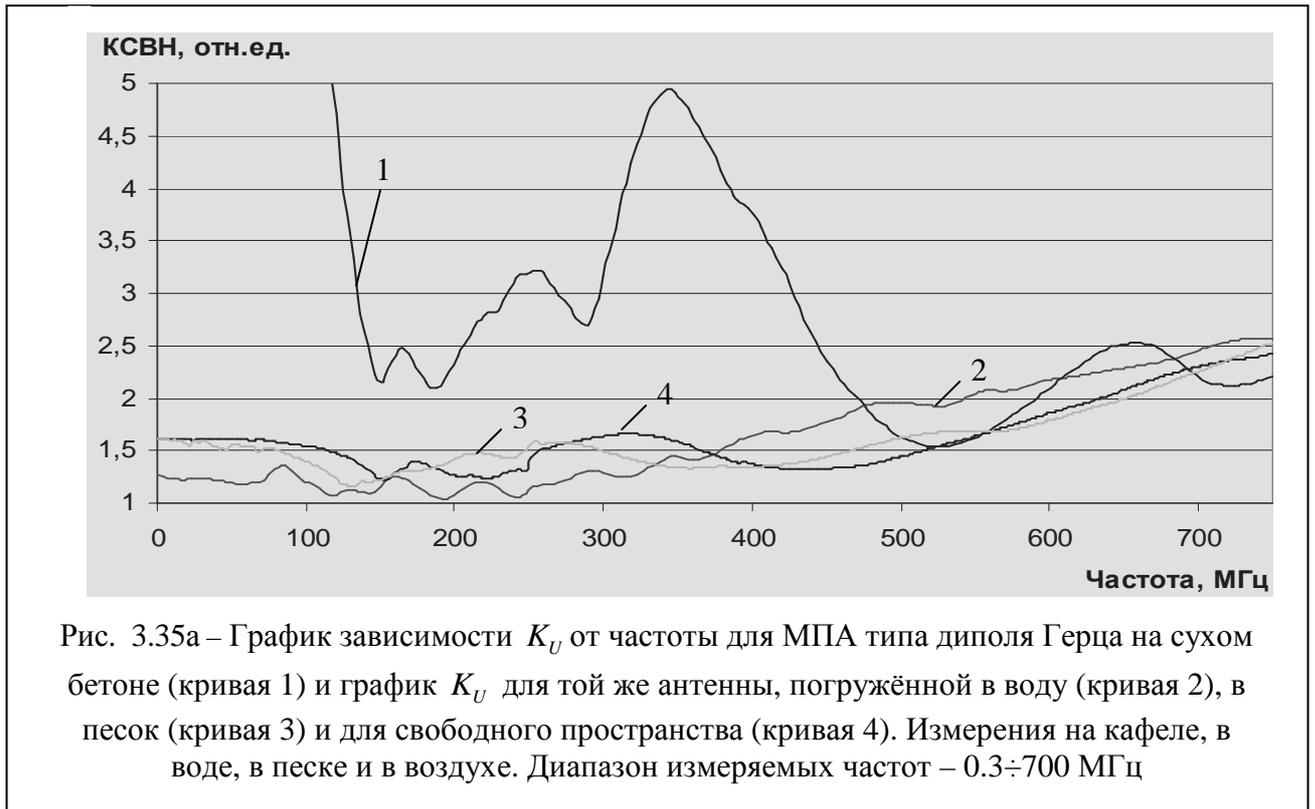


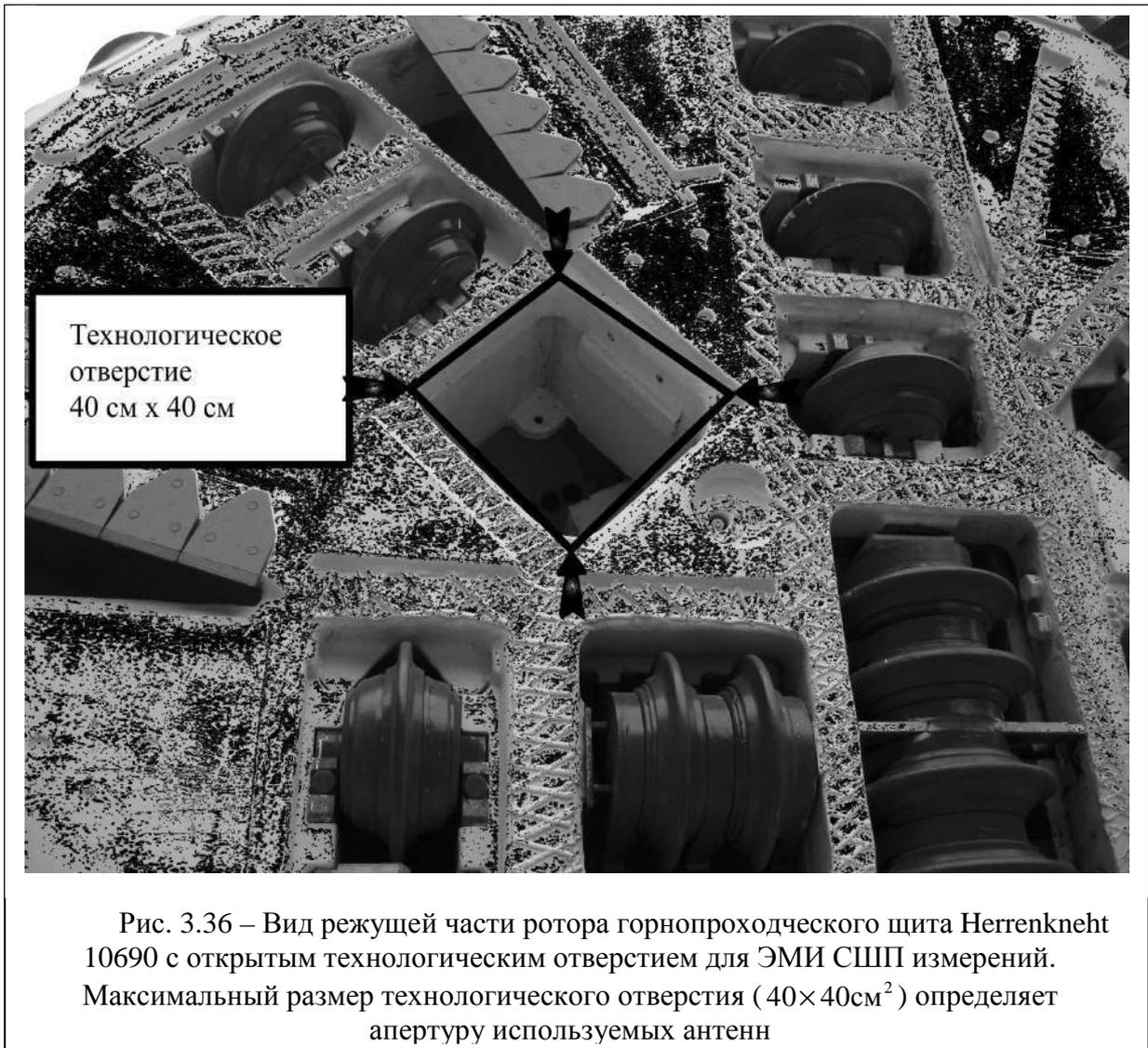
Рис. 3.35а – График зависимости  $K_U$  от частоты для МПА типа диполя Герца на сухом бетоне (кривая 1) и график  $K_U$  для той же антенны, погружённой в воду (кривая 2), в песок (кривая 3) и для свободного пространства (кривая 4). Измерения на кафеле, в воде, в песке и в воздухе. Диапазон измеряемых частот – 0.3÷700 МГц

Основные условия: площадь элемента Гюйгенса  $\approx$  площадь плеча диполя; диэлектрические свойства заполнителя (линзы) соотносимы с его весом; угол между элементом Гюйгенса и плечом диполя должен защитить от прямого протекания излучаемого импульса; поверхности элементов линейные – линейная поляризация<sup>20</sup>.

### 3.5.1 Практическая необходимость и свойства монополярных антенн

В тоннелестроении все горнопроходческие комплексы (ТМПК) имеют так называемые «окна» (рис. 3.36), которые обеспечивают доступ к горной породе через щит проходки, как правило, щит с пригрузом бентонитовой жидкостью с измельчённой породой. Для проведения ЭМИ СШП измерений вперёд забоя необходимо, чтобы совокупные геометрические размеры трёх антенн помещались в это окно.

<sup>20</sup>Тип возбуждаемой волны –  $H_{10}$  [383]. Круглые (диск, цилиндр) поверхности элементов, обеспечивающие круговую поляризацию, не используются.



Наличие конкретных размеров в щите позволило разработать ряд монополярных антенн, отличающихся длиной плеча диполя, диэлектрическими свойствами заполнителя, формой линзы (рис.2.1, третья и четвёртая слева). На рис. 3.37, 3.38 приведены условия проверки монополярных антенн на работоспособность в условиях «окна в щите».

Из результатов измерений, представленных на рис. 3.39, следует, что взаимная индуктивность между антенной дм – диапазона и замкнутой по периметру металлической (медной) поверхностью начинает проявляться с частоты  $\sim 130$  МГц.

Из результатов измерений, представленных на рис. 3.40, следует, что взаимная индуктивность между антенной дм<sub>1</sub> – диапазона и замкнутой по периметру металлической (медной) поверхностью начинает проявляться с частоты  $\sim 100$  МГц.



Рис. 3.37 – Проверка работоспособности monopольной антенны дм<sub>1</sub> – диапазона внутри замкнутой по периметру металлической (медной) поверхности путём измерения зависимости  $K_U$  от частоты. Измерения на сухом песке

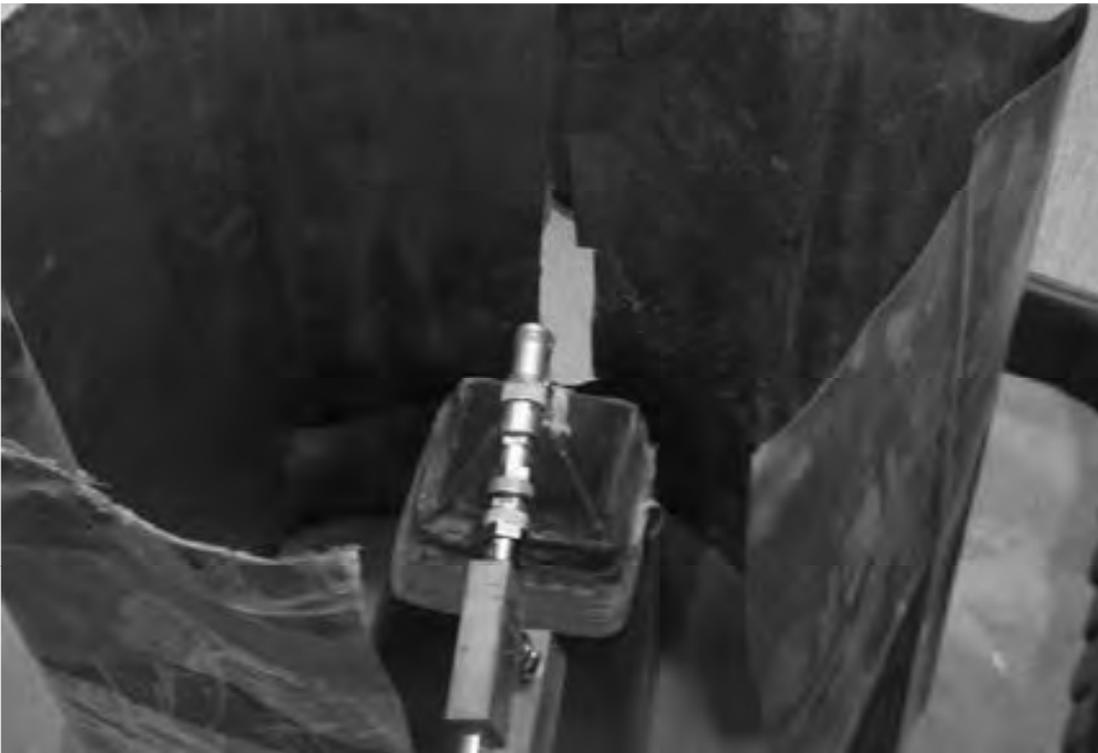


Рис. 3.38 – Проверка работоспособности monopольной антенны дм – диапазона внутри замкнутой по периметру металлической (медной) поверхности путём измерения зависимости  $K_U$  от частоты. Измерения на сухом песке

За значение полосы пропускания данной антенны следует по аналогии с неоднородной МПА принять значение  $K_U < 1.85$ , или  $S_{12} < 6\%$ . Это соответствует полосе  $0.3 \div 650$  МГц.

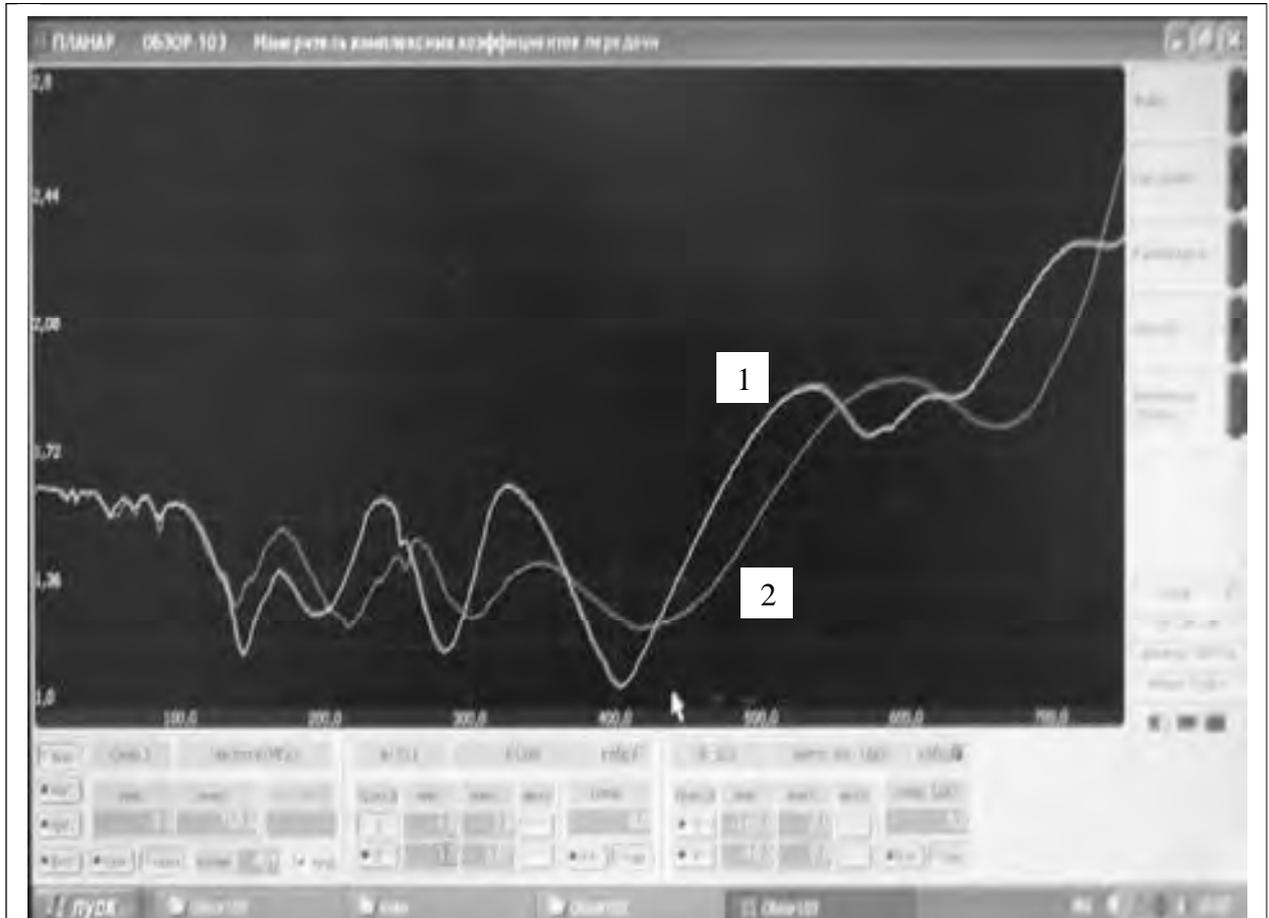
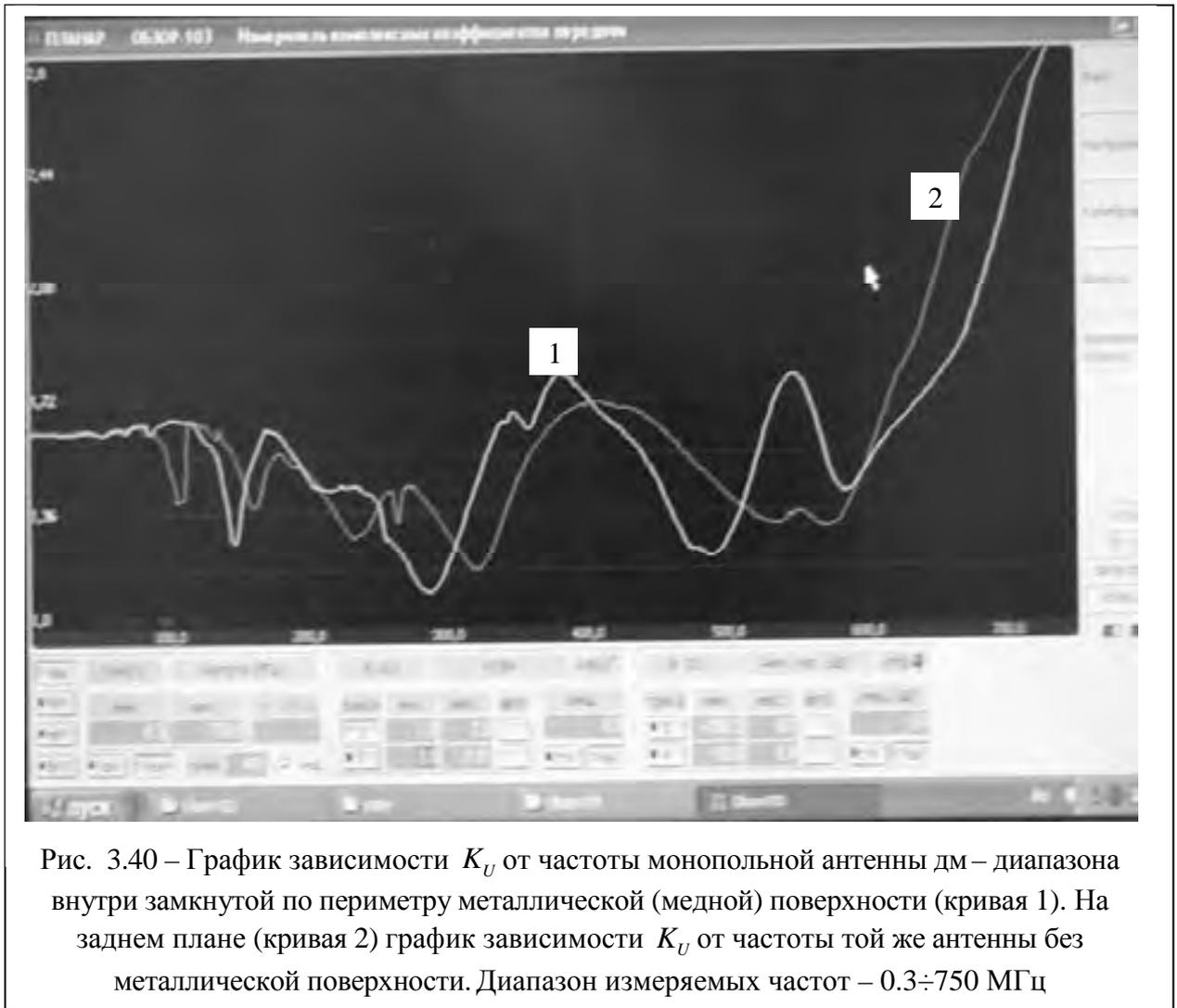


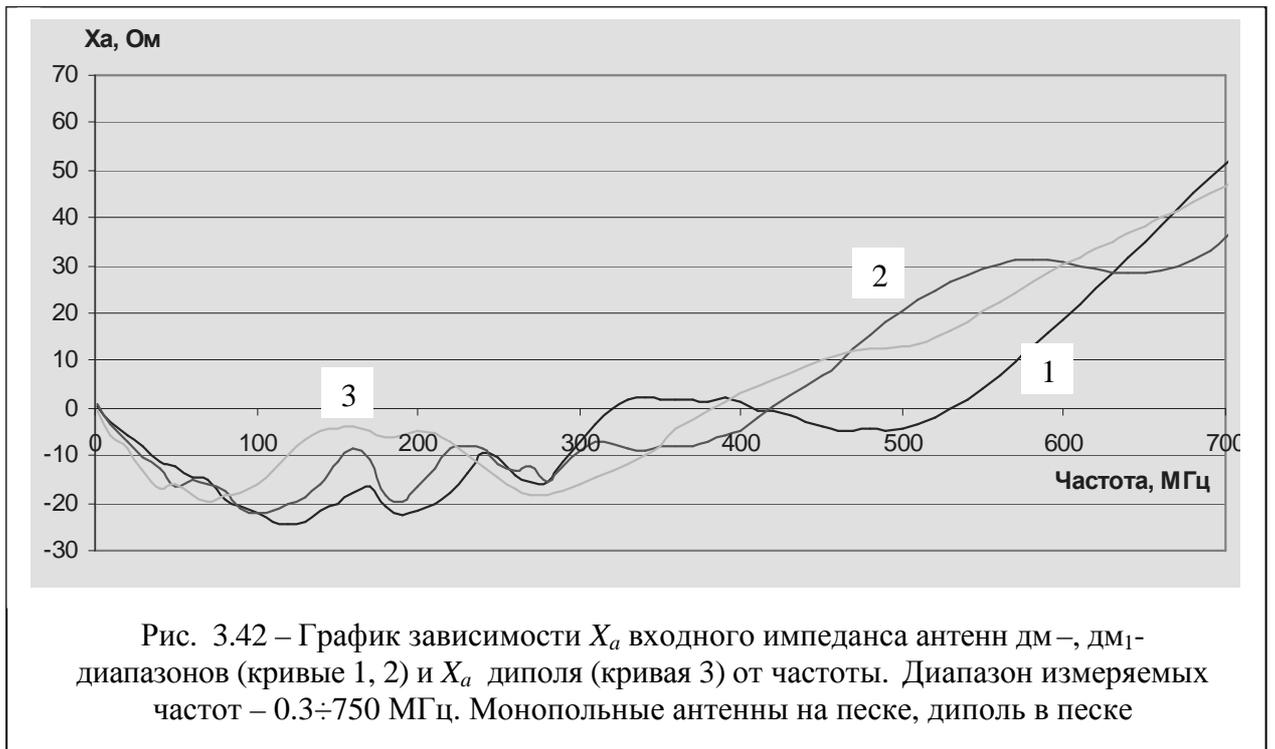
Рис. 3.39 – График зависимости  $K_U$  от частоты monopольной антенны дм<sub>1</sub> – диапазона внутри замкнутой по периметру металлической (медной) поверхности (кривая 1). На заднем плане (кривая 2) график зависимости  $K_U$  от частоты той же антенны без металлической поверхности. Диапазон измеряемых частот –  $0.3 \div 750$  МГц

На рис. 3.41, 3.42 представлены результаты измерений активной и реактивной составляющих входного импеданса monopольных антенн в сравнении с импедансом полоскового аналога диполя Герца в материальной среде.

Спектр собственных частот обеих антенн дм - диапазона: число точек резонансов напряжений ( $X_a = 0$ ) - 3 у антенны дм - диапазона (320; 410; 530 МГц), 1 у антенны дм<sub>1</sub> - диапазона (415 МГц); резонансов токов ( $R_a \rightarrow R_a \max$ ) - у первой антенны – 1 (430 МГц), у второй – 1 (630 МГц).



Реактивное сопротивление антенны дм<sub>1</sub> – диапазона в полосе частот 0.3÷ 415 МГц носит емкостной характер, далее ( $\geq 415$  МГц) – индуктивный. Реактивное сопротивление антенны дм – диапазона в полосе частот 0.3÷ 320 МГц и ( $\geq 530$  МГц) носит емкостной характер, в полосе частот 320÷415 МГц – индуктивный.



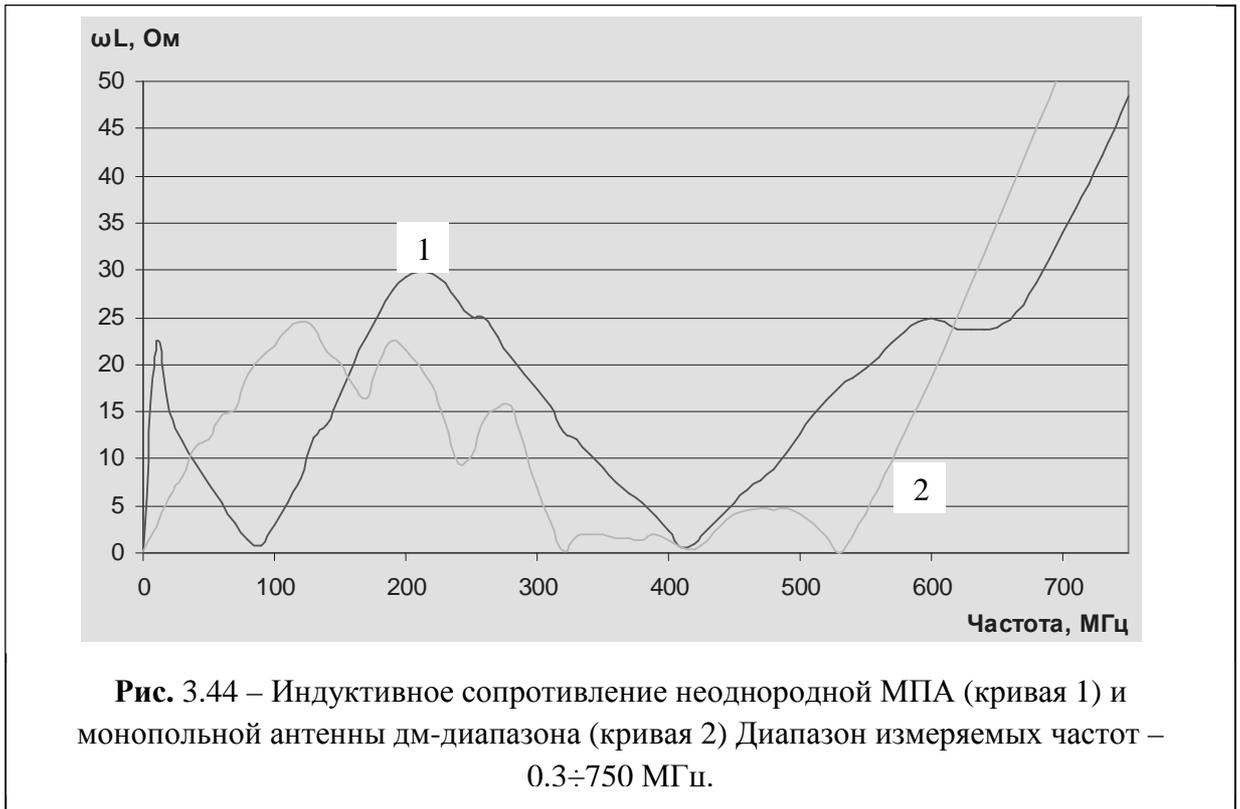
На рис. 3.43 представлены фазы входных импедансов первой, второй антенн ДМ – диапазона и диполя. Они определяют запаздывание токов смещения относительно токов проводимости в антенне.



Неравномерность АЧХ в частотном диапазоне связанной воды (220÷340 МГц) составляет величину <2% (1.638%).

Из графиков, представленных на рис. 3.38, видно, что у первой антенны фазовый набег больше: в диапазоне частот 0.3 ÷ 700 МГц изменяется от  $-10.3^\circ$  до  $+22.8^\circ$ , у второй - от  $-9.1^\circ$  до  $+22.3^\circ$ .

На рис. 3.44 представлено индуктивное сопротивление монопольной антенны дм-диапазона (кривая 2) в сравнении с аналогичным неоднородной МПА (кривая 1). Очевидно, что в диапазоне частот 300÷550 МГц его величина не превышает 5 Ом, что делает антенну независимой от внешнего металлического ограждения в виде «окна» в роторе (рис.3.36). С другой стороны проявление связанной воды [144] в виде минимумов импедансов в д.ч. 350÷400 МГц для суглинка (влажности 3.5%÷5.32%;  $Z_{\min}=2.697$  Ом, 17.79 Ом, 8.928 Ом) делает антенну незаменимой для оперативного обнаружения такой воды при работе вперёд забоя.



### 3.5.2 Форма диэлектрика монопольной антенны как решение задачи геометрической оптики

Конструктивная особенность формы диэлектрика монопольной антенны – одноповерхностная линза, которая имеет одну преломляющую поверхность, обращенную к облучателю, с одним радиусом кривизны и выходную поверхность, перпендикулярную вертикальной оси антенны, с другим (теоретически бесконечным) радиусом кривизны. В этом случае лучи в линзе квазипараллельны оси и наличие пластин не сказывается на пути лучей, собирающей выступает боковая поверхность диэлектрика. Форма преломляющей поверхности такой линзы может быть рассчитана, исходя из условия равенства длин оптических путей. При этом расчет ведется по формуле:

$$r = \frac{(n-1) \cdot f}{n \cdot \cos \theta - 1},$$

где  $r$  – расстояние от  $F$  (фокуса) до любой точки границы, на которую падает волна;  $F$  – центр окружности волновой поверхности волны;  $f$  – фокусное

расстояние;  $\theta$  – полярный угол радиус-вектора  $\vec{r}$ , имеющего начало в  $F$ ;  $n$  – показатель преломления.

В данном случае  $n \geq 1$ , и формула превращается в уравнение гиперболы с эксцентриситетом  $n$  и началом координат в одном из фокусов. Асимптоты гиперболы образуют угол  $\theta_n$  с осью антенны [255]:

$$\theta_n = \arccos\left(\frac{1}{n}\right) \approx 37.8^\circ.$$

### 3.6 Тонкопроволочная (струнная) антенна подповерхностного зондирования

Увеличение глубины зондирования за счёт увеличения амплитуды сигнала определяется двумя факторами – согласованием антенн с подстилающей средой и величиной эффективной поверхности антенн  $S_\lambda$ . В общем случае  $S_\lambda \sim \lambda^2$ , где под длиной волны  $\lambda$  понимается величина  $y_{\max} = \lambda/2$  – максимальный раскрыв антенны (см. гл. II, п. 2.1).

Переход от ВЧ - разъёма генератора импульсов к излучающей поверхности антенны осуществляют с помощью перехода в волноводной технике известного как ступенчатый [275]. Среди ступенчатых переходов при прочих равных условиях минимальную длину имеет переход с частотной характеристикой, описываемой полиномами Чебышева.

На рис. 3.45 показан внешний вид тонкопроволочной (струнной, серебро с проводимостью  $6.24 \cdot 10^7 \text{ См/м, } t = 20^\circ \text{C}$ ) антенны, она содержит оголовок антенны с чебышевским плавным переходом внутри и антенное полотно в виде двух крыльев.

#### 3.6.1 Чебышевский плавный переход

Среди плавных монотонных переходов наименьшую длину имеет плавный чебышевский переход (предельный случай ступенчатого чебышевского перехода); параметры последнего определяются из допуска на рассогласование

$|Γ|_{\max}$  и длинноволновую границу диапазона  $|\Lambda|_{-n}$ , коротковолновая граница диапазона  $-\Lambda|_n$ .

Расчётные соотношения имеют вид

$$|T_{11}|^2 = 1 + h^2 \cdot \left\{ \cos \frac{2\pi \cdot l_0}{\Lambda} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\Lambda}{\Lambda_{-n}} \right)^2} \right\}; \quad l_0 = \frac{\Lambda_{-n}}{2\pi} \cdot \text{Arch} \frac{R-1}{2 \cdot h \cdot \sqrt{R}}; \quad h^2 = \frac{|Γ|_{\max}^2}{1 - |Γ|_{\max}^2}; \quad |T_{11}|^2 -$$

функция рабочего затухания;  $l_0$ - полная длина перехода;  $R$  – перепад волнового сопротивления (в нашем случае:  $R=91.4 \text{ Ом} / 75 \text{ Ом}=1.218(6)$ ); здесь

$$|T_{11}|^2 = \frac{1}{1 - |S_{11}|^2}.$$

Частотной характеристикой перехода принято называть зависимость рабочего затухания  $T_{11}$  от  $\theta$ , эта зависимость всегда полиномиальна:

$$L = 1 + P^2(\cos \theta), \quad \theta = \frac{2\pi \cdot l}{\Lambda},$$

где  $P(\cos \theta)$  – чётный, либо нечётный полином Чебышева;  $\Lambda$ - длина волны в передающей линии;  $l$  – аппроксимационный шаг перехода.

Форма частотной характеристики определяется полосой пропускания

$$\theta = 2 \frac{\Lambda_{-n} - \Lambda_n}{\Lambda_{-n} + \Lambda_n},$$

если нет дисперсии, то выражение для  $\theta$  приводится к виду [275]:

$$\theta = 2 \frac{\Lambda_{-n} - \Lambda_n}{\Lambda_{-n} + \Lambda_n} = 2 \frac{f_{-n} - f_n}{f_{-n} + f_n} \approx 2 \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Преимуществом такого перехода является достаточно линейная фазо – частотная характеристика, при этом в полосе пропускания активная составляющая входного сопротивления перехода оказывается близкой к постоянной величине, а реактивная к нулю [275].



Рис. 3.45 – Установка для измерения параметров тонкопроволочной (струнной) антенны. На переднем плане прибор ОБЗОР-103 (белый), к нему подключён компьютер. На заднем плане проволочная (струнная) антенна: направленный ответвитель с измерительной секцией PLANAR; оголовок антенны с чебышевским плавным переходом внутри; антенное полотно тонкопроволочной (струнной) антенны в виде двух крыльев

На рис. 3.46 приведен график зависимости КСВН от частоты для оголовка тонкопроволочной (струнной) антенны (кривая 1) и оголовка МПА (кривая 2). Диапазон измеряемых частот –  $0.3 \div 700$  МГц. Измерения в воздухе: оголовок вывешивается вертикально в положение, которое занимает при собранной антенне.

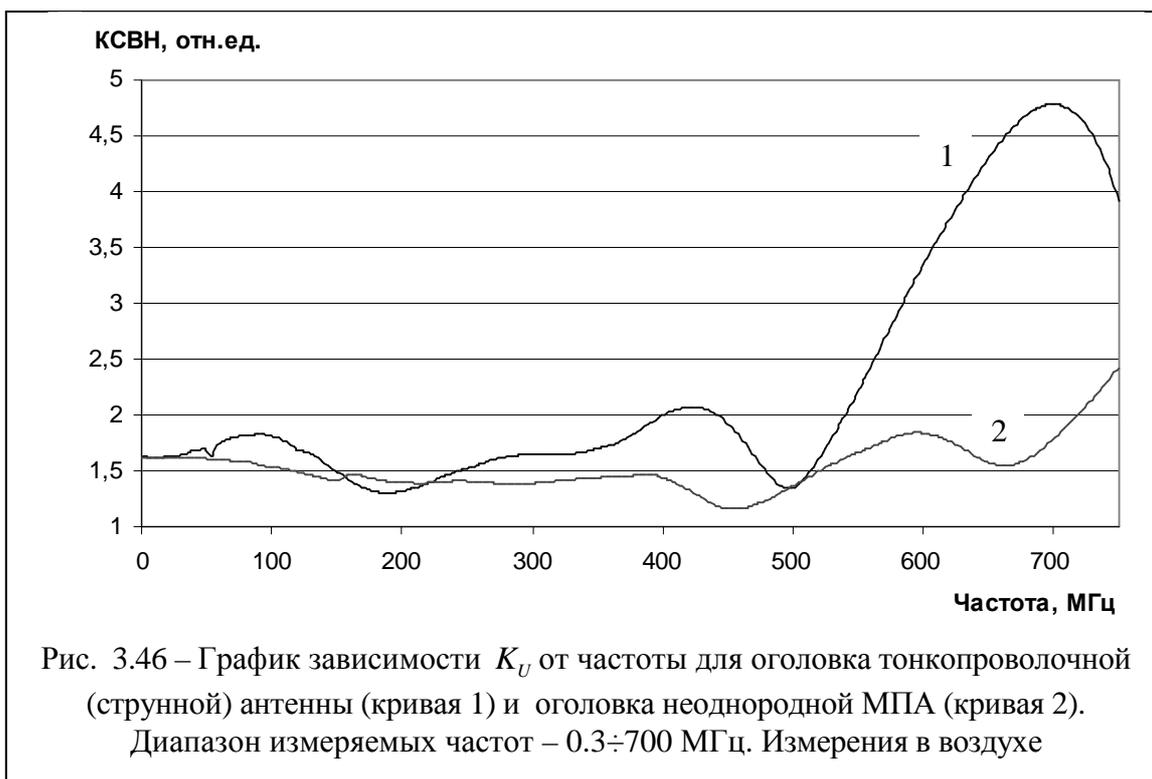


Рис. 3.46 – График зависимости  $K_U$  от частоты для оголовка тонкопроволочной (струнной) антенны (кривая 1) и оголовка неоднородной МПА (кривая 2). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷700 МГц. Измерения в воздухе

### 3.6.2 Антенное полотно тонкопроволочной (струнной) антенны

С учётом поверхности земли при сравнительно малом радиусе провода ёмкость двухпроводной линии (рис. 3.3а, 3.3б – с заменой микрополоска струной) на 1 м длины находят по формуле [291]:

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon_a}{\ln \left( \frac{2 \cdot h}{\rho} \cdot \frac{d}{\sqrt{4 \cdot h^2 + d^2}} \right)},$$

где  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха;  $d$ ,  $h$ ,  $\rho$  – обозначения в соответствии с рис. 3.3а, 3.3б.

Размеры поперечных сечений токоведущей линии и щели вида (3.15) сохраняются.

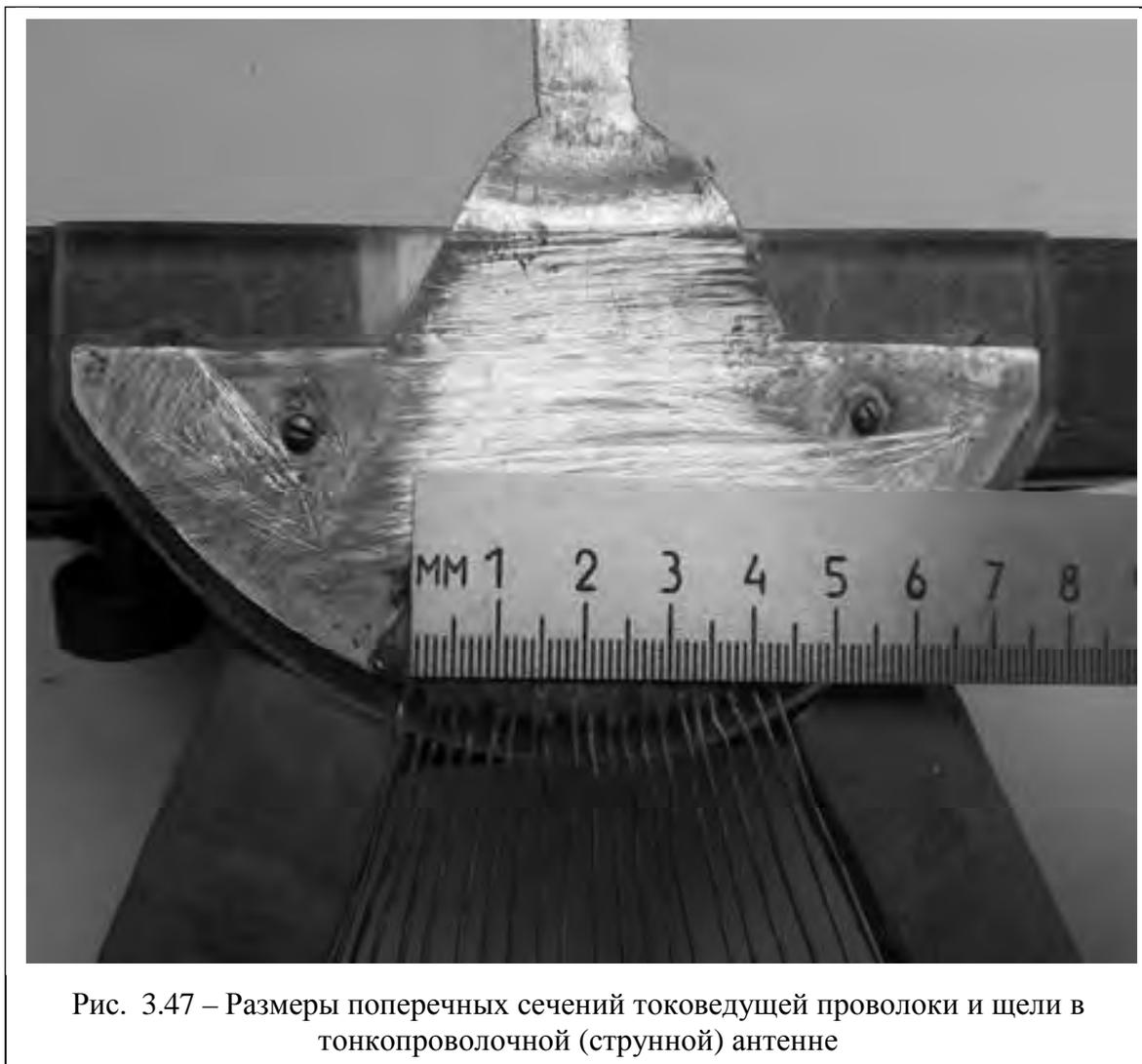
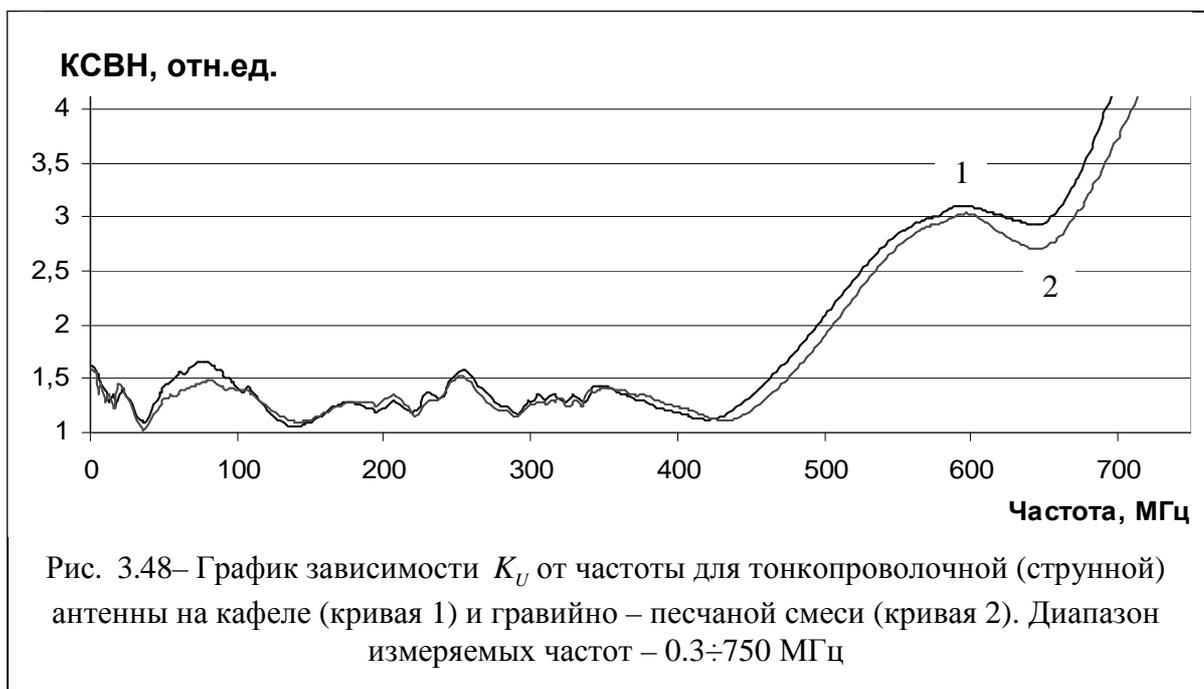


Рис. 3.47 – Размеры поперечных сечений токоведущей проволоки и щели в тонкопроволочной (струнной) антенне

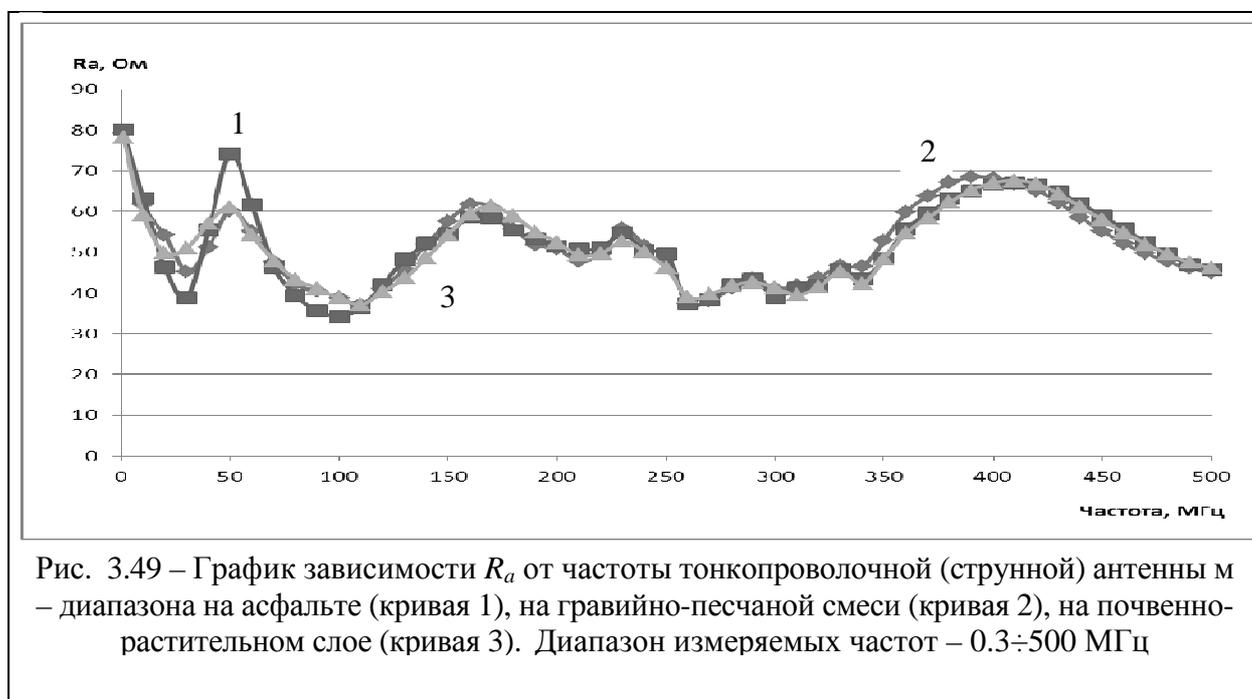
### 3.6.3 Результаты экспериментальных измерений частотных характеристик тонкопроволочной (струнной) антенны

Результаты экспериментальных измерений  $K_U$  от частоты для тонкопроволочной (струнной) антенны на двух границах раздела сред (воздух - гравийно – песчаная смесь, воздух – сухой бетон) в полосе частот 0.3÷700 МГц представлены на рис. 3.48.

Из результатов измерений, представленных на рис. 3.48 следует, что за значение полосы пропускания данной антенны следует по аналогии с неоднородной МПА принять значение  $K_U < 1.85$ , или  $S_{12} < 6\%$ . Это соответствует полосе 0.3÷500 МГц.



На рис. 3.49 представлены графики зависимости  $R_a$  от частоты струнной антенны м – диапазона на асфальте (кривая 1), на гравийно-песчаной смеси (кривая 2), на почвенно-растительном слое (кривая 3). На рис. 3.50 представлен график зависимости  $X_a$  для тех же слоёв.



На рис. 3.51 представлена фаза входного импеданса антенн для тех же слоёв. Фазы входных импедансов первой и второй антенн определяют запаздывание токов смещения относительно токов проводимости в антенне. Из графиков,

представленных на рис. 3.51, видно, что фазовый набег больше на асфальте: в диапазоне частот 0.3 ÷ 500 МГц изменяется от  $-14.3^\circ$  до  $+15.0^\circ$ .

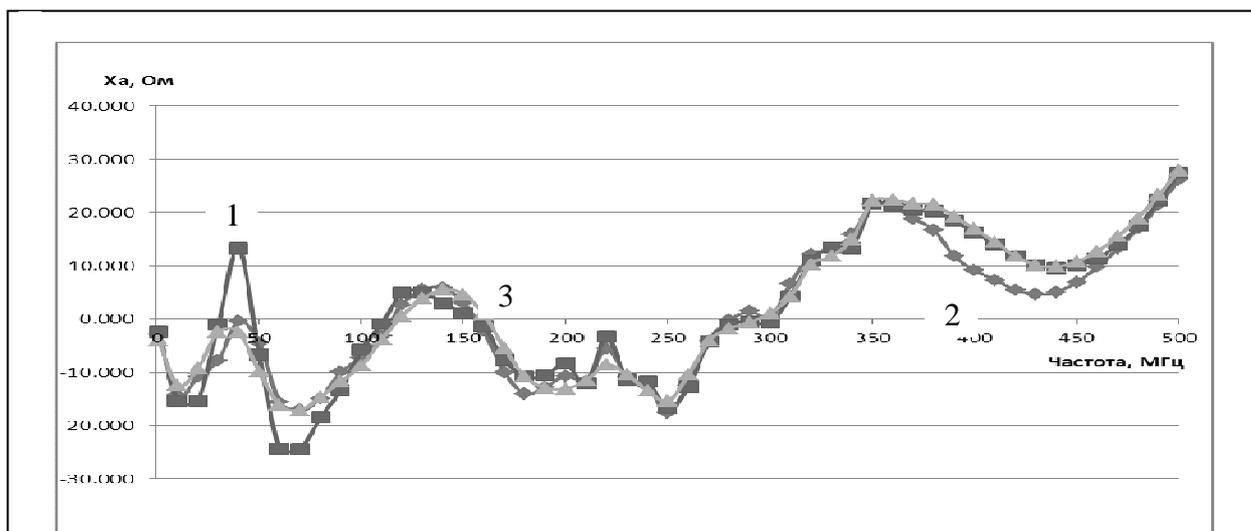


Рис. 3.50 – График зависимости  $X_a$  от частоты тонкопроволочной (струнной) антенны м-диапазона на асфальте (кривая 1), на гравийно-песчаной смеси (кривая 2), на почвенно-растительном слое (кривая 3). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷500 МГц

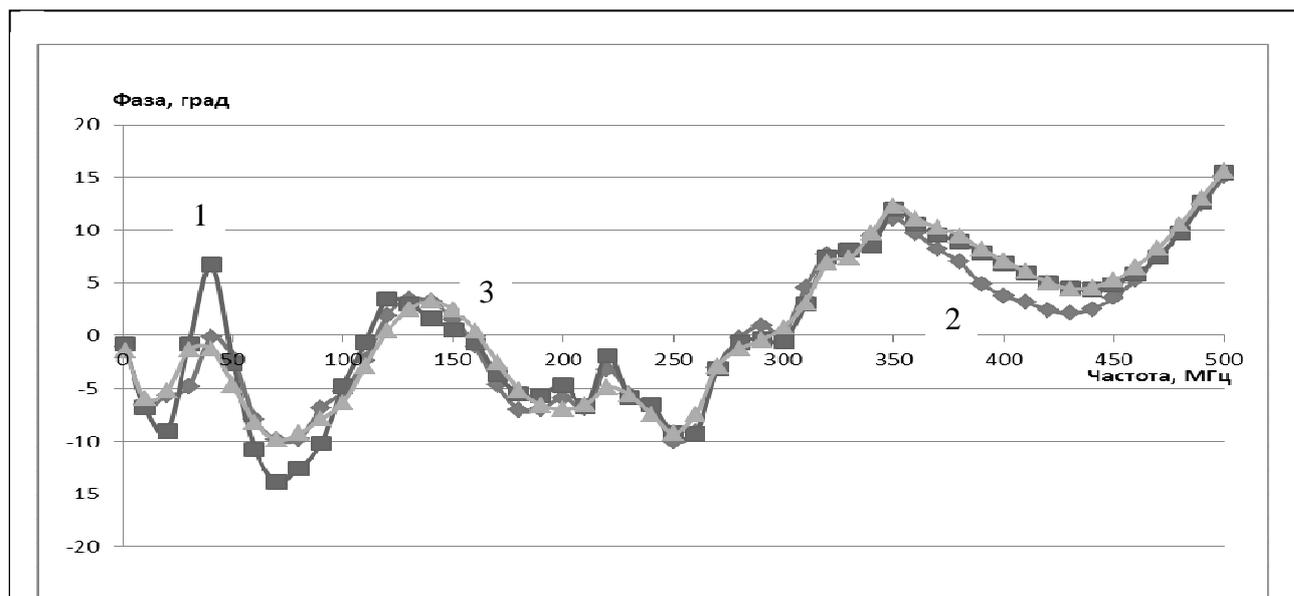


Рис. 3.51 – График зависимости фазы входного импеданса тонкопроволочной (струнной) антенны м-диапазона от частоты на асфальте (кривая 1), на гравийно-песчаной смеси (кривая 2), на почвенно-растительном слое (кривая 3). Диапазон измеряемых частот – 0.3÷500 МГц

Результаты голографического восстановления поля в дальней зоне для тонкопроволочной (струнной) антенны приведены в Прил. С. В табл. 3.1 сведены интегральные (по частоте) значения описанных выше антенн.

Таблица 3.1

<b>Название антенны</b>	<b><math>R_a</math>, Ом</b>	<b><math>X_a</math>, Ом</b>	<b><math>\varphi</math>, рад</b>	<b>КСВН, отн.ед.</b>	<b>Полоса, МГц</b>	<b><math>\lambda_{\max}</math>, длина волны, м</b>
Полосковая	65.13	0.19	-0.09	<1.85	0.3÷700	1.6
Монополь	69.54	-0.02	-0.01	<1.85	0.3÷650	0.46
Диполь в песке	69.52	0	0	<2.00	0.3÷650	0.56
Струнная	52.92	-0.15	0	<1.85	0.3÷500	3.5

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны три типа антенн подповерхностного зондирования: микрополосковая, монополярная, тонкопроволочная (струнная), объединённые принципом согласования с подстилающей средой по волновому сопротивлению.

2. Частотные особенности антенн в области низких частот позволяют выделять при СШП измерениях конкретно идентифицируемые признаки: наличие или отсутствие свободной воды (~ 25 МГц); газовые ловушки (~ 7 МГц – радон, ~ 4 МГц – воздух).

3. Простота метрологического обеспечения (обязательная проверка на работоспособность по любому из приведённых в табл. 3.1 параметров с помощью измерителя параметров четырёхполюсника ОБЗОР-103) практически исключает возможность измерений на несогласованных антеннах.

4. Для микрополосковых антенн параметрическая оптимизация включает следующие параметры: ширину щели и ширину токопровода; угол раскрыва антенны; тип дифракции на ребре токопровода; толщину подложки; точку запитывания «крыльев» антенны. Полученная после параметрической оптимизации неравномерность параметра  $S_{12}$  матрицы рассеяния антенны позволяет отметить следующее:

- для обеспечения сверхширокополосности антенны задача параметрической оптимизации размеров поперечных сечений токоведущих линий может быть сведена к нахождению решения условия развязки её погонной индуктивности с подстилающей средой;

- сверхширокополосность МПА подповерхностного зондирования, для которой выполняется условие развязки её погонной индуктивности с подстилающей средой, характерна для  $T$ - волн. У подобных антенн собственное значение продольного волнового числа существует начиная с частот, близких к нулевой частоте;

- основной тип излучаемой волны - гибридная  $T$  - волна [373], обусловленная продольным распределением тока в неоднородной МПА. Её гибридность обусловлена конструктивным возбуждением в антенне волны типа  $H_{10}$ ;

- характер её возбуждения обуславливается комплементарностью данной антенны: на излучение она работает как несимметричная полосковая антенна и, одновременно, как симметричная щелевая антенна;

- расхождение рассчитываемых и измеряемых параметров антенны, нагруженной на подстилающую среду,

$$(\Delta_{\phi_{УРБЕ}} \approx 2.84\%, \Delta Z \approx 3.77\%, \Delta L \approx 5.4\%)$$

при  $K_U \sim 1.85$  в полосе частот  $0.3 \div 700$  МГц позволяет считать, что задача развязки погонной индуктивности антенны с подстилающей средой решена.

6. Построение монополярной антенны осуществлено путём перехода от дипольной антенны в материальной среде (как идеально согласованной) к антенне «элемент Гюйгенса + крыло диполя». Неравномерность параметра  $S_{12}$  матрицы рассеяния антенны  $<6\%$  ( $K_U < 1.85$ ) в диапазоне частот  $0.3 \div 650$  МГц. Наличие комплекта монополярных антенн обеспечило безаварийную проходку более 17 км тоннелей в г. Сочи.

7. Построение тонкопроволочной (струнной) антенны осуществлено с целью увеличения эффективной поверхности антенн – глубины проникновения полезного сигнала. Неравномерность параметра  $S_{12}$  матрицы рассеяния антенны  $<6\%$  ( $K_U < 1.85$ ) в диапазоне частот  $0.3 \div 500$  МГц.

8. Излучённое поле несимметричного импульса представляет собой полуторопериодное колебание с псевдо несущей частотой: 25 МГц – для воды, 125 МГц – для песка, 147 МГц – для бетона. Поляризация линейная. Методы, предложенные Д. М. Бахрахом и Н. М. Цейтлиным по голографическому восстановлению поля в дальней зоне, работоспособны в м- диапазоне длин волн.

9. Простота и технологичность изготовления делают цену антенн доступной, а габариты позволяет транспортировать их по всему миру (США, Европа, Юго – Восточная Азия, Иордания, Африка).

#### IV ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

За последние сорок лет изучение свойств объектов с помощью СШП сигналов превратилось в один из самых перспективных путей развития современных технологий, в частности, в целое направление по изучению свойств подстилающей среды.

Подстилающая среда – это большой, постоянно увеличивающийся класс учитываемых соединений (от фракталов<sup>1</sup> до молекул). Сегодня главный акцент исследований перемещается в область более глубокого изучения молекулярных механизмов многоатомных молекул, имеющих большое число степеней свободы вращательных и трансляционных движений, которые определяют форму и физические свойства среды.

Известно [429], что попытка учёта вращательных и трансляционных движений на уровне моделей приводит к «размытию» частотных диэлектрических спектров, что существенно затрудняет их анализ и установление связи между измеряемыми макроскопическими свойствами мезофаз и такими микроскопическими характеристиками, как времена диэлектрической релаксации молекул.

«Размытые» диэлектрические спектры хорошо описываются с помощью функции непрерывного распределения времен релаксации [274], но построить модель сложных молекулярных релаксационных движений удастся лишь в исключительных случаях. Поэтому в мировой практике особую роль играют разрабатываемые численные методы восстановления распределения времен

---

<sup>1</sup> Фрактальная геометрия, ее первичные понятия рассмотрены в классических работах Б. Мандельброта, Р. Кроновера, А.А. Потапова, Г.Ю. Иванюка. Отличие искусственных от природных образований в Земле будет определяться фрактальностью их размерности: искусственные должны иметь целочисленную, а естественные – дробную (фрактальную) размерность. Фрактальная структура оказалась присуща многим гетерофазным средам со случайным и периодическим расположением фаз. К таким неоднородным средам можно в полной мере отнести земную почву, водонасыщенные среды, лесные и ледовые покровы, представляющие типичные фрактальные объекты. Например, геоэлектрическая модель тектонических нарушений (разломов) на поверхности кристаллического массива интересна с точки зрения фрактальных антенн - излучателей электромагнитных эмиссий литосферной природы. Проводящий (или диэлектрический) активный разлом можно рассматривать как полосковую (щелевую) антенну-излучатель в высокоомной среде, а всю разбитую системой разломов площадь кристаллического массива как плоскостную фрактальную излучающую систему. Фрактальная размерность тектонических нарушений (разломов) основана на методе встречного масштабирования [430].

релаксации непосредственно из экспериментально измеряемых спектров, чтобы обеспечить более совершенный анализ и лучшее понимание процессов диэлектрической релаксации. Разработка новых программных методов их диагностики является важной и актуальной задачей.

Традиционный подход к решению данной проблемы – объявить подстилающую среду макросистемой [85, 431] и уже для неё посредством измеряемых макропараметров отражать состояние системы<sup>2</sup>, что предполагает использование статистического формализма Э. Т. Джейнса, предложившего вариационный принцип описания динамики системы [432].

#### 4.1 Методы описания СШП сигналов

Точные непериодические и нестационарные решения уравнений Максвелла применительно к СШП сигналам предложены:

- Х. Ф. Хармутом [467] - метод решения нестационарного волнового уравнения с заданными начальными и граничными условиями является одним из наиболее универсальных, однако плата за это - значительная сложность и трудоёмкость, что наглядно иллюстрируется его использованием для решения задачи об излучении СШП сигналов простейшей антенной - вибратором Герца. Большинство получаемых выражений настолько громоздки, что подавляющее число интегралов не может быть вычислено точно;
- А. Б. Шварцбургом [406] - метод развивает точно решаемые модели импульсной оптики диспергирующих сред во временном представлении на основании полиномов Лагерра. Эти модели описывают взаимодействие ультракоротких видеоимпульсов с диэлектриками и проводниками. Поля, возбуждаемые видеоимпульсами в этих средах, представляются аналитически благодаря новым точным непериодическим и нестационарным решениям уравнений Максвелла

---

<sup>2</sup> В биологии М. Эйгеном было предложено оценивать скорость микроэволюционных процессов по информации, связанной с перераспределением генных частот, посредством информационной меры Кульбака. Связь меры С. Кульбака и «традиционной» меры Р. Фишера дана в [433].

(уравнений типа свёртки). Такие неразделяющиеся решения образуют математическую основу оптики несинусоидальных волн [435];

- О. А. Третьяковым - метод модового базиса [436], который опирается на теорию нестационарных операторных уравнений и общие результаты применения этой теории для уравнений Максвелла. Спектральное разложение искомого поля по модовому базису основано на ортогональных разбиениях Вейля гильбертова функционального пространства  $L_2$  и приводит к отщеплению от пространственно – временного дифференциального оператора, в уравнениях Максвелла - оператора пространственного дифференцирования. В результате получают ДУ с соответствующим набором начальных условий, именуемых эволюционными, поскольку в качестве независимой переменной в них входит время. Решая их, определяют скалярные функции времени, которые являются коэффициентами разложения искомого поля по модовому базису. Недостатком является сложность построения модового базиса в условиях конкретной задачи, поскольку метод основан на неполном разделении переменных, которое применяется к уравнениям Максвелла во временной области. После выделения из уравнений Максвелла оператора дифференцирования по поперечным координатам и доказательства его самосопряженности, получается модовый базис из собственных функций этого оператора, который можно использовать для разложения полей. В результате искомое решение во временной области представляется в виде модового разложения с коэффициентами, зависящими от продольной координаты и времени [436-438];

- Л. Ю. Астаниным, А. А. Костылевым [252] - метод обобщенной фазовой плоскости как альтернатива использования любых интегральных преобразований при описании СШП сигналов. К сожалению, метод не применим при рассмотрении задач распространения СШП сигналов в различных средах.

Также следует отметить метод функций Уолша – метод замены разложения в гармонический ряд исследуемых при решении уравнений Максвелла функций на разложение по ортогональной системе функций Уолша (ряд Фурье - Уолша);

метод мгновенного спектра, предложенный А. А. Харкевичем [490], который заключается в описании одиночного импульса текущим и мгновенным спектрами; метод атомарных функций (В. Ф. Кравченко, [491]), который даёт хорошую сопоставимость модели распространяющегося СШП сигнала с экспериментальными данными; кумулянтный анализ СШП сигналов (А. Б. Баев, Ю. В. Кузнецов, А. В. Александров [528]), который заключается в описании СШП сигнала кумулянтном четвёртого порядка.

Широко распространены следующие виды описания СШП сигналов.

Временное описание является наиболее удобным для анализа задач распространения во временной области, когда вид сигнала в данной точке пространства определяется с использованием вида сигнала на границе раздела сред как интеграл свёртки. Оно распространено при описании решения задач излучения СШП сигналов [327].

Частотное описание требуется для получения импульсных характеристик, которые позволяют получать аналитические решения для более широкого класса задач, так как основным их достоинством является возможность использовать в негармоническом анализе хорошо известные результаты классической теории.

Вейвлет (wavelet) анализ [439] с зависящей от времени частотой мало похож на реальные излучаемые импульсы ЭМИ СШП зондирования, отличающиеся наличием псевдо несущей частоты [531].

Деформация импульсов в диспергирующей среде [435] в частотной области описывается методом разложения фазы в ряд по степеням отношения спектральной ширины импульса  $\Delta\omega$  к несущей частоте  $\omega$  [262]. Однако для коротких СШП импульсов, излучаемых как полтора колебания поля, отношение  $\Delta\omega/\omega$  не является малым параметром; при этом количество спектральных компонент, требуемое для синтеза поля импульса в глубине среды, становится непомерно большим [440]. В разложении фазы все слагаемые содержат в знаменателе показатель преломления среды  $n(\omega)$ . Если в спектре содержится

частота отсечки диспергирующей прозрачной среды  $\omega_0$ , то  $n(\omega_0)=0$  и ряд, представляющий собой разложение фазы, расходится [435].

Отмеченные трудности связаны не с уравнениями Максвелла, а с традиционными методами их решения с помощью разделения переменных и преобразований Фурье как способа, удобного для описания квазимонохроматических волн с медленно меняющейся амплитудой и фазой.

Проблемы, с которыми сталкиваются исследователи диэлектрических свойств веществ, следующие. Во-первых, это наличие «неудобных» участков [429] частотного диапазона на стыке м- и дм- диапазонов длин волн (10–1000 МГц), обусловленных существованием в среде низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости. Во-вторых, экспериментальная модель отклика многослойной среды на ЭМИ СШП сигнал в этом частотном диапазоне представляет собой временную последовательность узкополосных, почти гармонических сигналов [421]. Как правило, значения частот лежат в диапазоне 1–400 МГц и на каждом временном интервале определяются геометрией и материалом (внутренним строением и, как правило, количеством связанной воды) слоя среды, находящегося на соответствующей глубине. Однако вывод о резонансной модели отклика многослойной среды на ЭМИ СШП сигнал был бы не полным без анализа волновых свойств отражённого сигнала и непоставленного вопроса о предельном поглощении сигнала определённых частот подстилающей средой, поскольку оснований для этого достаточно [310].

#### **4.2 Представление отражённого сигнала его эмпирическим распределением**

Поскольку затухания сигналов в основном<sup>3</sup> привязаны к длине волны и имеют размерность дБ/м, автоматически возникает вопрос о длинах волн в отражённом сигнале<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Исключение составляет определение затухания через ширину спектральной моды [441].

Ниже предлагается представление отражённого сигнала его эмпирической гистограммой<sup>5</sup>.

Представим отраженный сигнал ЭМИ СШП зондирования  $m$  – диапазона (рис. 4.1), записанным как временной ряд  $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)$ , вектором наблюдений  $\bar{y} = [y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)]^T = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ .

Определим эмпирические гистограммы для  $\bar{y}$  в каждый момент  $t_j$   $w_{t_j}(y_j, y_{j+1}, \dots, y_N)$  размерностью  $(N-j)$  для сколь угодно больших  $N$  (на рис. 4.1  $N=1800$ ) и всевозможных  $t_1 < t_2 < \dots < t_N$  как вероятность для  $i$ -го интервала группирования экспериментальных данных:

$$w_N(Y_i) = \frac{N_j}{N-j}, \quad (4.1)$$

где  $N_j$  – частота попаданий значений  $y_j$  в интервал  $[Y_i, Y_{i+1}]$ ;  $Y_i$  – вариационный ряд, построенный из амплитудных значений  $\bar{y}$ :  $Y_1 < Y_2, \dots, < Y_n$ . Здесь  $n$  – неизвестное собственное число степеней свободы  $\bar{y}$ , которое оценивается по формуле:

$$n = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{\Delta Y}, \quad (4.2)$$

где  $Y_{\max} = Y_n$  – максимальное значение  $\bar{y}$ ;  $Y_{\min} = Y_1$  – минимальное значение  $\bar{y}$ ;  $\Delta Y$  – вариационный интервал (далее – «ширина ящика»).

Тогда с вероятностью

<sup>4</sup> Обобщение на случай несамосопряжённого (собственные значения краевой задачи – комплексные) и недиагонального эллиптического оператора сделано А. Г. Свешниковым в начале 60-х годов (докт. дисс. «Методы исследования колебаний в нерегулярных волноводах», 1963). Нерегулярный участок волновода со сложной боковой поверхностью с помощью введения неортогональной криволинейной системы координат отображается на регулярном цилиндрическом волноводе постоянного сечения с анизотропным заполнением, которое определяется метрическим тензором преобразования координат: решается вопрос о возможности предотвратить трансформацию мод путем выбора специального анизотропного заполнения волновода. Поле в любом сечении разлагается по системе нормальных волн с коэффициентами разложения, зависящими от продольной координаты. Найденное решение является асимптотическим при стремлении поглощения к нулю [442]. А. Г. Свешниковым сформулирован принцип парциальных условий излучения, в котором на решение для фиктивной границы заданной области накладываются условия в виде функционалов, что позволяет перейти к задаче в ограниченной области [443, 444].

<sup>5</sup> Пусть  $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)$  – результаты наблюдений, которые могут быть представлены вариационным рядом  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , где  $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n, n \leq N$ . Эмпирическое распределение  $w_N(Y_i)$  такого ряда приписывает каждому результату наблюдений  $y_j$  попадание в интервал  $[Y_i, Y_{i+1}]$  с вероятностью  $\frac{1}{N}$ . Вероятности, отвечающие попаданиям в  $i$ -й интервал, складываются.

$$P_i(y_i) = \int_{Y_i}^{Y_{i+1}} p(y) dy, \text{ и на основании теоремы о среднем } P_i(Y_i) = \int_{Y_i}^{Y_{i+1}} p(y) dy = P_i(y_i) \cdot \Delta Y.$$

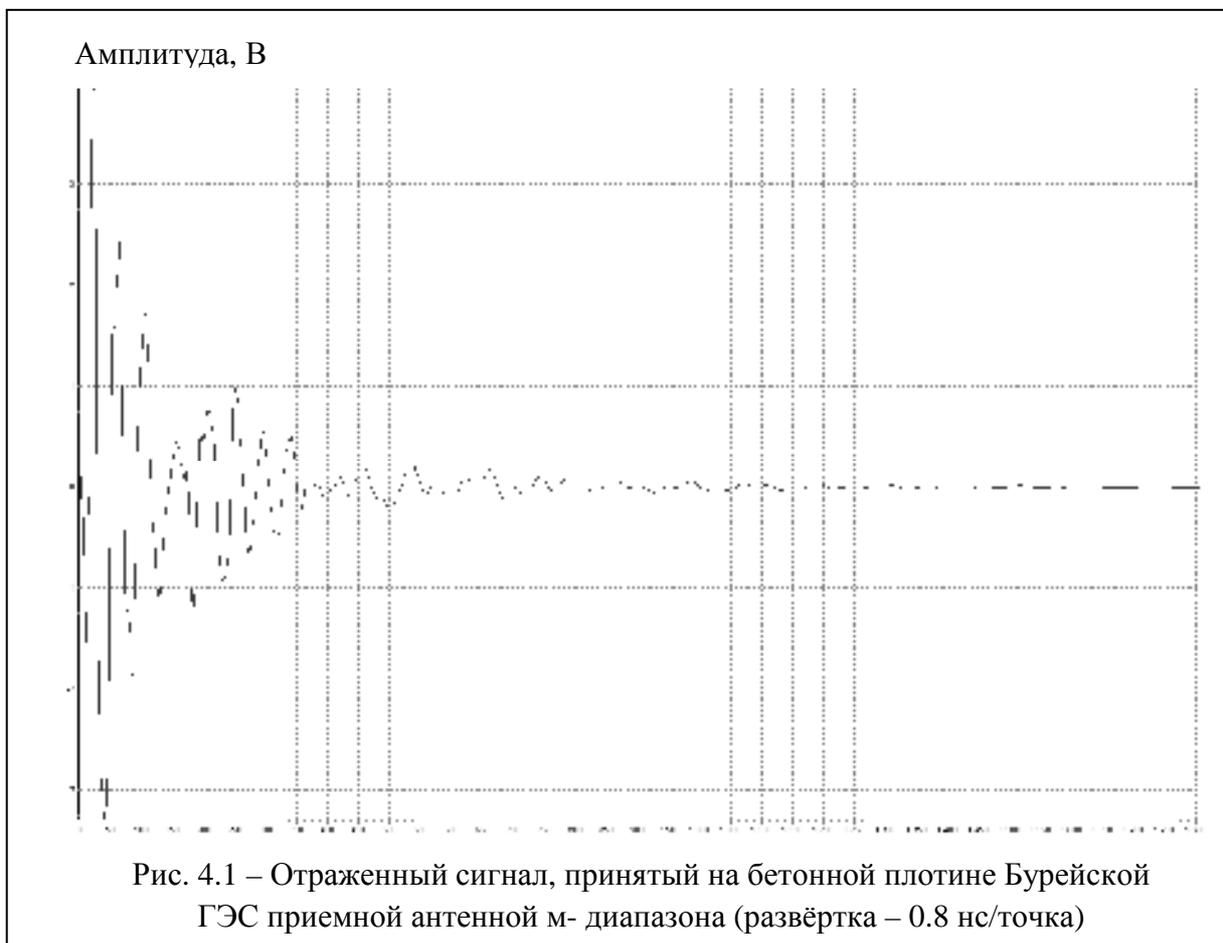
Очевидно, что  $P_i(Y_i)$  должно быть тождественно эмпирической плотности вероятности (невыполнение тождества говорит о качестве модели  $p(y)$ ):

$$w_N(Y_i) = \frac{N_j}{N-j} \equiv P_i(y_i) \cdot \Delta Y.$$

Погрешность  $n$  по определению, задаваемому (4.2), равна

$$\delta = M[\hat{n} - n] = \{M[Y_{\max}] - M[Y_{\min}]\} / \Delta Y - n,^6 \quad (4.3)$$

$M[\dots]$  - знак математического ожидания.



В настоящее время отсутствует метод определения оптимального числа интервалов группирования экспериментальных данных  $n$  (далее «ящиков»). Так, для решения этой задачи в [446] приведено более 30 способов построения эмпирического распределения, устанавливающих связь между объёмом выборки  $N$  и числом ящиков  $n$ ; наиболее используемые из них приведены в [260, 447-450].

<sup>6</sup> Распределения экстремальных величин могут быть выведены из точного исходного распределения [445].

Первая публикация по этому вопросу относится к 1730 г<sup>7</sup>. В неизвестное число ящиков  $n$  бросают  $N$  шаров так, что в любой ящик каждый шар попадает с вероятностью  $1/n$ . В [451] показано, что единственной несмещенной оценкой с равномерно-минимальной дисперсией для параметра  $n$  будет

$$\hat{n} = S(N+1, k) / S(N, k), \quad (4.4)$$

где  $S(N, k)$  – число Стирлинга II рода:  $S(N, k) = S(N-1, k-1) + k \cdot S(N-1, k)$ ;  $k$  – достаточная статистика для неизвестного  $n$ ;  $S(0, 0) = 1, S(N, k) = 0$  при  $k > N, k < 0, N > 0$ .

Возникает вопрос: «Что будет, если в ящик ничего не попадёт?». Действительно, достаточно в задаче о подбрасывании монеты заменить твёрдую поверхность стола песочницей с влажным рыхлым песком и число степеней свободы у подброшенной монеты станет равным трём («решка», «орёл», «ребро»), а у монеты с идеальными геометрическими формами и таким же центрированием число степеней свободы в песочнице выродится в одно – «ребро», два ящика («решка» и «орёл») будут пустыми, но появится новая степень свободы – угол наклона, под которым монета застрянет в песке.

Вырождение степеней свободы  $n$  математически сформулировано в виде «концентрации энтропии» Э. Т. Джейнсом. «...Без использования логарифмических форм, которые мы сейчас называем «энтропия», Якоб Бернулли и Пьер Симон Лаплас предложили обоснование, рассчитав множества следующим образом:

$$W = N! / (N_1! N_2! \dots N_n!), \quad (4.5)$$

но сегодня мы предпочитаем использовать приближение Стирлинга для вывода формы энтропии Шеннона

<sup>7</sup> Джеймс Стирлинг в работе *Methodus differentialis*, London, 1730 впервые дал асимптотическое разложение Г-функции (ряд Стирлинга). Формула Стирлинга прекрасно описывает увеличение размерности макросистем (биология, экономика, социальная сфера). Автор [422] получил следующее разложение ряда Стирлинга

$$\Gamma(p+1) = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot p} \cdot \left(\frac{p}{e}\right)^p \cdot \left[ 1 + \frac{12}{p} + \frac{1}{288p^2} - \frac{139}{51840p^3} - \frac{571}{2488320p^4} + \frac{163879}{20901888p^5} + \frac{5246819}{75246796800 \cdot p^6} + O(p^{-7}) \right].$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} N^{-1} \cdot \log W = -\sum \left( \frac{N_i}{N} \right) \cdot \log \left( \frac{N_i}{N} \right) \gg^8.$$

Э. Т. Джейнс установил базис, сейчас более известный как «МЕ формализм» или «формализм Джейнса», и нашёл своё место в Байесовской статистике. По К. Шеннону энтропия непрерывного распределения с плотностью  $p(Y)$  (К. Шеннон, 1948; Э. Т. Джейнс, 1957, 1982) имеет вид:

$$H(y) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(y) \cdot \log[p(y)] \cdot dy = - \sum_{i=1}^n P(Y_i) \cdot \log P(Y_i) + \log \Delta Y. \quad (4.6)$$

Непрерывное распределение с максимальной энтропией характеризуется собственными моментами

$$\int_{-\infty}^{\infty} y^i \cdot p(y) \cdot dy = \mu_i, i = 0, 1, \dots, 4.$$

Лагранжиан (R. Zellner, A. Highfield, 1988 [530]) выглядит как

$$L[y, p(y), l] = \int_{-\infty}^{\infty} p(y) \cdot \log[p(y)] \cdot dy + \sum_{i=0}^4 l_i \cdot \left( \int_{-\infty}^{\infty} y^i \cdot p(y) \cdot dy - \mu_i \right),$$

где  $l_i$  – множители Лагранжа. Тогда

$$\log[p(y)] + 1 + l_0 + l_1 \cdot y + l_2 \cdot y^2 + l_3 \cdot y^3 + l_4 \cdot y^4 = 0,$$

отсюда следует, что плотность непрерывного распределения с максимальной энтропией имеет вид

$$p(y/l) = \exp[-(1 + l_0 + l_1 \cdot y + l_2 \cdot y^2 + l_3 \cdot y^3 + l_4 \cdot y^4)].$$

Решение задач на функционалах (множителях) Лагранжа строится как решение с учетом ограничений на средние значения [432]<sup>9</sup>.

На больших временах используется эргодическая теорема, далее - законы больших чисел, или явление концентрации инвариантной (стационарной) меры:

<sup>8</sup> Цитируется по [432], см. также [454]. Очевидно, что  $N_1 + \dots + N_n = N$ . При численном расчете факториалов необходимо соблюдать осторожность, т. к. скорость роста  $(p+1)!$  как у  $\Gamma(p+1)$  и при 32-битной разрядности процессора вычислять  $\Gamma(p+1)$  без переполнения разрядности можно только для  $(p+1) \leq 170$ . Например, значение  $\Gamma(49+1) = 6e+62$ .

<sup>9</sup> Наиболее известные решения: равномерное распределение  $p(y)$  - при ограничении на пиковые значения сигнала; гауссовское распределение  $p(y)$  - при ограничении на мощность сигнала (дисперсию). Если предположить, что дисперсия измерений постоянна лишь в среднем, то окажется, что величина энтропии будет максимальной, когда исходная совокупность погрешностей измерений подчинена распределению Лапласа [453], см. также [455].

«хорошие» (липшицевы, т. е. удовлетворяющие соотношению  $|f(x) - f(y)| \leq |x - y|$ ) функции на «хороших» (гладких, с ненулевой кривизной) компактных пространствах с мерой большого числа измерений<sup>10</sup>. Для случая стационарных цепей Маркова, как показано А. Хинчиным, достаточно длинные траектории всегда можно разбить на два класса [426]. Все траектории первого класса обладают равными вероятностями вида

$$P = \exp\{-s \cdot N\},$$

где  $s$  – длина Марковской цепи (число шагов);  $N$  – так называемая энтропия эволюции на один шаг (траекторная энтропия)

$$N = -\sum_i \sum_j p_i \cdot p_{ij} \cdot \log p_{ij}.$$

Число таких траекторий есть величина  $\exp\{s \cdot N\}$ . Про второй класс траекторий известно, что на основании эргодической теоремы для конечных марковских цепей сумму вероятностей этих траекторий при достаточно большом  $s$  можно сделать произвольно малой

В случае ЭМИ СШП сигналов за определением  $\Delta Y$  с точки зрения физических процессов стоит волна – такая временная последовательность  $y_j$ , которая образуется тогда, когда имеется хотя бы два значения в  $i$ -ом ящике, таких, что время для этих значений не совпадает ( $t_{j1} \neq t_{j2}$ ). В нашем случае построение эмпирической гистограммы есть построение волнового спектра. Непрерывное изменение эмпирической гистограммы (волнового спектра) может быть обусловлено только физическими процессами, например, наличием сильной частотной дисперсии диэлектрической проницаемости подстилающей среды для сигналов м-, дм- диапазонов длин волн.

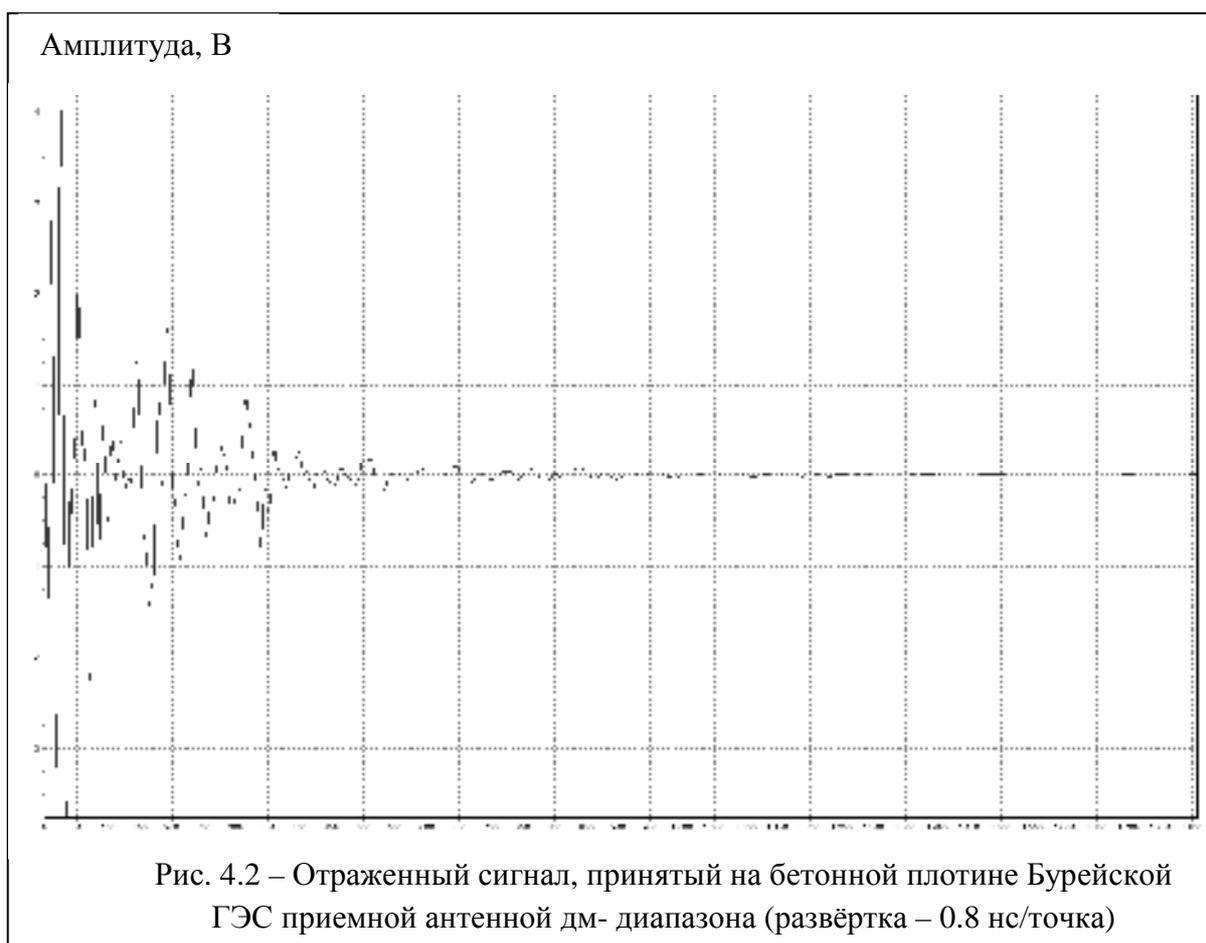
Введение энтропии двух процессов обусловлено, в первую очередь, невозможностью отказа от учёта логарифма ширины ящика в одномерной

---

<sup>10</sup> Почти везде близки к медиане [456] – оптимальной оценке для распределения Лапласа.

энтропии и ограниченностью применения множителей Лагранжа для  $\max$  энтропии<sup>11</sup>.

Аналогично введённому выше представлению отраженного сигнала ЭМИ СШП зондирования м-диапазона временным рядом  $(y_1, y_2, \dots, y_N)$  представим временной ряд дм-диапазона  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  вектором наблюдений  $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T = [x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)]^T$ , который будет полностью определен, если заданы его N-мерные плотности вероятности  $w_N(x_{t_1}, x_{t_2}, \dots, x_{t_N})$  для сколь угодно больших N и всевозможных  $t_1 < t_2 < \dots < t_N$ .



Поскольку энтропия для двух процессов определяется как

$$H(x, y) = H(x) + H(y) - I(x, y), \quad (4.7)$$

<sup>11</sup> В [455] приводится решение с применением четырех множителей Лагранжа – соответственно четырех ненулевых моментов распределения. Отмечается, что при нулевом эксцессе распределение вырождается в гауссовское. Задача  $\max$  энтропии для центральных моментов вплоть до четвертого порядка имеет решение только тогда, когда эксцесс находится на отрезке  $[-2; 0]$ .

логарифмы ширины ящика по  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  в (4.6) сокращаются с логарифмами ширины ящиков взаимной информации, но появляется «третий игрок» в виде взаимной информации, чье интегральное представление имеет вид

$$I(x, y) = \int_X \int_Y p(x, y) \cdot \log \frac{p(x, y)}{p(x) \cdot p(y)} \cdot dx \cdot dy. \quad (4.8)$$

В общем случае выражение для энтропии двух процессов выглядит как

$$H(X, Y) = -\sum_{i=1}^n P_i(X_i) \cdot \log P_i(X_i) - \sum_{j=1}^m P_j(Y_j) \cdot \log P_j(Y_j) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}(X_i, Y_j) \cdot \log \frac{P_{ij}(X_i, Y_j)}{P_i(X_i) \cdot P_j(Y_j)}, \quad (4.9)$$

где  $P_{ij}(X_i, Y_j)$  – двумерная плотность вероятностей векторов наблюдений  $\bar{x}, \bar{y}$ ;  $n, m$  – количество ящиков для  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ ; двойная сумма – выражение для  $I(x, y)$ ;  $P_j(Y_j)$  – соответствуют (4.1) и (4.2), для  $P_i(X_i)$  – аналогично. Очевидно, что  $n \neq m$ , поскольку для каждой из одномерных энтропий  $H(x)$  и  $H(y)$  ищутся свои  $H_{\max}(X)$  и  $H_{\max}(Y)$  соответственно.  $P_{ij}(X_i, Y_j)$  представляет собой матрицу размером  $n \times m$ <sup>12</sup>. Предполагается перекладка ящиков, из меньшего числа ящиков в большее.

Таким образом, переход к энтропии двух процессов подразумевает появление третьего игрока – взаимной информации. Его роль состоит в обнулении логарифма от ширины ящика в (4.6).

### 4.3 Шахматная доска как способ построения двумерной ЭПВ

Идея шахматной доски принадлежит С. Кульбаку [424]: предположим, что эмпирическое распределение  $w_N(Y_i)$  расклассифицировано (раскассировано) в строку длиной  $n$ , которое определено по критерию  $\max$  энтропии, а гипотетическое распределение  $p(Y_i; \theta)$  – в столбец такой же длины  $n$ , тогда может

<sup>12</sup> В теории марковских процессов её принято называть матрицей переходных вероятностей. Она исследуется, как правило, оператором Фробениуса - Перрона - оператором изменения во времени распределений вероятности в отображениях (системах с дискретным временем). Оператор Фробениуса - Перрона (знание его собственных функций и собственных чисел) позволяет исследовать одномерные хаотические модели, предсказывать их поведение во времени, а также изучать их свойства (например, исследовать скорость установления инвариантного распределения - инвариантной плотности; автокорреляционные функции). Однако следует отметить, что дискретное время в такой матрице м.б. представлено как геометрической прогрессией, так и волновой функцией [299].

быть введена мера (информационная мера Кульбака, или мера Кульбака – Лейблера – Санова [424, 457÷460], далее ИМК)

$$I_N(n) = \int_{R^n} w_N(\bar{y}) \cdot \log \frac{w_N(\bar{y})}{p(\bar{y}; \theta)} d\bar{y} \quad (4.10)$$

как мера приближения условной энтропии к безусловной (свойства: строго выпукла вниз; всегда  $\geq 0$ ; относительно равномерного  $p(Y; \theta)$  с точностью до замены знака и сдвига начала отсчёта совпадает с энтропией).

А. Таглиани [461] показал, что

$$V \leq 3 \cdot \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{9} \cdot I_N(n)}}, \quad (4.11)$$

где  $V = \int_Y |w_N(Y) - p(Y; \theta)| \cdot dY$  - мера изменения эмпирического и модельного распределений. Очевидно, что  $\lim_{I_N(n) \rightarrow 0} V = 0$ <sup>13</sup>.

О независимости процессов  $X, Y$ . Антенны м-, дм- диапазонов длин волн разнесены в пространстве и измеряются каждый своим каналом (приёмник двухканальный); для каждого из каналов свой независимый АЦП, запускаемый своим (независимым) каналом синхронизации.

Для построения из эмпирических гистограмм двух независимых процессов  $X, Y$  эмпирического аналога величины  $p(x, y)$  из (4.8) используется 3D модель: по  $z$  откладываются эмпирические плотности вероятности  $X$  и  $Y$ , по вертикали – вариационный ряд  $X_i$ , по горизонтали – вариационный ряд  $Y_j$ , в плоскости  $XY$  образуется «логическая» сумма событий  $X_i + Y_j$ .

Возникает задача по перераспределению данных – перекладыванию данных из  $n$  ящиков в  $m$ , и наоборот. Математически: поиск такого значения аргументов  $N_{1x,y}$ , при котором по двум независимым векторам  $\{\bar{x}, \bar{y}\}$  с помощью величин интервалов вариации  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  находится  $\max$  функционала вида

$$H(X, Y) \rightarrow \max, \quad (4.12)$$

<sup>13</sup>Использование расстояния Кульбака – Лейблера в качестве штрафной функции обеспечивает алгоритму свойство монотонности, что означает увеличение функции правдоподобия на каждом шаге итерации. Чтобы обеспечить сходимость оценки к локальному  $\max$  правдоподобия приходится использовать гладкие (дифференцируемые по оценке) распределения. Вопросы сходимости см. в [462].

по которому, уже полагая, что  $N_{1x,y} = \text{Const}$ , находятся значения  $n_{1x} = \arg \max_{\text{var } \Delta X} [H(X, X)], \exists w_N(X_i) = 0$  и  $n_{1y} = \arg \max_{\text{var } \Delta Y} [H(Y, Y)], \exists w_N(Y_i) = 0$ .

Введение пустого ящика, показанное как  $w_N(Y_i) = 0$  либо  $w_N(X_i) = 0$ , в эмпирическое распределение (Прил. D) обусловлено необходимостью трансформации матрицы взаимной информации  $m \times n$  в определитель<sup>14</sup>. Такая трансформация в значительной степени унифицирует форму записи  $H(x)$  и  $H(y)$ , делая их идеально алгоритмическими:

$$\begin{aligned} H_i &= -\frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot [\log N_i - \log N]}{N} = -\frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \log N_i}{N} + \frac{\log N}{N} \sum_{i=1}^n N_i = \\ &= -\frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \log N_i}{N} + \log N, \\ H_j &= -\frac{\sum_{j=1}^n N_j \cdot [\log N_j - \log N]}{N} = -\frac{\sum_{j=1}^n N_j \cdot \log N_j}{N} + \frac{\log N}{N} \sum_{j=1}^n N_j = \\ &= -\frac{\sum_{j=1}^n N_j \cdot \log N_j}{N} + \log N; \sum_{j=1}^n N_j = N; \sum_{i=1}^n N_i = N, \end{aligned} \quad (4.13)$$

здесь  $i \rightarrow \bar{x} \in [X_i, X_{i+1}]$ ;  $j \rightarrow \bar{y} \in [Y_j, Y_{j+1}]$ ;  $N$  – объём выборки;  $n$  – число ящиков.

Тогда эмпирическое выражение для взаимной информации  $I(x, y)$  из (4.8) выглядит как

$$I_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(N_i + N_j)}{2N} \cdot \log \frac{(N_i + N_j)}{\frac{N_i}{N} \cdot \frac{N_j}{N}} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (N_i + N_j) \cdot \log \left\{ 2 \cdot N \cdot \left( \frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right) \right\}. \quad (4.14)$$

Основным ограничением в (4.14) является сингулярность типа  $\lim_{x \rightarrow 0} (x \cdot \log x)$ , или вопрос о существовании ящиков с нулевым заполнением. Если ввести их существование, это заметно ослабит ограничение о равномерном распределении для величин  $\Delta X, \Delta Y$ .

Нахождение  $\max H(X, Y)$  в (4.9) представляет собой решение первой вариационной задачи теории информации.

<sup>14</sup> Основным ограничением на существование ящиков с нулевым заполнением является сингулярность типа  $\lim_{x \rightarrow 0} (x \cdot \log x)$ , поскольку это является достаточно принципиальным для построения характеристических функций от эмпирического распределения с последующим вычислением по ней кумулянтов [463].

Разложив выражение под логарифмом в (4.14), получим формулу для выражения информации по Шеннону<sup>15</sup> как разность информационной меры Хартли и энтропии:

$$I_{\text{Shen}}(X, Y) = \log n - H(X, Y) = \log n - \left[ -\frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \log N_i + \sum_{j=1}^n N_j \cdot \log N_j}{N} + \right. \\ \left. + 2 \cdot \log N - \log N + 1 - \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (N_i + N_j) \cdot \log \left\{ \left( \frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right) \right\} \right]. \quad (4.15)$$

Очевидно, что в (4.15) Шеннон использовал разность между мерой Хартли и энтропией<sup>16</sup>.

Поиск значения аргумента  $N_{2x,y}$ , при котором по двум независимым векторам  $\{\bar{x}, \bar{y}\}$  с помощью варьирования по ширине ящиков  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  минимизируется функционал вида

$$I_{\text{Shen}}(X, Y) \rightarrow \min, \quad (5.16)$$

по которому (уже полагая, что  $N_{2x,y} = \text{Const}$ ) находятся значения  $n_{2x} = \arg \min_{\text{var } \Delta X} [I_{\text{Shen}}(X, X)]$ ,  $\exists w_N(X_i) = 0$  и  $n_{2y} = \arg \min_{\text{var } \Delta Y} [I_{\text{Shen}}(Y, Y)]$ ,  $\exists w_N(Y_i) = 0$ , представляет собой вторую вариационную задачу теории информации.

Характер поведения  $I_{\text{Shen}}(X, Y)$  как функции объёма выборки  $N$  позволяет найти точку, в которой скорость изменения информации по Шеннону как

<sup>15</sup> Причиной введения Клодом Шенноном новой информационной меры является наличие систематического смещения максимума энтропии, определяемого как  $\beta = M[H^*(f_1, f_2, \dots, f_n)] - H(f_1, f_2, \dots, f_n)$ ,  $M[\dots]$  – мат. ожидание. В [425] показано, что

$$\beta = \sum_{i=1}^n \Delta y \cdot f_i \left\{ \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \exp(-4.5) \left[ \left( \frac{\sigma_j}{f_i} \right) \cdot \frac{3}{2} + \left( \frac{\sigma_j}{f_i} \right)^4 \cdot \frac{1}{3 \cdot 4} \cdot (3^3 + 3^2) + \dots + \left( \frac{\sigma_j}{f_i} \right)^N \cdot \frac{1}{2l(2l-1)} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot (3^{N-1} + 3^{N-3} \cdot (N-1) + \dots + 3(N-1)!!) \right] - \sum_{k=1}^{N/2} \left( \frac{\sigma_j}{f_i} \right)^{2k} \cdot \frac{(2k-1)!!}{2k(2k-1)} \right\} + R_n \left( \frac{\sigma_j}{f_i} \right),$$

где  $R_n(\sigma_j/f_i)$  – остаточный член;  $\sigma_j$  – дисперсия дискретных значений  $d_j$ ;  $\Delta y$  – интервал дискретизации.

<sup>16</sup> Мера Хартли получила свою известность как энтропия алфавита с равномерным распределением вероятности  $\frac{1}{n}$  для букв – полностью аналогична  $I_N(n)$  в ИМК для равномерного распределения  $p(Y, \theta)$ .

$I_{\text{Shen}}(X, Y) = f(N)$  будет претерпевать разрыв [280]<sup>17</sup>. Порядок вычисления этой точки сводится к следующей процедуре: для определения кривизны в точке

$$k(X, Y) = \frac{\frac{\partial^2 (I_{\text{Shen}}(Y, Y))}{\partial N^2}}{\left[ 1 + \left( \frac{\partial I_{\text{Shen}}(Y, Y)}{\partial N} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}},$$

где  $N$  – объём выборки, находятся первая и вторая производные для  $I_{\text{Shen}}(X, Y) = f(N)$ :

$$\frac{\partial^2 I_{\text{Shen}}(X, Y)}{\partial N^2} = \log n - \log N - 1 - \frac{3}{N^3} - \frac{2}{N^3} \cdot \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \log N_i + \sum_{j=1}^n N_j \cdot \log N_j}{N} - \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (N_i + N_j) \cdot \log \left\{ \left( \frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right) \right\} \right\},$$

$$\frac{\partial I_{\text{Shen}}(X, Y)}{\partial N} = \log n - \log N + \frac{3}{N} + \frac{1}{N^2} \cdot \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \log N_i + \sum_{j=1}^n N_j \cdot \log N_j}{N} - \frac{1}{2 \cdot N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (N_i + N_j) \cdot \log \left\{ \left( \frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right) \right\} \right\},$$

$$\frac{\partial (\log n)}{\partial N} = -\log N - 1 + \log n + \frac{1}{N}.$$

Поиск значения объёма данных  $N_{3x,y}$ , при котором по двум независимым векторам  $\{\bar{x}, \bar{y}\}$  с помощью варьирования по ширине ящиков  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  находится  $\max$  функционала вида

$$k(X, Y) \rightarrow \max, \quad (4.17)$$

по которому (уже полагая, что  $N_{3x,y} = \text{Const}$ ) находятся значения

$$n_{3x} = \arg \max_{\text{var } \Delta X} [k(X, X)], \exists w_N(X_i) = 0 \text{ и } n_{3y} = \arg \max_{\text{var } \Delta Y} [k(Y, Y)], \exists w_N(Y_i) = 0, \text{ представляет}$$

собой третью вариационную задачу теории информации [280].

#### 4.4 Результаты построения эмпирических распределений

<sup>17</sup> Порядок применения первой и второй производных по ящикам для энтропийно – подобных критериев впервые показан в [425].

На рис. 4.3 представлена ЭПВ отраженного сигнала м-диапазона без ящиков с нулевым заполнением, на рис. 4.4 - с учётом ящиков с нулевым заполнением. ЭПВ на рис. 4.3, 4.4 построены по критерию максимум энтропии (4.12), в котором  $H(X, Y)$  определена с учётом третьего игрока выражениями (4.13÷4.14). На рис. 4.5, 4.6 представлены аналогичные ЭПВ сигнала дм-диапазона.

На рис. 4.7 приведён пример проявления сингулярности в ЭПВ сигнала дм-диапазона. Очевидно, что величина  $n$  как оценка собственного числа степеней свободы входного процесса весьма различается для случаев учёта или не учёта сингулярности в ЭПВ.

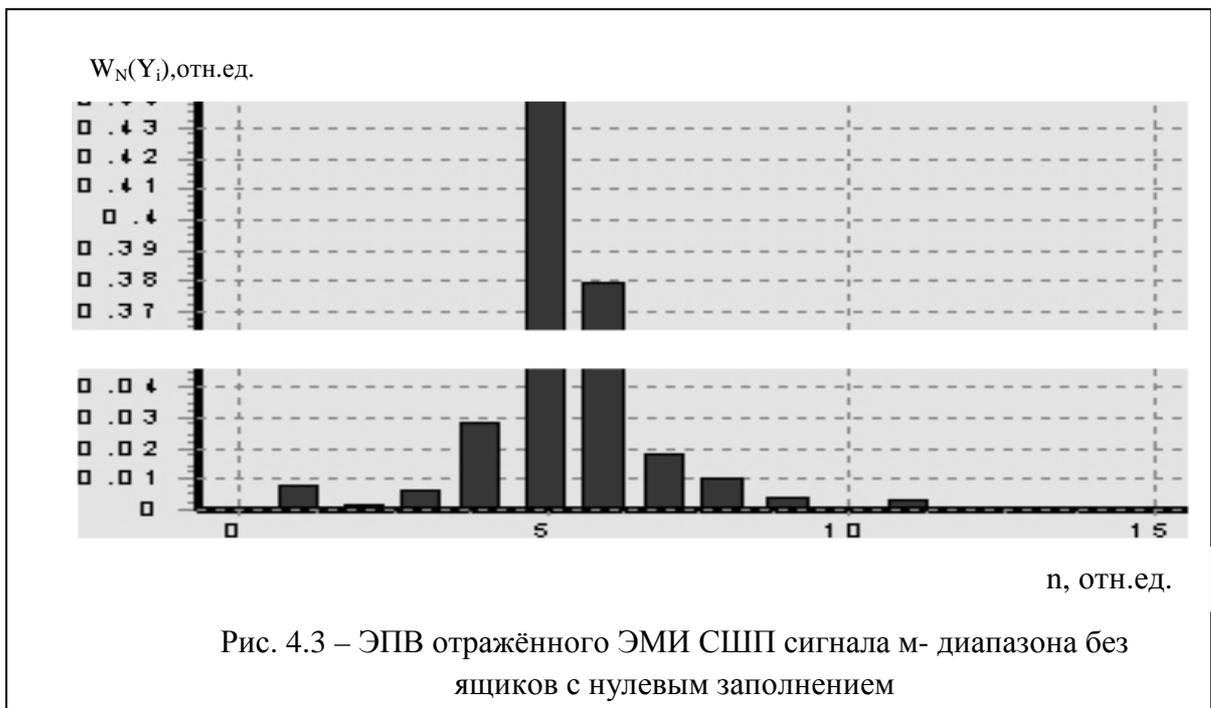
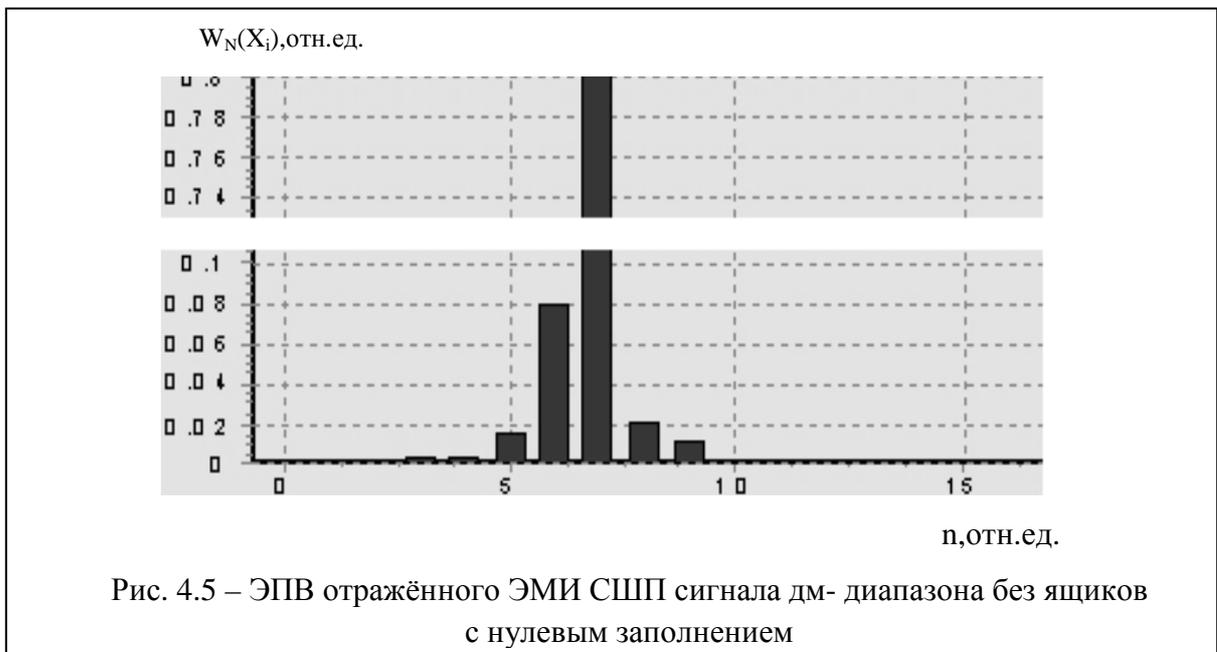
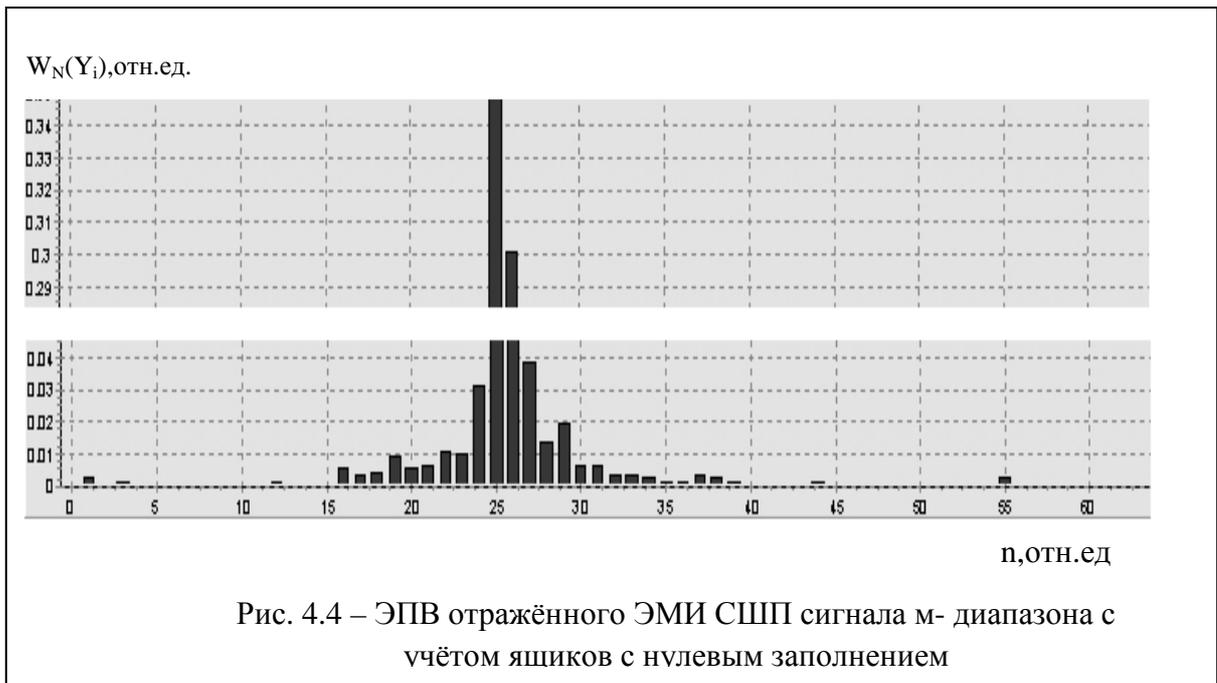
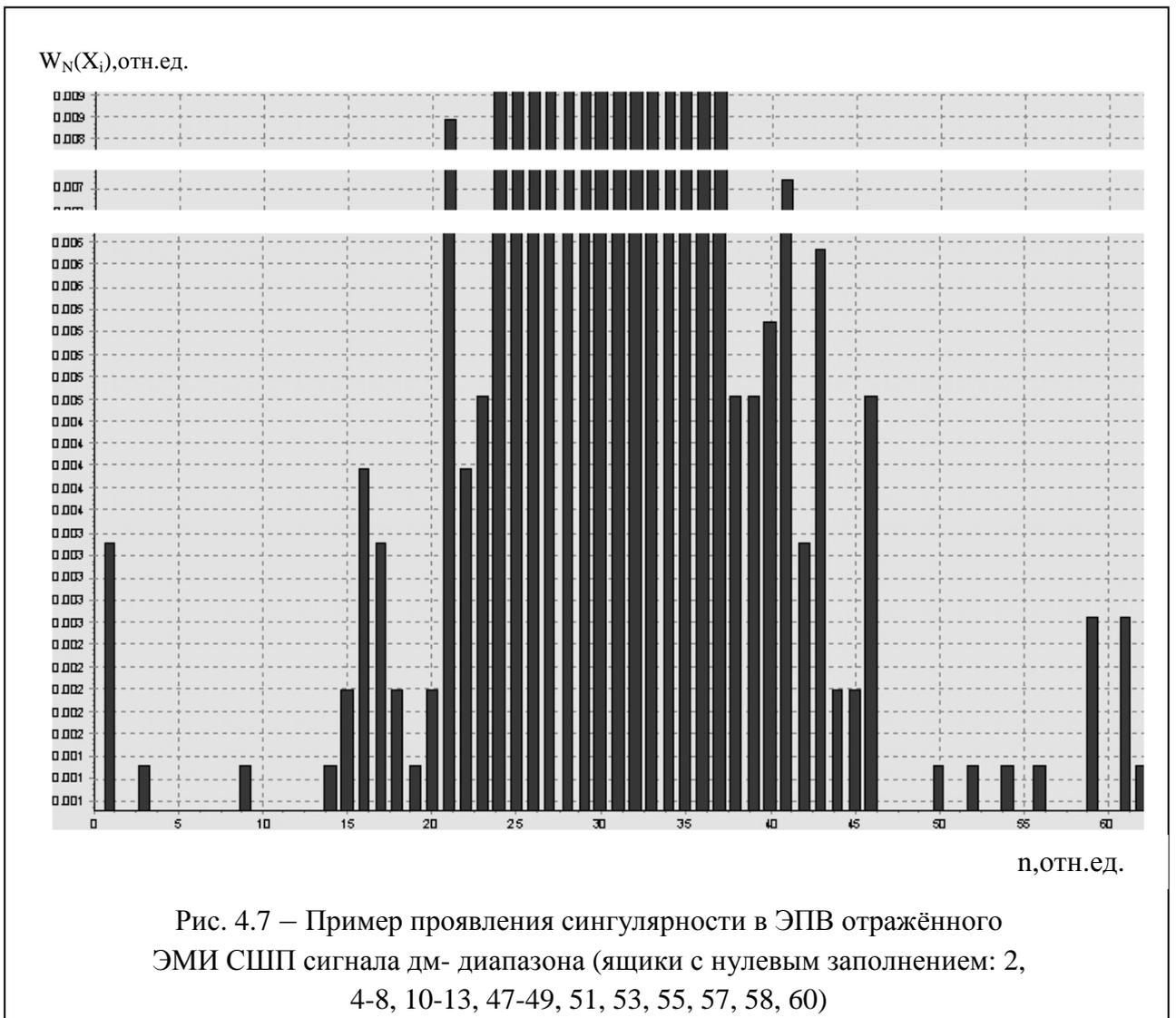
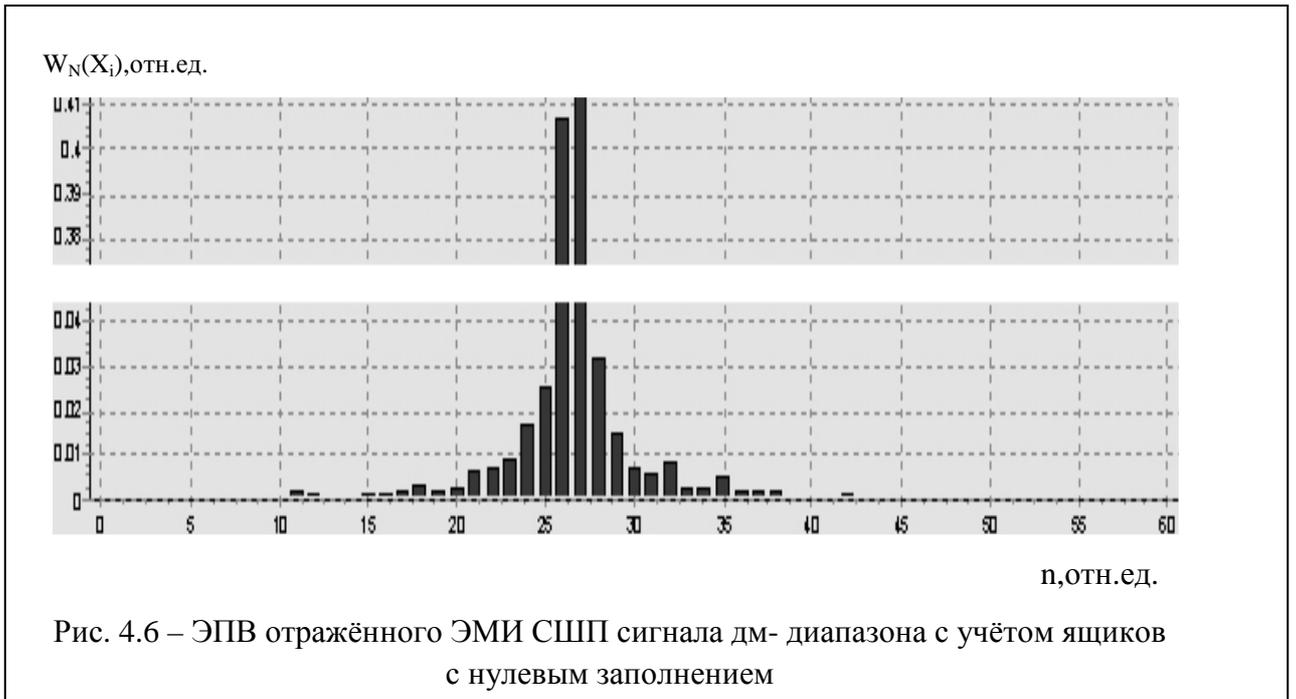


Рис. 4.3 – ЭПВ отражённого ЭМИ СШП сигнала м-диапазона без ящиков с нулевым заполнением





Приведенная на рис. 4.8 (в плане - рис. 4.8а) 3D ЭПВ двух независимых процессов  $X, Y$  имеет явно выраженные особенности разложения по ящикам: максимум ЭПВ по  $X$  существует в пределах  $n_x \in \{32, 36\}$  ящиков, по  $Y$  - в пределах  $n_y \in \{25, 28\}$  ящиков.

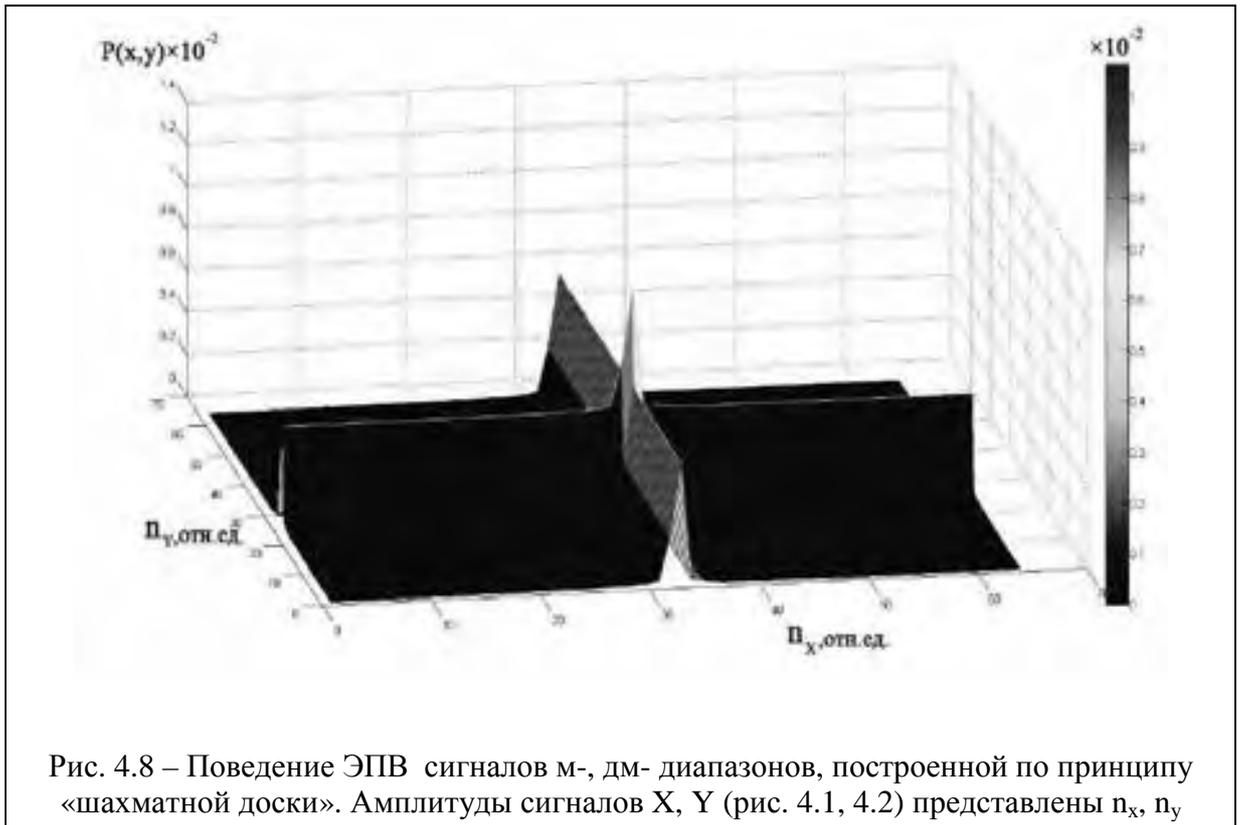
Очевидно, что при варьировании величинами  $\Delta X, \Delta Y$  двумерная ЭПВ  $P_{ij}(X_i, Y_j)$  из (4.9) становится сильным игроком рядом с игроками  $\frac{\partial H(x)}{\partial N}$  и  $\frac{\partial H(y)}{\partial N}$ , участвующими в поиске  $\max$  (4.12) между  $\max H(X, X)$  и соответствующим ему значением  $N_{1x}$  и  $\max H(Y, Y)$  с  $N_{1y}$ . Ситуация с третьим игроком аналогична для второй и третьей вариационных задач.

Величина  $P_{ij}(X_i, Y_j)$  более известна как производная Радона – Никодима (рис. 4.8а) меры  $n_x$  по мере  $n_y$ .

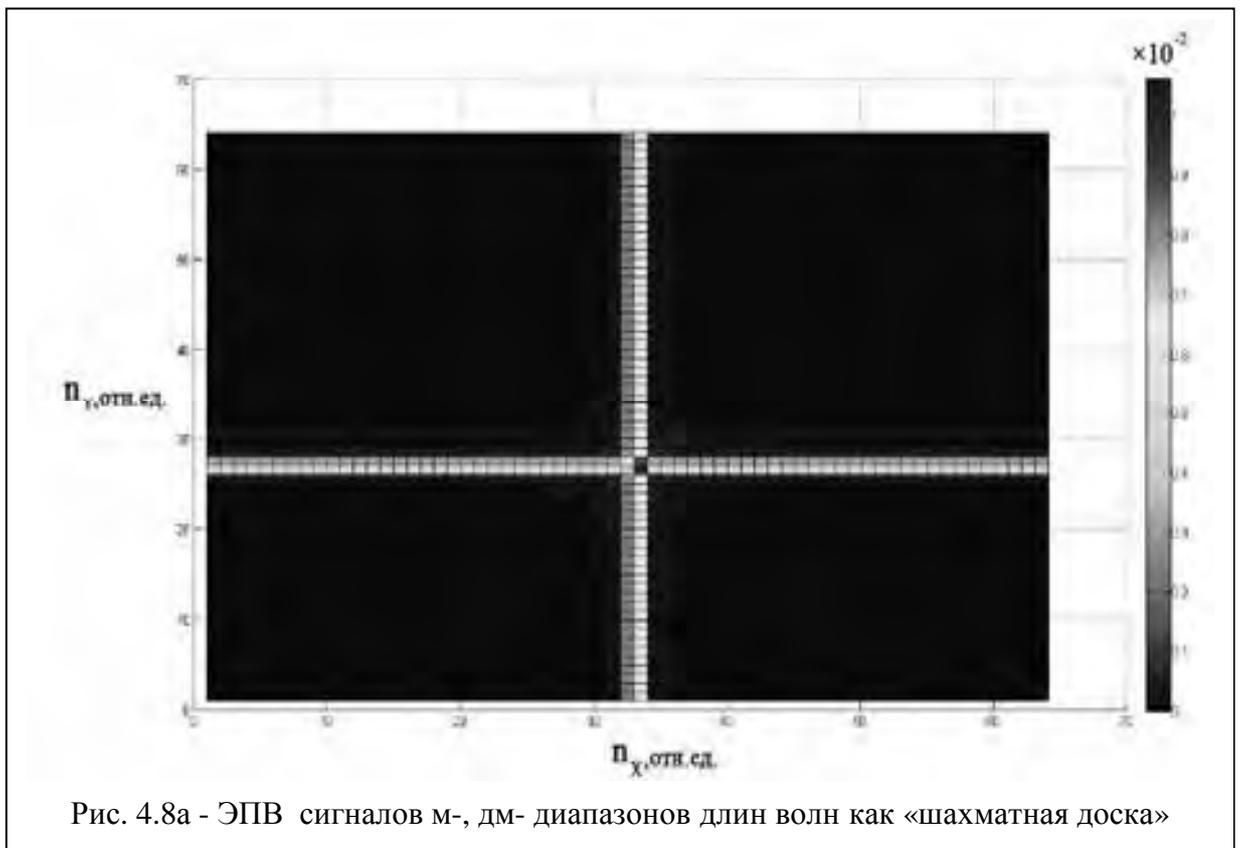
Поведение трёх составляющих энтропии двух процессов (4.9) как функций от объёма выборки  $N$  показано на рис. 4.9.

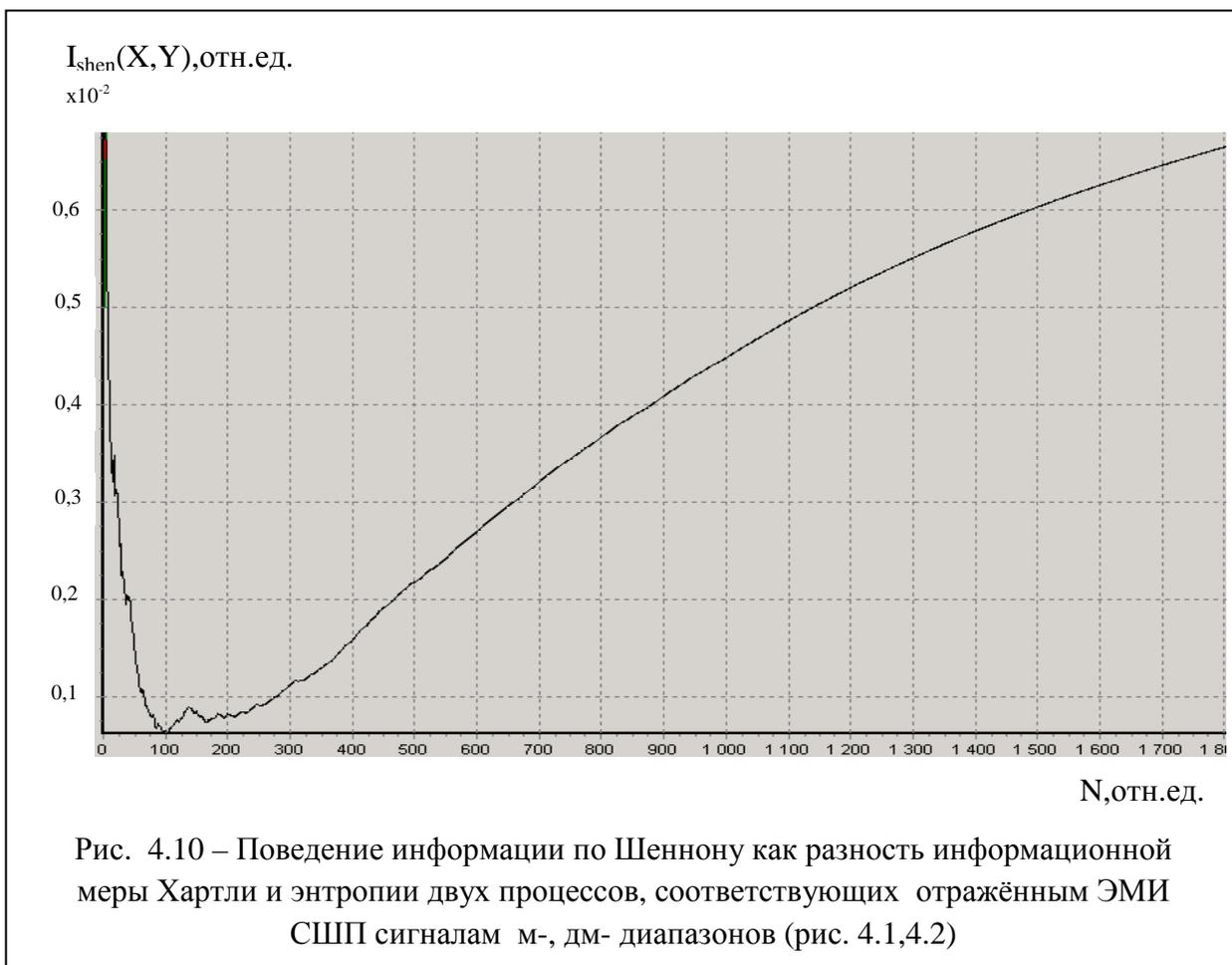
Зависимость величины информации по Шеннону от объёма выборки  $N$  как разности информационной меры Хартли и энтропии двух процессов, или ИМК при равномерном  $p(Y, \theta)$ , показана на рис. 4.10. Данный график соответствует отражённым ЭМИ СШП сигналам м-, дм- диапазонов длин волн, приведенным на рис. 4.1, 4.2.

На рис. 4.11 показано поведение кривизны информации по Шеннону для этих же сигналов.



На рис. 4.8а представлена ЭПВ сигналов м-, дм- диапазонов.







#### 4.5 Алгоритмы обработки данных ЭМИ СШП зондирования

Схема алгоритмов обработки данных ЭМИ СШП зондирования представлена на рис. 4.12. Общая идея алгоритма обработки состоит в предположении «эллиптичности»<sup>18</sup> уравнений связи оценок в модельном распределении (идея заимствована у Г. Крамера, который ввёл понятие «эллипс рассеяния» в [468]). Если описывать эмпирическое распределение данных ЭМИ СШП зондирования семейством вероятностных плотностей Релея-Райса, то  $\theta$ - оценка моды основной волны,  $\sigma$  - оценка её затухания, а их связь выглядит как  $\frac{\theta^2}{a^2} + \frac{\sigma^2}{b^2} = 1$ ,  $a, b$  – полуоси эллипса рассеяния.

Примеры исходных сигналов представлены на рис. 4.1, 4.2. Для входных сигналов, представленных на рис. 4.12 как  $x(t)$  и  $y(t)$ , в каждый момент времени  $t$  ( $0 < t < t_N$ ,  $N$  – объём записанного сигнала) по критериям, в качестве которых выступают решения [280, 421, 422, 433] трёх вариационных задач, определяются три пары объемов выборки  $\{N_{1x}(t), N_{1y}(t)\}$ ,  $\{N_{2x}(t), N_{2y}(t)\}$ ,  $\{N_{3x}(t), N_{3y}(t)\}$ .

<sup>18</sup> Такой подход позволяет спускаться к идеальным (в рамках ИМК) оценкам  $\theta, \sigma$  по спирали, а не в плоскости  $\theta, \sigma$ , варьируя по  $\theta$  при  $\sigma = \text{Const}$  и наоборот.

Следующий этап – определение текущих объёмов трёх объединенных выборок:  $N_{1x,y}(t), N_{2x,y}(t), N_{3x,y}(t)$ . Графики оценок объёмов объединенных выборок  $N_{1x,y}(t), N_{2x,y}(t), N_{3x,y}(t)$  приведены на рис. 4.12.

Для каждой из объёмов выборок  $N_{1x,y}(t), N_{2x,y}(t), N_{3x,y}(t)$  в каждой из трёх вариационных задач определяется число ящиков - количество интервалов группирования экспериментальных данных  $\{n_{1x}(t), n_{2x}(t), n_{3x}(t)\}$  как для  $x(t)$ , так и для  $y(t)$  -  $\{n_{1y}(t), n_{2y}(t), n_{3y}(t)\}$ . В случае несовпадения числа ящиков для  $x(t)$  с числом ящиков для  $y(t)$  производится переукладка данных из меньшего числа ящиков в большее, например  $n_{1x}(t) \rightarrow n_{1y}(t)$ , если  $n_{1x}(t) < n_{1y}(t)$ .

Для каждого из этих эмпирических распределений, например для  $y(t)$ ,  $w_{N_{1x,y}}\{Y(i_1)\}$ ,  $i_1 = \overline{(1, n_{1y})}$ ;  $w_{N_{2x,y}}\{Y(i_2)\}$ ,  $i_2 = \overline{(1, n_{2y})}$ ;  $w_{N_{3x,y}}\{Y(i_3)\}$ ,  $i_3 = \overline{(1, n_{3y})}$  из семейства вероятностных плотностей Релея - Райса

$$p(Y_i, \theta) = \frac{Y_i}{2\sigma_y^2} \cdot \exp\left\{-\frac{Y_i^2 + \theta^2}{2\sigma_y^2}\right\} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma_y^2}\right) \quad (4.18)$$

выбирается та, которая с помощью параметров  $\theta_y, \sigma_y$  минимизирует ИМК (4.10)<sup>19</sup>.

Доказательство «эллиптичности» связи оценок  $\theta_y, \sigma_y$  выглядит следующим образом. Вариация от  $p(Y_i, \theta)$ :

$$\begin{aligned} \Delta p(Y_i, \theta) &= \frac{\partial p}{\partial Y} \cdot \Delta Y + \frac{\partial p}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta + \frac{\partial p}{\partial \sigma} \cdot \Delta \sigma, \\ \frac{\partial p(Y_i, \theta)}{\partial \sigma} &= \frac{Y_i}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{Y_i^2 + \theta^2}{2 \cdot \sigma^2}\right\} \cdot \left[ \frac{Y_i^2 + \theta^2 - 2 \cdot \sigma^2}{\sigma^3} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \frac{2 \cdot Y_i \cdot \theta}{\sigma^3} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) \right] \\ \frac{\partial p(Y_i, \theta)}{\partial \theta} &= \frac{Y_i}{\sigma^2} \cdot \exp\left\{-\frac{Y_i^2 + \theta^2}{2 \cdot \sigma^2}\right\} \cdot \left[ \frac{Y_i}{\sigma^2} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \frac{\theta}{\sigma^2} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) \right] \\ \frac{\partial p(Y_i, \theta)}{\partial \sigma} &= \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} = \frac{\frac{Y_i^2 + \theta^2 - 2 \cdot \sigma^2}{\sigma} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \frac{2 \cdot Y_i \cdot \theta}{\sigma} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right)}{Y_i \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \theta \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right)}. \end{aligned}$$

<sup>19</sup> Также практикуется название меры Кульбака – Лейблера – негэнтропия (отрицательная энтропия) распределения  $w_N(\bar{y})$  относительно модельного  $p(\bar{y}; \theta)$ , предложенное Хиротому Акаике в 1971 г. как информационный критерий «An Information Criterion», сейчас известен как «Akaike Information Criterion».

Приведя последнее выражение к эллиптическому уравнению, получим

$$\frac{\theta \cdot \partial \theta}{\sigma \cdot \partial \sigma} = \frac{\frac{Y_i^2 + \theta^2 - 2 \cdot \sigma^2}{\sigma^2} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \frac{2 \cdot Y_i \cdot \theta}{\sigma^2} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right)}{\frac{Y_i}{\theta} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right)} = -\frac{a_i^2}{b_i^2}. \quad (4.19)$$

Здесь слева – уравнение эллипса в частных производных, справа  $a_i, b_i$  – размеры полуосей эллипса рассеяния [468]<sup>20</sup>:

$$a_i^2 = \frac{2 \cdot Y_i \cdot \theta}{\sigma^2} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - \frac{Y_i^2 + \theta^2 - 2 \cdot \sigma^2}{\sigma^2} \cdot I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right), \quad (4.20)$$

$$b_i^2 = \frac{Y_i}{\theta} \cdot I_1\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right) - I_0\left(\frac{Y_i \cdot \theta}{\sigma^2}\right). \quad (4.21)$$

Зависимости вида (4.20, 4.21) определяют порядок последовательного приближения к оценкам первого и второго моментов распределения Релея - Райса. Решением первой вариационной задачи (блок ВЗ-1 на рис. 4.12) являются оценки первого и второго моментов  $\theta_{1y}, \sigma_{1y}$  и их вес (достоверность), определяемый мерой Кульбака как  $\{1 - I_{N_{1x,y}}(\hat{n}_{1y})\}$ ; решением второй вариационной задачи (блок ВЗ-2 на рис. 4.14) являются оценки  $\theta_{2y}, \sigma_{2y}$  и их вес –  $\{1 - I_{N_{2x,y}}(\hat{n}_{2y})\}$ ; решением третьей вариационной задачи (блок ВЗ-3 на рис. 4.12) являются оценки  $\theta_{3y}, \sigma_{3y}$  и их вес –  $\{1 - I_{N_{3x,y}}(\hat{n}_{3y})\}$ . Параметры  $\theta_y(t), \sigma_y(t)$  определяются как скользящие во времени взвешенные оценки трех вариационных задач (блок «Взвешивание оценок» на рис. 4.12)

$$\begin{aligned} \theta_y(t) = & \sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} \cdot (1 - I_{N_{ix,y}}(\hat{n}_{iy})) \cdot \theta_{iy} + \\ & + \frac{1}{3} \cdot I_{N_{1x,y}}(\hat{n}_{1y}) \cdot [(1 - I_{N_{2x,y}}(\hat{n}_{2y})) \cdot \theta_{2y} + (1 - I_{N_{3x,y}}(\hat{n}_{3y})) \cdot \theta_{3y}] / 2 + \\ & + \frac{1}{3} \cdot I_{N_{2x,y}}(\hat{n}_{2y}) \cdot [(1 - I_{N_{1x,y}}(\hat{n}_{1y})) \cdot \theta_{1y} + (1 - I_{N_{3x,y}}(\hat{n}_{3y})) \cdot \theta_{3y}] / 2 + \\ & + \frac{1}{3} \cdot I_{N_{3x,y}}(\hat{n}_{3y}) \cdot [(1 - I_{N_{1x,y}}(\hat{n}_{1y})) \cdot \theta_{1y} + (1 - I_{N_{2x,y}}(\hat{n}_{2y})) \cdot \theta_{2y}] / 2. \end{aligned} \quad (4.22)$$

<sup>20</sup> Здесь и выше  $I_0(\dots), I_1(\dots)$  – модифицированные функции Бесселя мнимого аргумента [469]:

$$I_0(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^0 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2k}}{k! \Gamma(0+k+1)}, \quad I_1(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^1 \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{2k}}{k! \Gamma(0+k+1)}, \quad \Gamma(\dots) \quad - \quad \text{гамма-функция}$$

(определена выше);  $\hat{n}_{iy}$  – оценка количества ящиков в  $i$ -ой вариационной задаче.

$$\begin{aligned}
\sigma_y(t) = & \sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} \cdot (1 - I_{Nix,y}(\hat{n}_{iy})) \cdot \sigma_{iy} + \\
& + \frac{1}{3} \cdot I_{N1x,y}(\hat{n}_{1y}) \cdot \left[ (1 - I_{N2x,y}(\hat{n}_{2y})) \cdot \sigma_{2y} + (1 - I_{N3x,y}(\hat{n}_{3y})) \cdot \sigma_{3y} \right] / 2 + \\
& + \frac{1}{3} \cdot I_{N2x,y}(\hat{n}_{2y}) \cdot \left[ (1 - I_{N1x,y}(\hat{n}_{1y})) \cdot \sigma_{1y} + (1 - I_{N3x,y}(\hat{n}_{3y})) \cdot \sigma_{3y} \right] / 2 + \\
& + \frac{1}{3} \cdot I_{N3x,y}(\hat{n}_{3y}) \cdot \left[ (1 - I_{N1x,y}(\hat{n}_{1y})) \cdot \sigma_{1y} + (1 - I_{N2x,y}(\hat{n}_{2y})) \cdot \sigma_{2y} \right] / 2.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Точность вычисления пары  $\theta_y(t), \sigma_y(t)$  определяется углом (рис. 4.13) между нормалью к плоскости, образованной тремя парами оценок  $\theta_{iy}(t), \sigma_{iy}(t)$  с учётом их веса, и ортом ИМК:  $\lim \angle \varphi\{\bar{n}, \text{ort}(I_N(n))\} = 0$ . При недостижении требований по точности цикл по вычислению  $\theta_y(t), \sigma_y(t)$  повторяется, но с входными данными из (4.22) и (4.23).

Для проверки статистической устойчивости оценок, полученных по критерию  $\min$  ИМК для трёх вариационных задач, использован критерий Колмогорова - Смирнова. Сравнивались различные методы формирования оценок по ЭМИ СШП измерениям, а характеристикой сравнения выбрана вероятность

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P(D_N \sqrt{N} > \lambda) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 \lambda^2},$$

где  $D_N = \sup_y |\bar{F}_N(\bar{y}) - F(\bar{y}, \theta)|$ ,  $\bar{F}_N(\bar{y})$  – эмпирическая функция распределения результатов ЭМИ СШП измерений;  $F(\bar{y}, \theta)$  – гипотетическая функция распределения Релея - Райса с оценкой  $\theta$ , сформированной по имеющейся выборке объёмом  $N$  различными методами при трёх  $\varepsilon$  - загрязняющего распределения и без него;  $D_N$  – статистика Колмогорова-Смирнова.

При определении устойчивости данного алгоритма рассмотрены частные случаи  $\varepsilon$ -загрязняющих ЭПВ в соответствии с моделью Тьюки [428]. Положим, что величина  $[1 - I_N(\hat{n})]$  является мерой подобия гипотетического распределения  $p(Y_i, \theta)$  и апостериорного распределения  $w_N(Y_i)$ , тогда вместо  $p(Y_i, \theta)$  можно использовать выражение

$$\hat{f}(Y_i) = [1 - I_N(\hat{n})] \cdot p(Y_i, \theta) + I_N(\hat{n}) \cdot R(a, b, z), \tag{4.24}$$

где  $[1 - I_N(\hat{n})]$  - величина ИМК, характеризующая выбранный метод статистического оценивания;  $R(a, b, z)$  - загрязняющее распределение;  $a, b$  - его параметры;  $z(t) = |y(t) - \theta(t)|$  - переменная распределения  $R(a, b, z)$ .

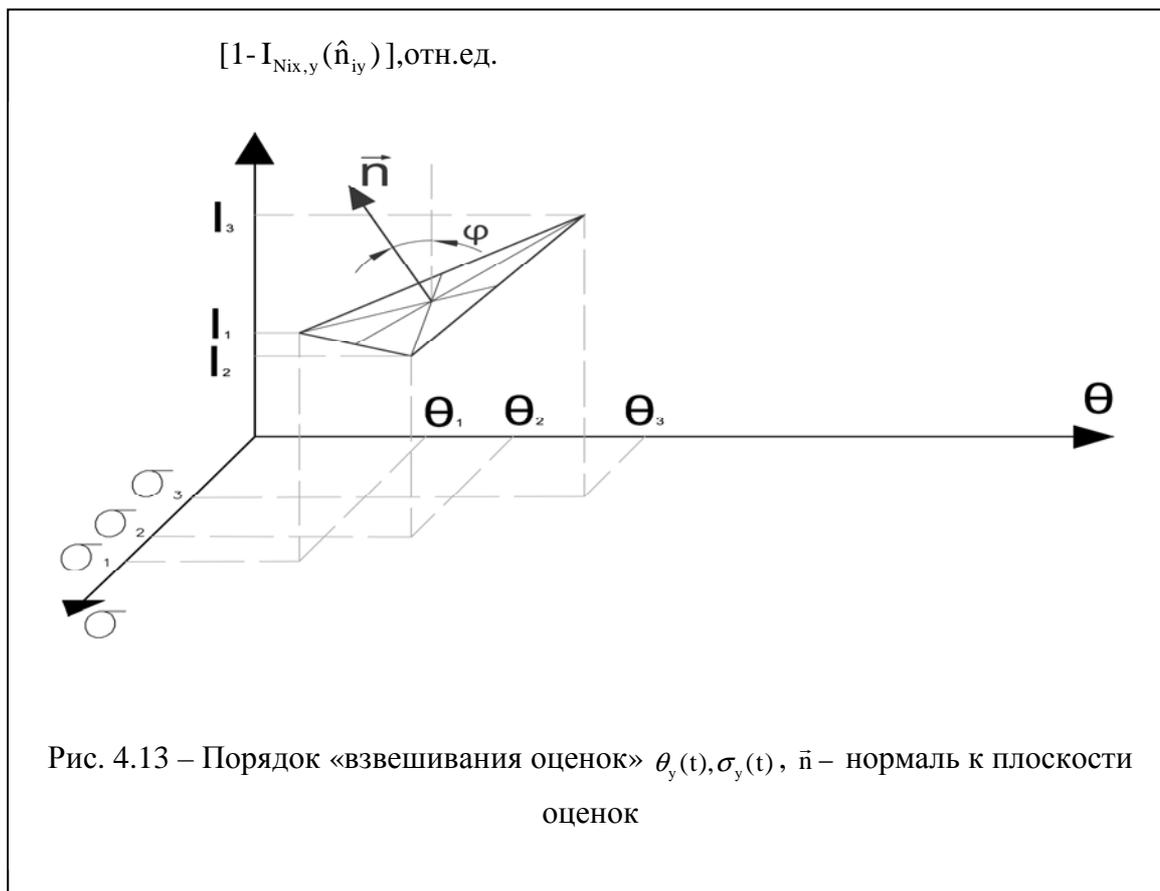
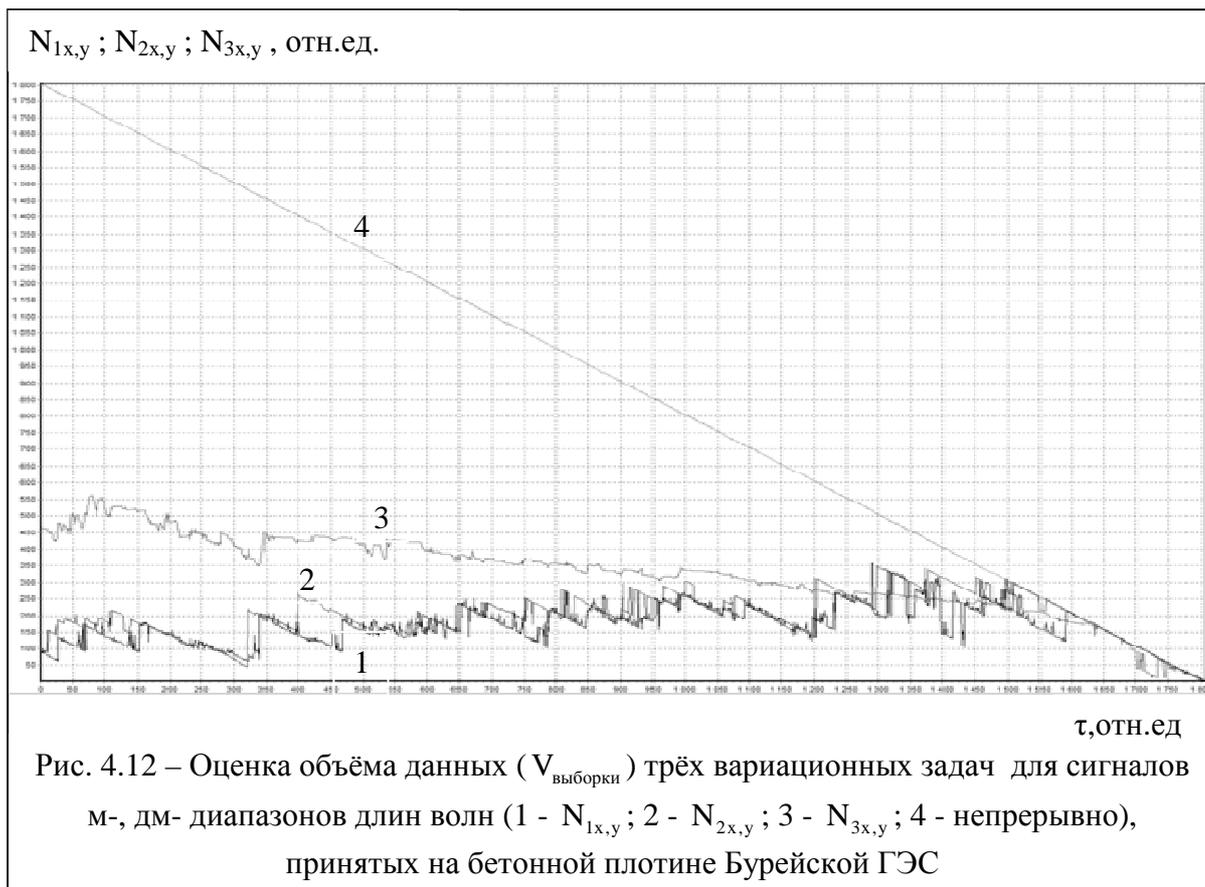
Результаты сравнения гипотез приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Метод формирования оценки	Вероятность гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова			
	Гипотеза $H_0$ : $R(a, b, z)$ – отсутствует	Гипотеза $H_1$ : $R(a, b, z)$ – гауссовское	Гипотеза $H_2$ : $R(a, b, z)$ – лапласовское	Гипотеза $H_3$ : $R(a, b, z)$ – релеевское
МНК	0.79348	0.48273	0.48334	0.20360
МНМ	0.79373	0.85074	0.88574	0.90723
Метод с $\min$ ИМК	0.79365	0.85448	0.88453	0.91106
Метод $\max$ правдоподобия	0.79371	0.85421	0.88591	0.90981

МНК - метод наименьших квадратов; МНМ - метод наименьших модулей.

Очевидно (табл. 4.1), что по критерию Колмогорова - Смирнова метод с  $\min$  ИМК сопоставим с методом  $\max$  правдоподобия, а в ряде случаев превосходит его. Следует обратить внимание на эффективность применения МНМ при лапласовском загрязняющем распределении. Это ещё раз подтверждает тот факт, что лапласовское распределение стоит особняком [456].



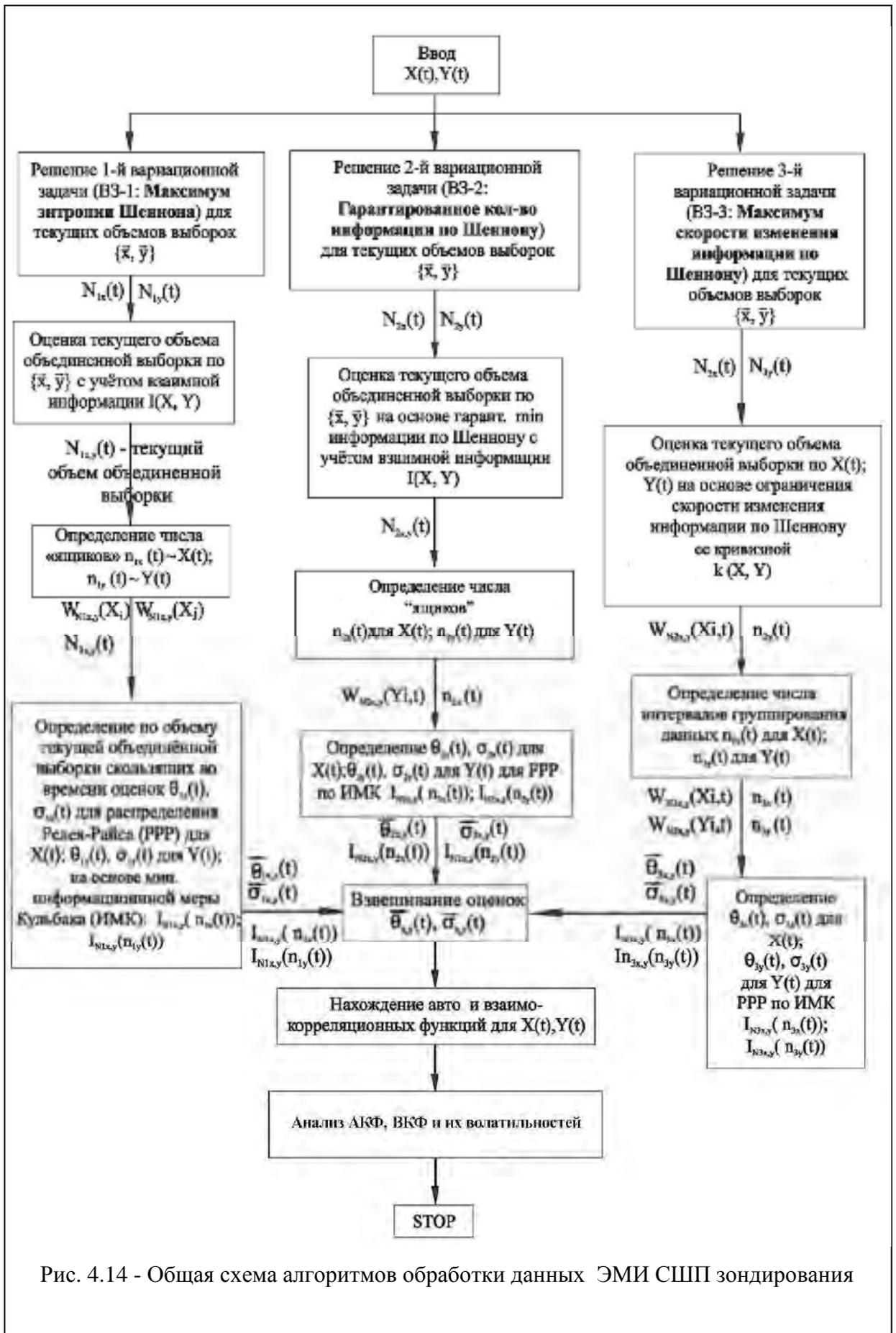


Рис. 4.14 - Общая схема алгоритмов обработки данных ЭМИ СШП зондирования

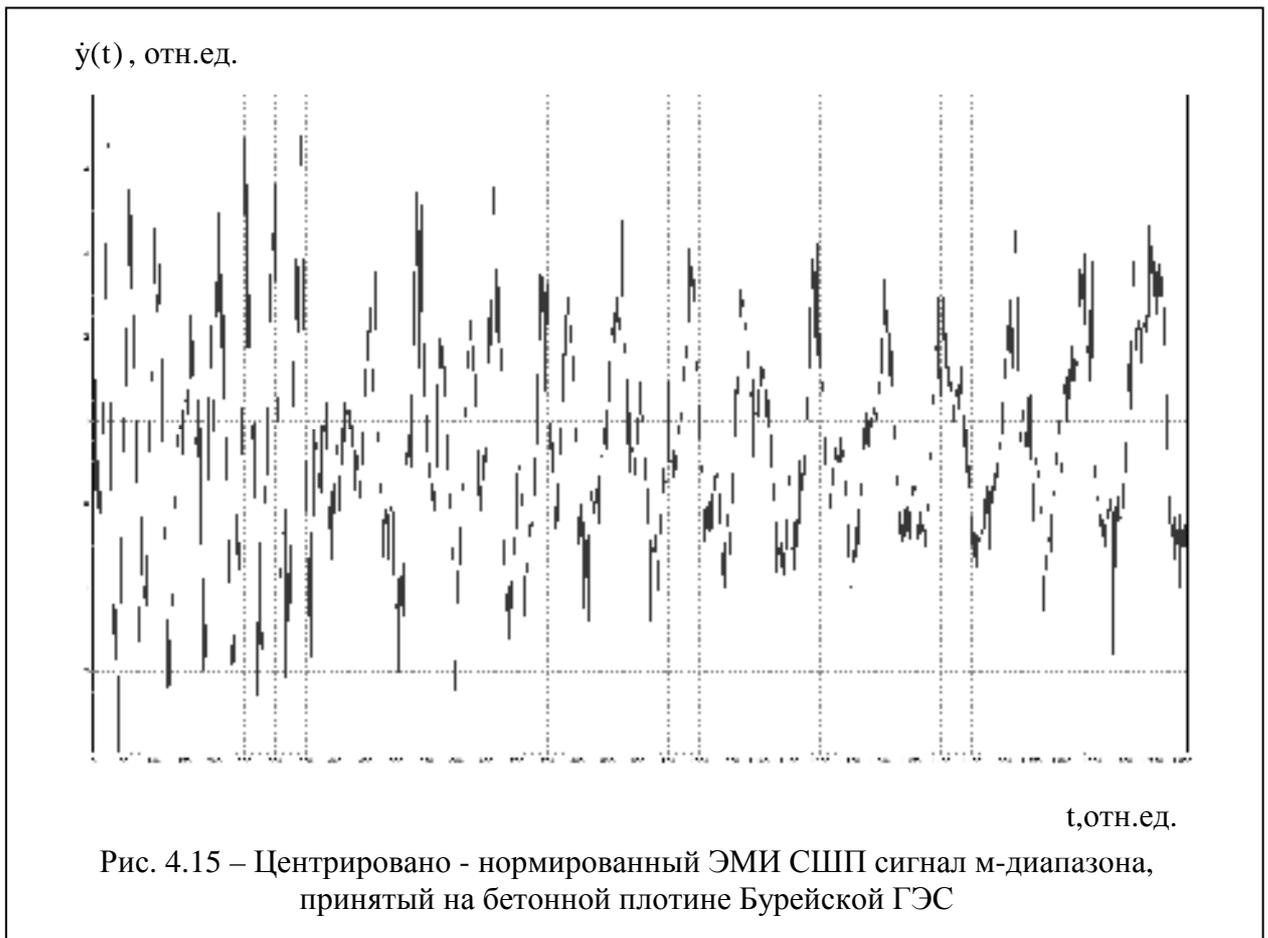
## 4.6 Применение корреляционно-дисперсионного анализа данных ЭМИ СШП зондирования для литологического разделения подстилающей среды

После получения взвешенных по (4.22÷4.23) оценок по формулам:

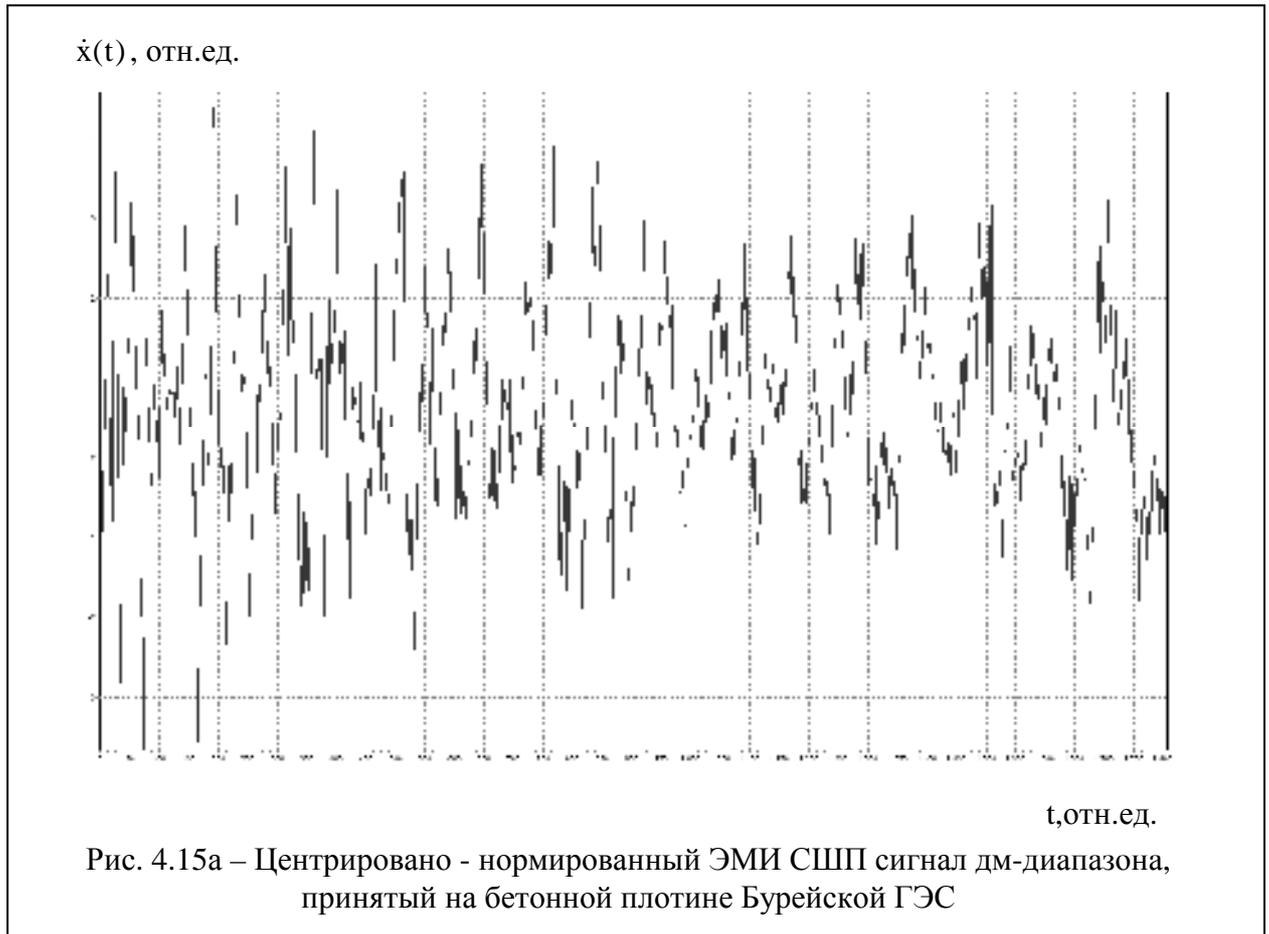
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (x(t) - \theta_x(t)) / \sigma_x(t) \\ \dot{y}(t) &= (y(t) - \theta_y(t)) / \sigma_y(t) \end{aligned} \quad (4.25)$$

производится центрирование относительно  $\theta(t)$  и нормирование относительно  $\sigma(t)$  сигналов, или сдвиг / масштабное преобразование сигнала [470].

На рис. 4.15 показан отражённый сигнал м – диапазона (рис. 4.1), центрированный по (4.22) относительно  $\theta_x(t)$  и нормированный по (4.23) относительно  $\sigma_x(t)$ , для семейства вероятностных плотностей Релея-Райса.



На рис. 4.15а показан сигнал дм – диапазона (рис. 4.2), центрировано-нормированный относительно оценок, полученных по (4.22÷4.23), того же семейства распределений.



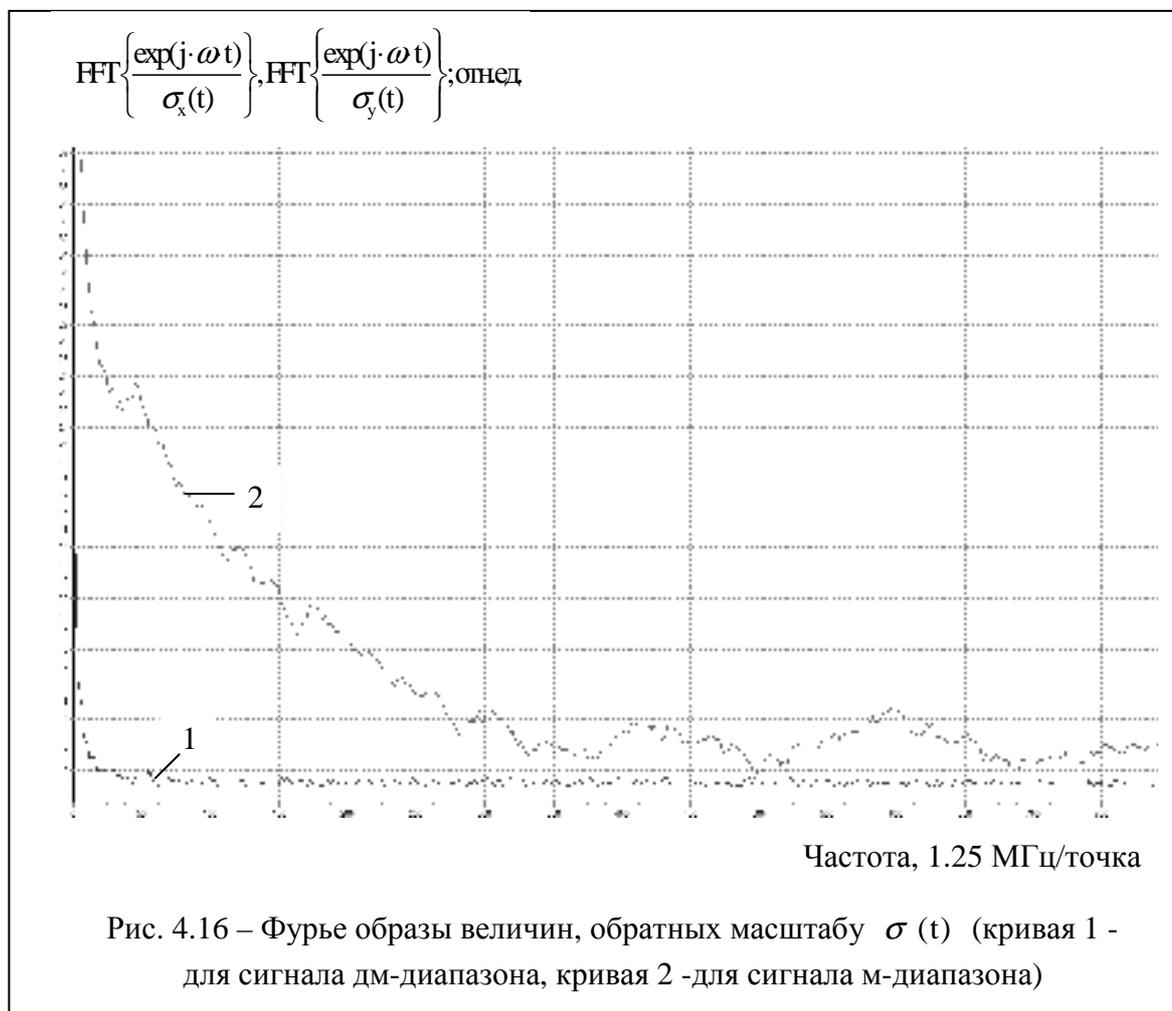
Литологическое разделение подстилающей среды по данным ЭМИ СШП зондирования предполагает идентифицируемость. Г. Тейчер (Teicher H., 1961)<sup>21</sup> получил следующие результаты: сдвиг / масштабные смеси функций распределений идентифицируемы, если

(i) для функции, обратной масштабу, существует Фурье преобразование, нигде не обращающееся в нуль;

(ii) характеристическая функция, соответствующая функции распределения сигнала, нигде не обращается в нуль.

<sup>21</sup> Понятие идентифицируемой смеси интенсивно используют в прикладных задачах, связанных с декомпозицией (разделением, разложением, расщеплением). Библиография [466, 471÷476].

Для (i) на рис. 4.16 показано Фурье преобразование ( $\text{FFT}\{\dots\}$ ) величины, обратной масштабу  $\sigma_x(t)$  для сигнала дм – диапазона - кривая 1; кривая 2 - для сигнала м – диапазона.



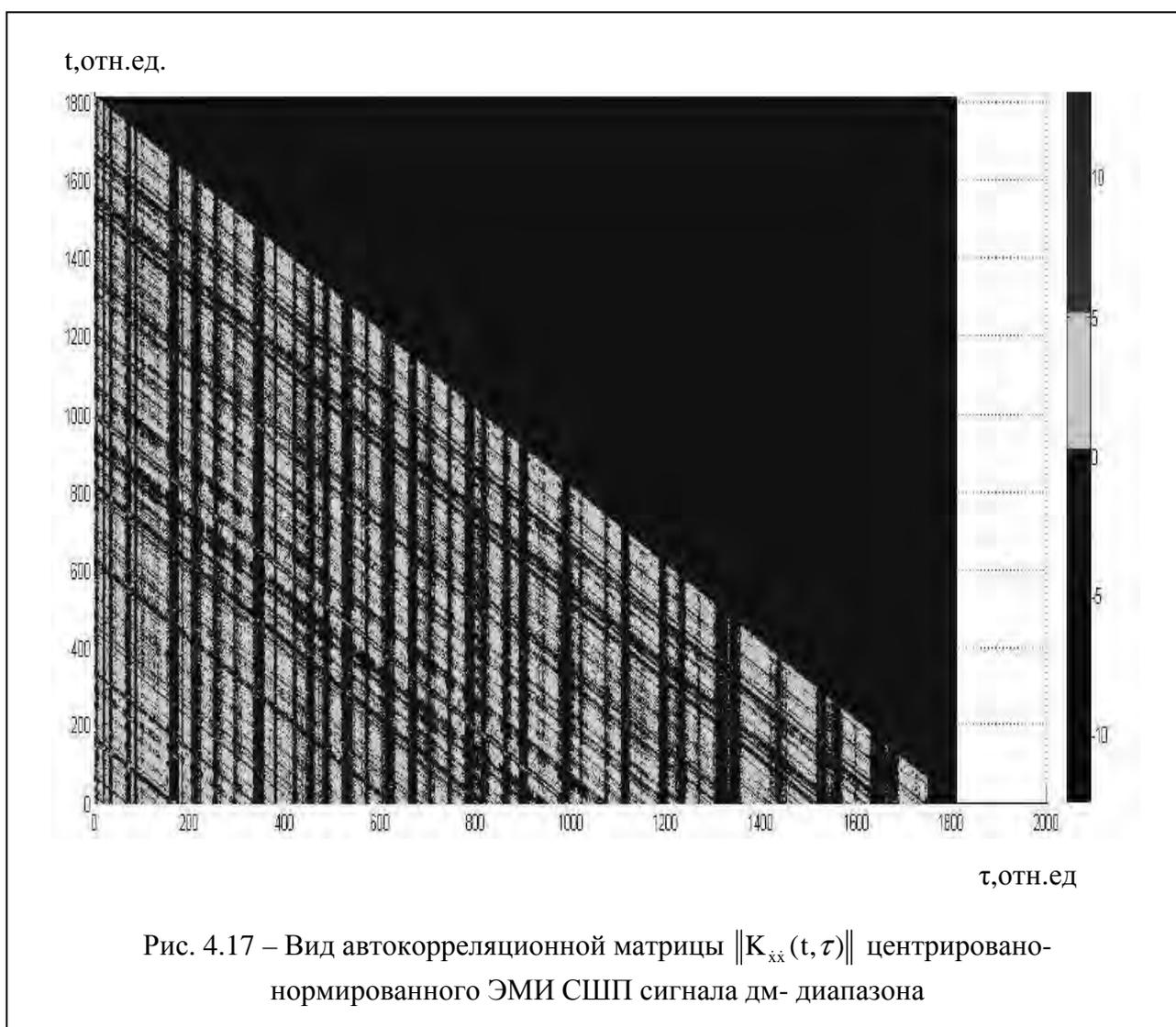
Для (ii) допуск на ящик с нулевым заполнением, заданный шахматной доской как способом построения двумерной ЭПВ, означает, что двумерная ЭПВ является не  $\delta$ -функцией (число ящиков всегда  $\geq 3$ ), что однозначно определяет существование преобразования Фурье от одномерных ЭПВ, а следовательно, существование ненулевых значений их характеристических функций [463]. Следует отметить, что теорема 4.3 в [492] соответствует сдвигу в (4.25) относительно первого момента распределения Релея – Райса, которое может быть

разложено на два распределения Лапласа, имеющие однозначные характеристические функции<sup>22</sup>.

Исследование корреляционных зависимостей центрировано - нормированных сигналов вида

$$\begin{aligned} K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau) &= M[\dot{x}(t) \cdot \dot{x}(t - \tau)] \\ K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau) &= M[\dot{x}(t) \cdot \dot{y}(t - \tau)] \end{aligned}, \quad M[\dots] - \text{знак мат. ожидания}; \quad (4.26)$$

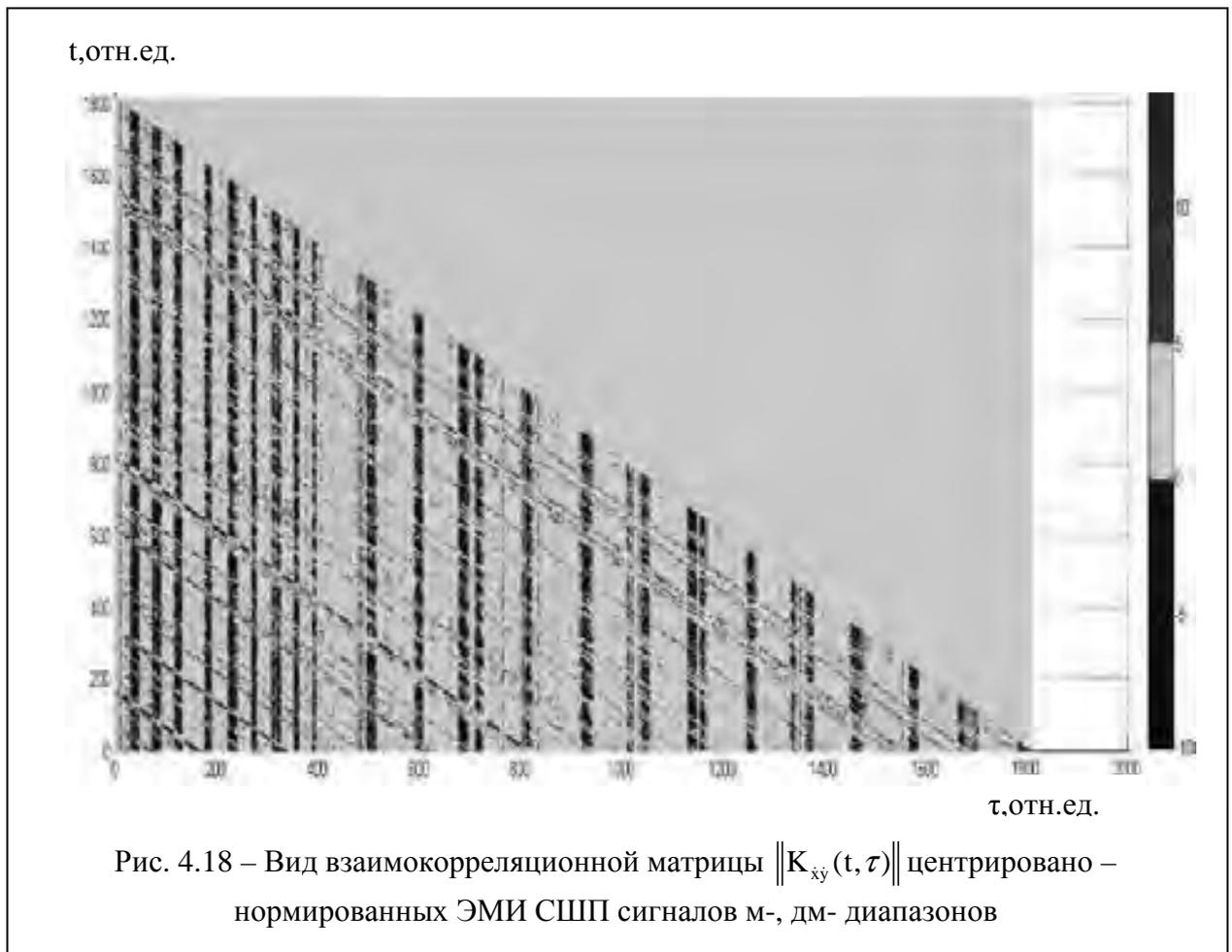
является одной из задач, тесно примыкающих к задачам оценивания корреляционных функций [478÷481], и называется задачей оценивания нормированной корреляционной функции [482,483].



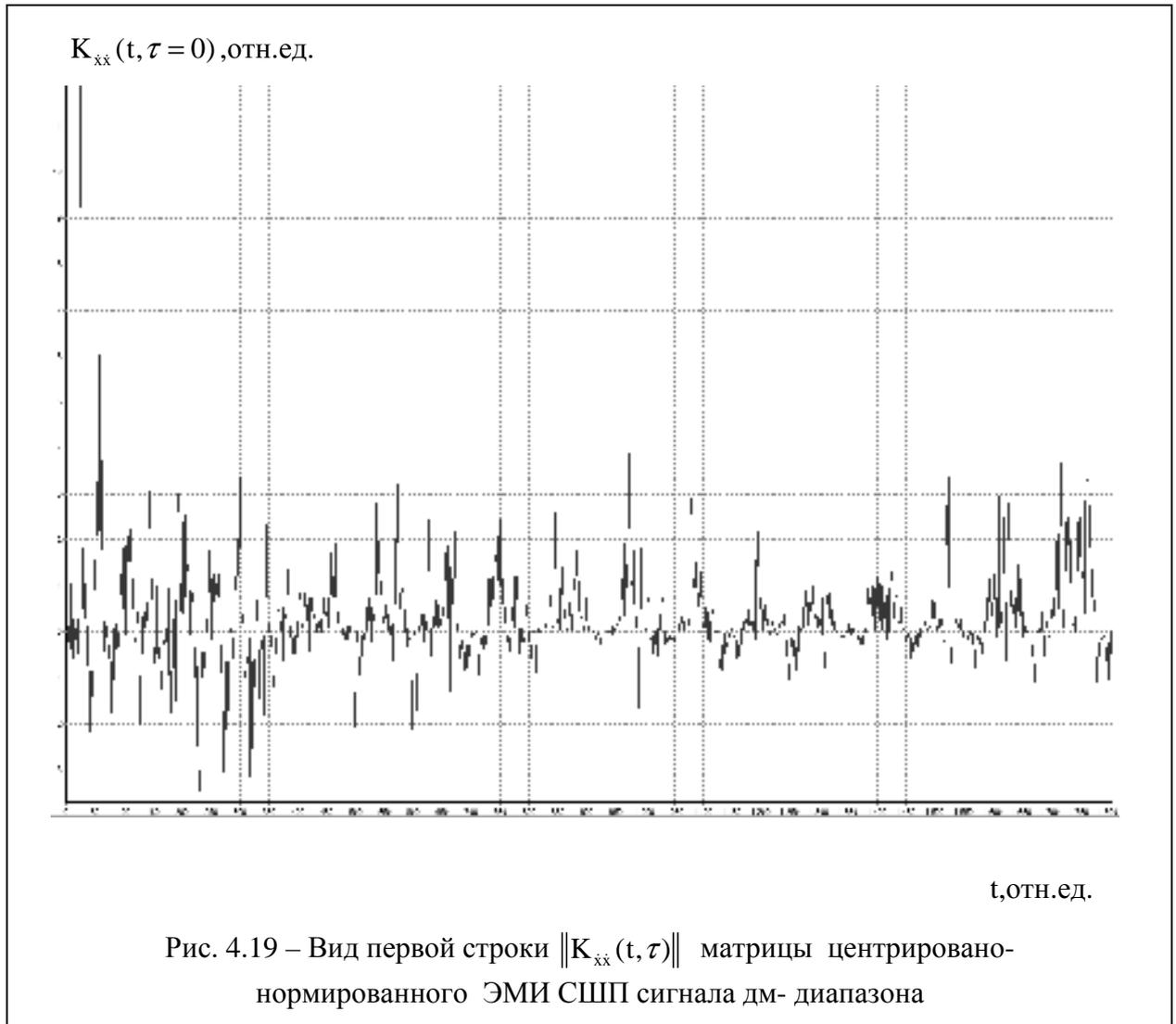
<sup>22</sup> В. Е. Бенинг, В. Ю. Королёв в [477] показывают, что распределение Лапласа является масштабной смесью симметризованного распределения Релея – Райса.

На рис. 4.17-4.18 представлен общий вид треугольных матриц  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  и  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  центрировано - нормированных сигналов (рис. 4.15а,б), принятых на бетонной плотине Бурейской ГЭС.

На рис. 4.19, 4.19а представлены первые строки треугольных матриц  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  и  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  ЭМИ СШП сигналов м-, дм- диапазонов. Для каждой строки из (4.26) строятся ЭПВ величин  $K_{xy}(t, \tau)$  и  $K_{xx}(t, \tau)$  (рис. 4.20, 4.21).



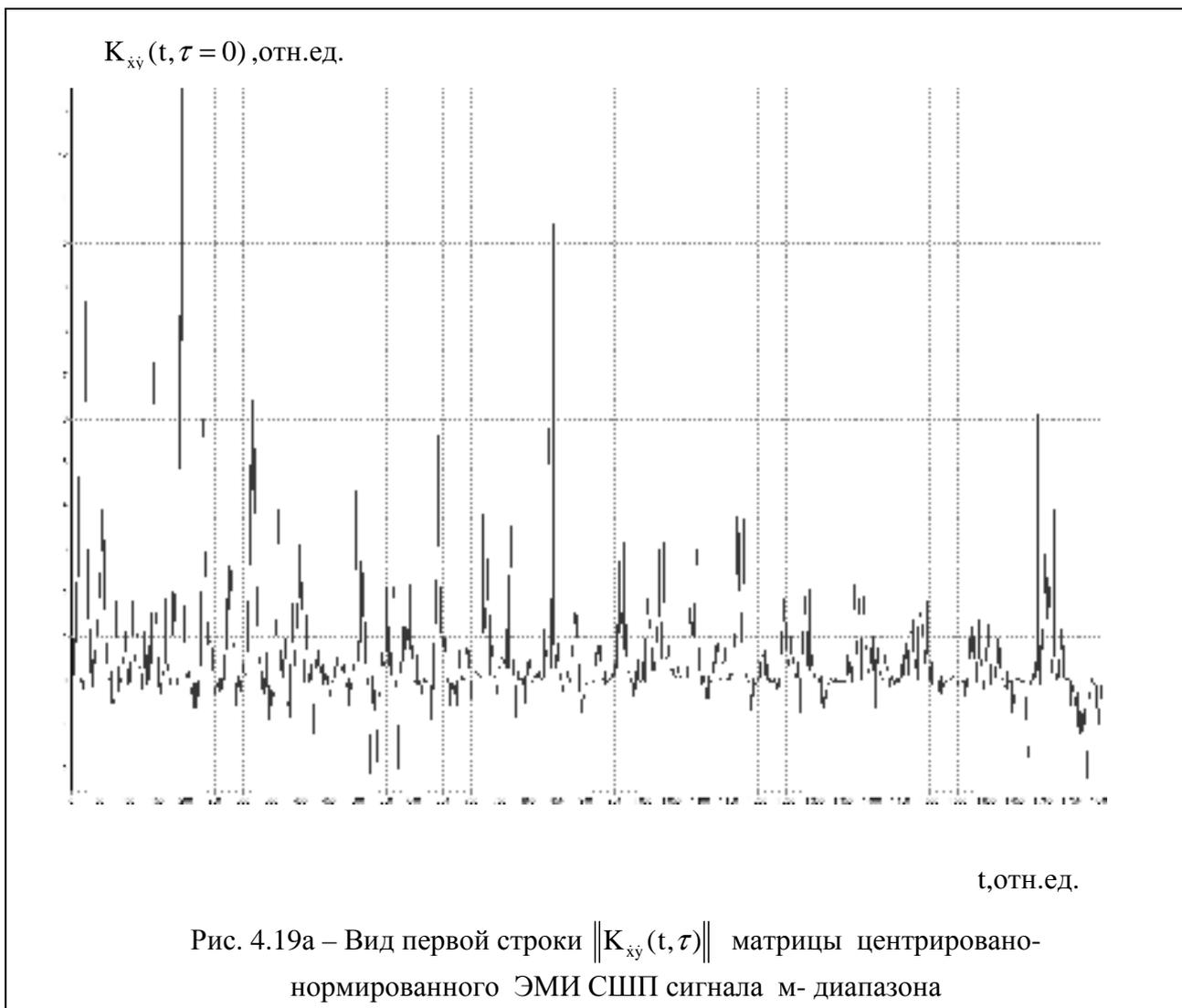
ЭПВ самих центрировано – нормированных величин, стоящих под знаком мат. ожидания в (4.26), имеют ярко выраженные особенности: для строки взаимокорреляционной матрицы  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  она более «размазана» (рис. 4.20), чем для автокорреляционной  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  (рис. 4.21).



Порядок работы со значениями матриц  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  и  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  следующий:  $\tau$  – номер строки, задающей значения строк матриц (рис. 4.19, 4.19а); для каждой из строк строятся ЭПВ (рис. 4.20, 4.21); и по ним находится мат. ожидания (4.26) как значение для строки с номером  $\tau$ ; последовательность этих значений образуют авто- и взаимнокорреляционную функции от  $\tau$ .

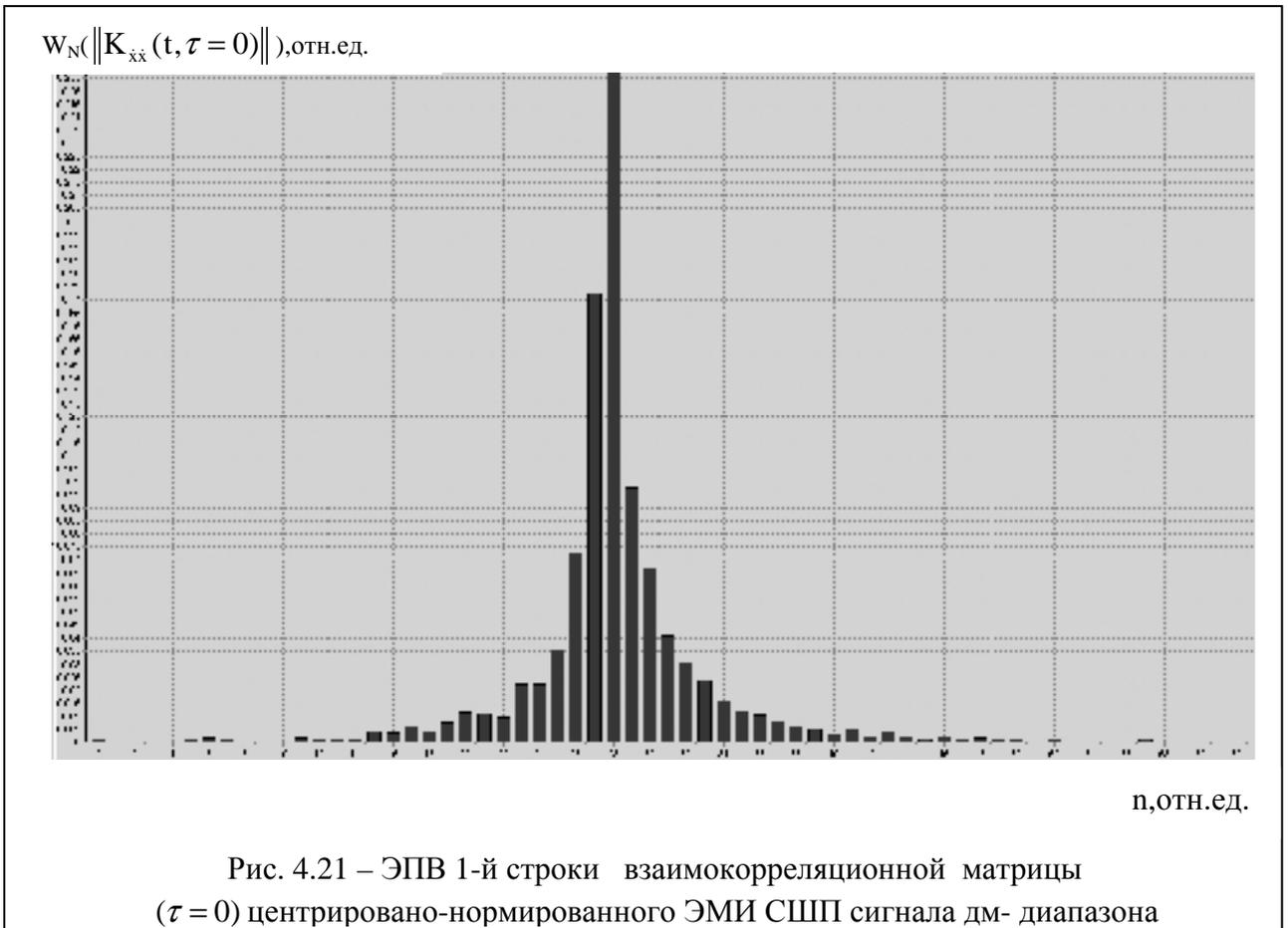
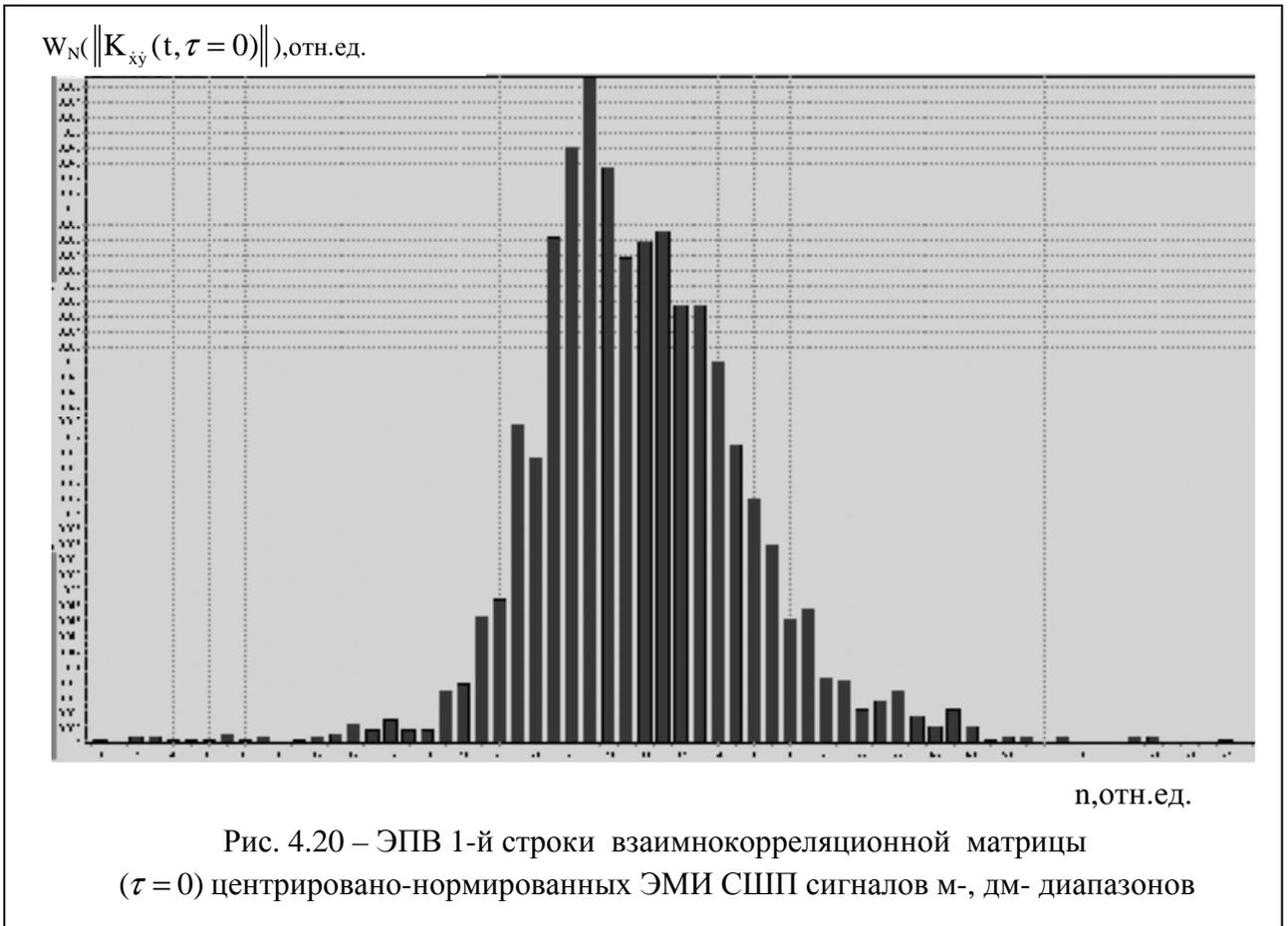
Вид АКФ и ВКФ центрировано-нормированных ЭМИ СШП сигналов м-, дм-диапазонов показан на рис. 4.22.

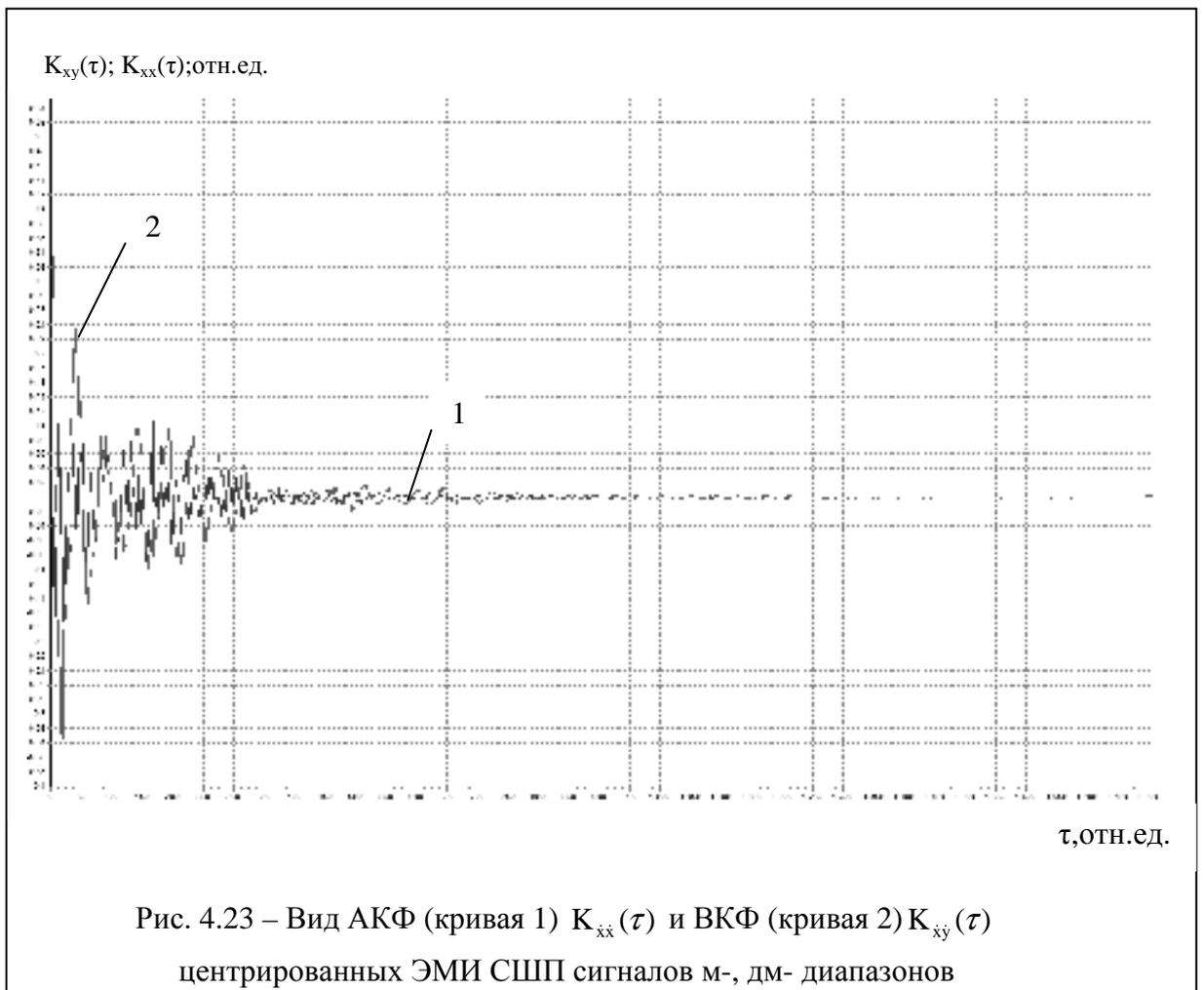
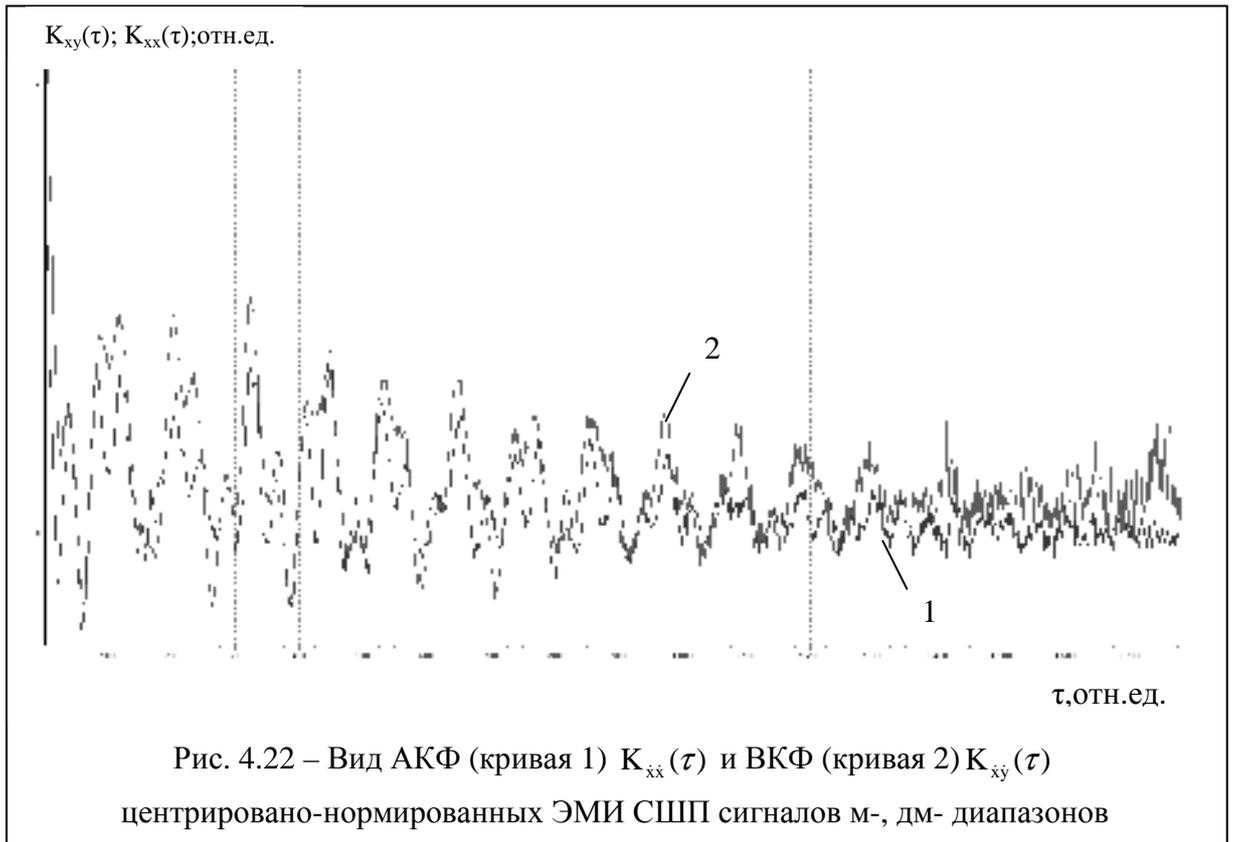
Для сравнения на рис. 4.23 приведены АКФ и ВКФ центрированных ЭМИ СШП сигналов м-, дм-диапазонов.



Попытка объяснить заострённость таких распределений была предпринята Б. Мандельбротом и Е. Фамой [484, 485]<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Основная идея: отклонение распределений приращений от нормального означает, что классическая центральная теорема здесь не применима, так как нарушаются её условия – отсутствие конечных дисперсий у приращений за бесконечно малые промежутки времени. Поэтому вместо центральной предельной теоремы в качестве основы для построения моделей приращения Б. Мандельброт и Э. Фама предложили использовать предельные теоремы, описывающие сходимость сумм независимых слагаемых с бесконечными дисперсиями. Однако для устойчивых законов, описывающих предельные распределения, не нашлось явных выражений устойчивой плотности в терминах элементарных функций (лишь недавно доказано, что все устойчивые плотности допускают представление в терминах так называемых функций Фокса или в терминах обобщённых J – функций Мейера) [486, 487].

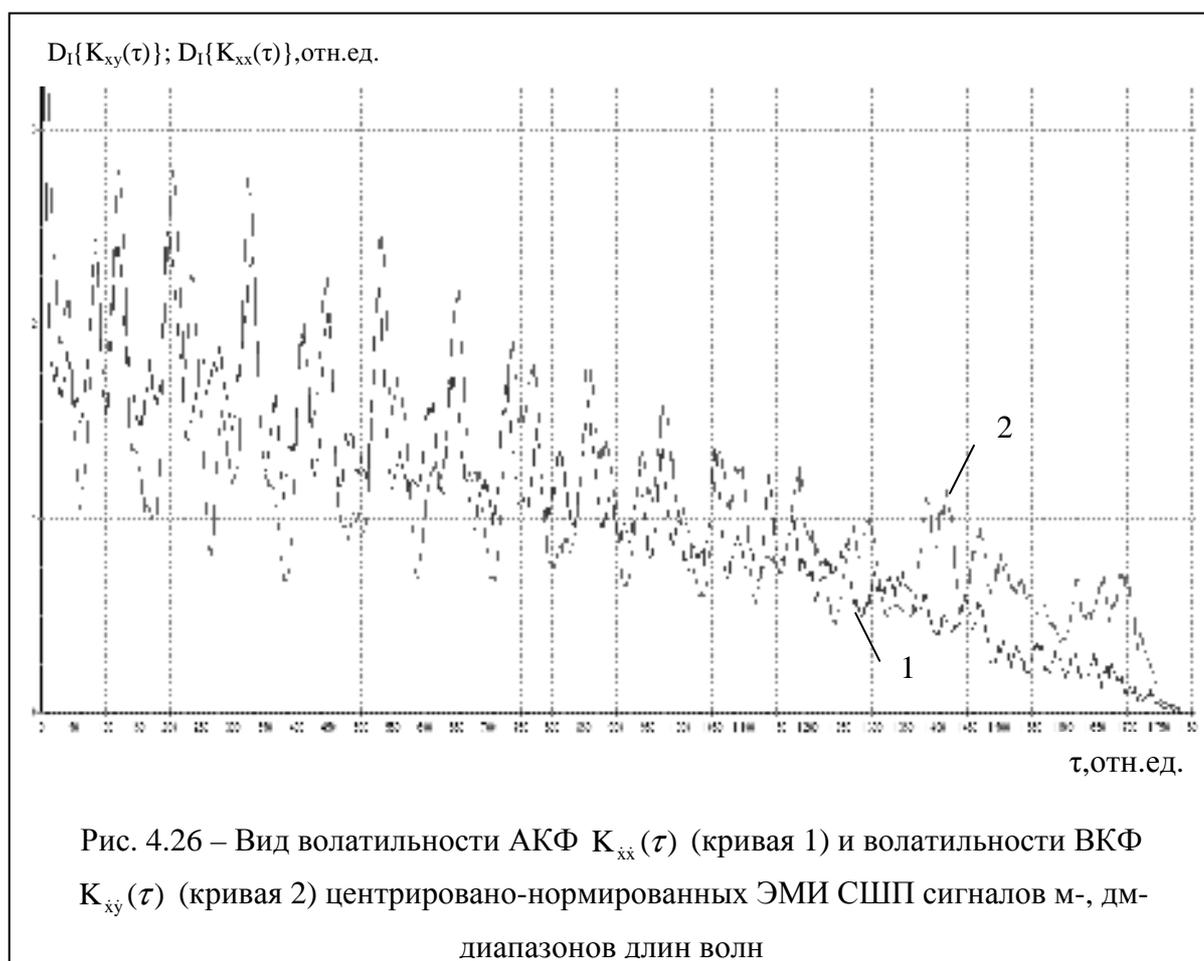




При изучении тонкой стохастической структуры корреляционных матриц наибольший интерес представляет скорость изменения процесса (его волатильность)<sup>24</sup>. Дисперсия случайной величины  $X$  может быть представлена в виде суммы двух слагаемых:

$$D_{\Sigma} \{X\} = D_I + D_{II} = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \cdot w_i(X_i) + \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 \cdot w_i(X_i), \text{ где } \bar{X} = \sum_{i=1}^k X_i \cdot w_i(X_i). \quad (4.27)$$

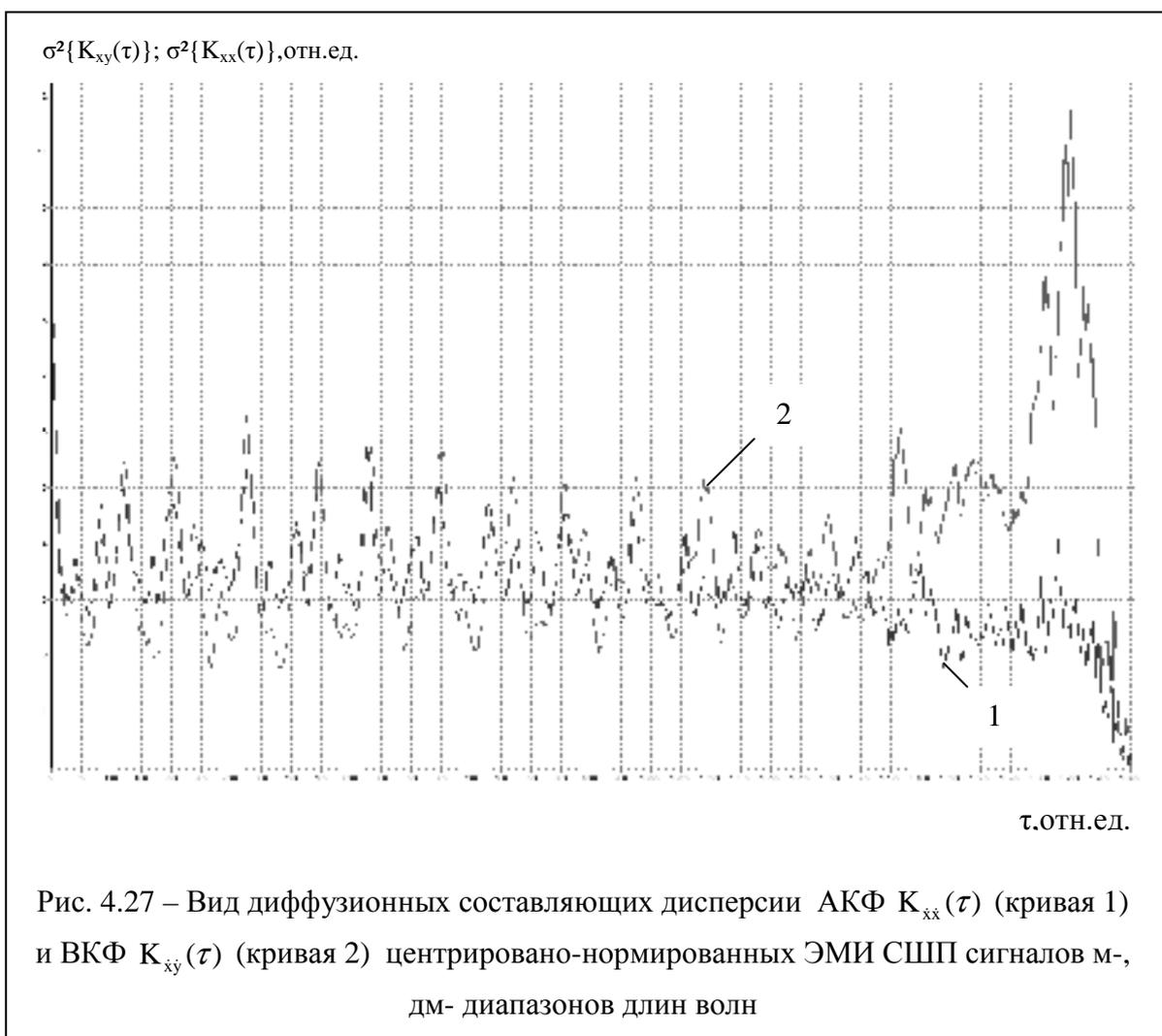
Первое выражение в (4.27) характеризует ту часть дисперсии, которая обусловлена наличием ненулевых сдвигов, то есть динамическую составляющую дисперсии (волатильность),  $D_I \{X\} = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \cdot w_i(X_i)$ , тогда как второе выражение характеризует чисто диффузионную составляющую дисперсии<sup>25</sup>.



<sup>24</sup> В [488] для статистического анализа хаотических случайных процессов предложен метод скользящего разделения смесей (СРС-метод), который позволяет спонтанно разложить волатильность рассматриваемого процесса на динамическую и диффузионную компоненты.

<sup>25</sup> В теории марковских процессов эти понятия соответствуют коэффициенту диффузии [470]. Отличие в квадратичной форме волатильности. Параметры смесей (параметры сдвига (дрейфа), масштаба (диффузии) и веса компонент) оцениваются как функции времени [492].

На рис. 4.26 (кривая 2) представлена волатильность - та часть дисперсии, которая обусловлена наличием ненулевых сдвигов, или динамическая составляющая дисперсии (4.27) для ВКФ сигналов м-, дм - диапазонов (рис. 4.1, 4.2), центрировано-нормированных по (4.22÷4.23) относительно оценок первого и второго моментов, полученных по (4.19÷ 4.20), для семейства вероятностных плотностей Релея-Райса; кривая 1 - волатильность для АКФ центрировано-нормированного сигнала дм – диапазона сигнал. На рис. 4.27 показана диффузионная составляющая дисперсии (4.27).



Особый интерес вызывает логарифм от отношения спектральных составляющих. В оригинальной работе [489] путем решения уравнения Винера – Хопфа выведена формула Йовица – Джексона для минимальной среднеквадратической ошибки (МСКО, далее МСКО Йовица – Джексона):

$$\sigma_0^2 = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot S_s(\omega)}{N_0} \right] \cdot \frac{\partial \omega}{2 \cdot \pi}, \quad (4.28)$$

$S_s(\omega), N_0$  – спектральные плотности сигнала и шума.

Поскольку центрировано–нормированное (сдвиг/масштабное) преобразование сигналов (4.25) осуществляется относительно объемов объединённых выборок  $N_{1x,y}(t)$ ,  $N_{2x,y}(t)$ ,  $N_{3x,y}(t)$ , очевидно, что Фурье - преобразование для ВКФ, волатильности ВКФ и первой вариационной задачи будут выглядеть как

$$\begin{aligned} \text{Sp}_{\{K_{xy}\}}(\omega, t) &= \int_t^{N_{1x,y}(t)} \{K_{xy}(\tau)\} \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot \tau) \cdot d\tau, \\ \text{Sp}_{D_1\{K_{xy}\}}(\omega, t) &= \int_t^{N_{1x,y}(t)} D_1\{K_{xy}(\tau)\} \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot \tau) \cdot d\tau. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Усредняя в интервале частот величину  $\text{Sp}_{\{K_{xx}\}}(\omega, t)$  и  $\text{Sp}_{\text{Vol}\{K_{xx}\}}(\omega, t)$ , получим

$$\begin{aligned} \bar{\text{Sp}}_{\{K_{xx}\}}(t) &= \frac{1}{[\omega_{\max}(N_{1x,y}(t))]} \sum_{\omega=0}^{\omega_{\max}} \text{Sp}_{\{K_{xx}\}}(\omega, t) \cdot \Delta\omega, \\ \bar{\text{Sp}}_{D_1\{K_{xx}\}}(t) &= \frac{1}{[\omega_{\max}(N_{1x,y}(t))]} \sum_{\omega=0}^{\omega_{\max}} \text{Sp}_{D_1\{K_{xx}\}}(\omega, t) \cdot \Delta\omega. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Используя представления (4.29) ÷ (4.30), применительно к АКФ, ВКФ и их волатильностям для первой вариационной задачи (4.28) можно переписать

$$\begin{aligned} \sigma_{\{K_{yx}\}, \{K_{xx}\}}^2 &= \frac{\bar{\text{Sp}}_{\{K_{xx}\}}(t)}{2} \int_0^{\omega_{\max}(N_{1x,y}(t))} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot \text{Sp}_{\{K_{xy}\}}(\omega, t)}{\bar{\text{Sp}}_{\{K_{xx}\}}(t)} \right] \cdot \frac{\partial \omega}{2 \cdot \pi}, \\ \sigma_{D_1\{K_{yx}\}, D_1\{K_{xx}\}}^2 &= \frac{\bar{\text{Sp}}_{D_1\{K_{xx}\}}(t)}{2} \int_0^{\omega_{\max}(N_{1x,y}(t))} \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot \text{Sp}_{D_1\{K_{xy}\}}(\omega, t)}{\bar{\text{Sp}}_{D_1\{K_{xx}\}}(t)} \right] \cdot \frac{\partial \omega}{2 \cdot \pi}, \end{aligned} \quad (4.31)$$

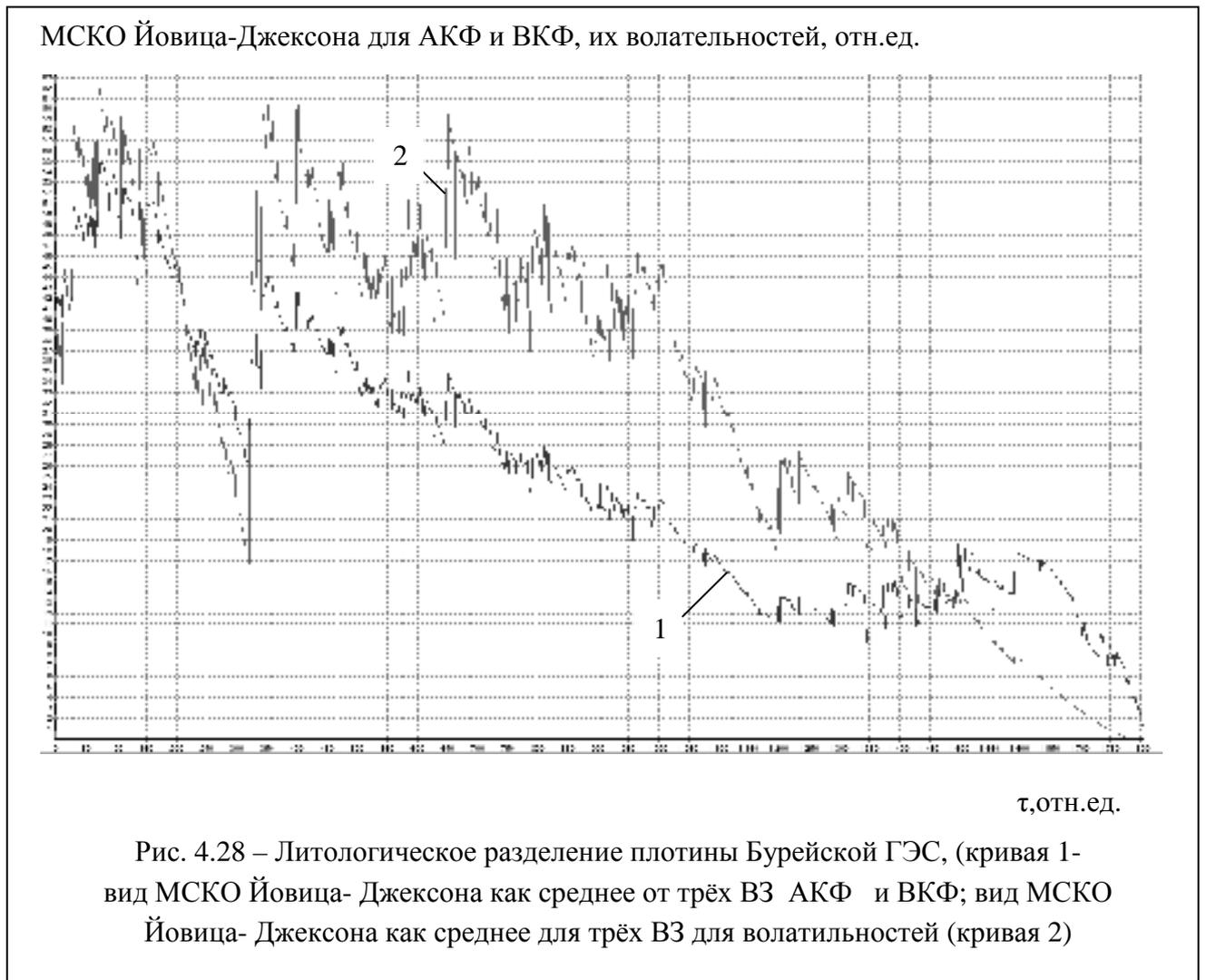
$\sigma_{\{K_{yx}\}, \text{Vol}\{K_{xx}\}}^2$  - МСКО Йовица – Джексона от АКФ и ВКФ;  $\sigma_{D_1\{K_{yx}\}, D_1\{K_{xx}\}}^2$  - МСКО Йовица –

Джексона от их волатильностей. Здесь

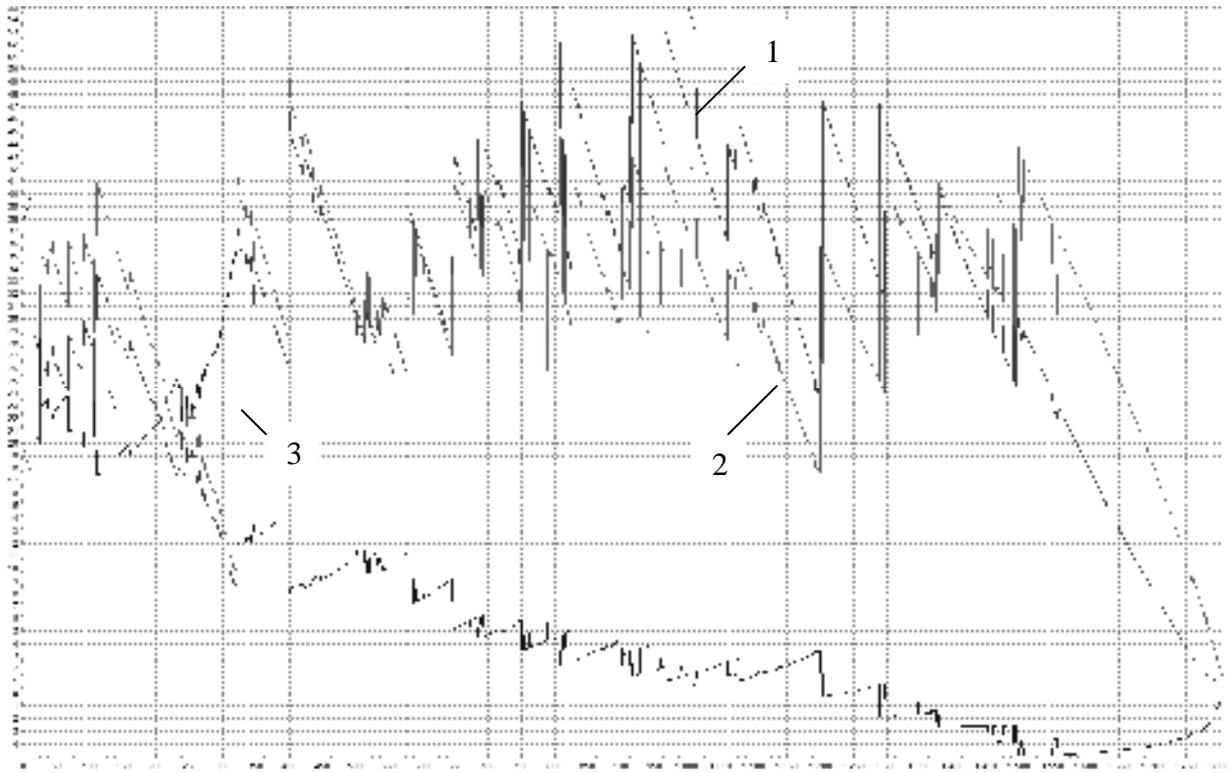
$$\begin{aligned} D_1\{K_{xy}(t, \tau)\} &= \sum_{i=1}^k \left( \|K_{xy}(t, \tau)\|_i - K_{xy}(t, \tau) \right)^2 \cdot w_i(\|K_{xy}(t, \tau)\|), \\ D_1\{K_{xx}(t, \tau)\} &= \sum_{i=1}^k \left( \|K_{xx}(t, \tau)\|_i - K_{xx}(t, \tau) \right)^2 \cdot w_i(\|K_{xx}(t, \tau)\|), \end{aligned}$$

$\tau$  – номер строки в матрицах  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  и  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  соответственно;  $K_{xx}(\tau)$ ,  $K_{xy}(\tau)$  – значение мат. ожидания матриц АКФ и ВКФ для строки  $\tau$ ;  $\|K_{xx}(t, \tau)\|$  и  $\|K_{xy}(t, \tau)\|$  – значения  $i$ -го столбца в ЭПВ от строки  $\tau$ .

На рис. 4.28 приведен пример [421, 422] литологического разделения плотины Бурейской ГЭС в ТЗ №3 по МСКО Йовица-Джексона для ВКФ / АКФ и их волатильностей как среднее для трёх вариационных задач. Внешнее сходство говорит о надёжности литологического разделения.



МСКО Йовица-Джексона ВКФ/ АКФ, их волатильностей, фильтрация; отн.ед.



τ, отн.ед.

Рис. 4.29 – Литологическое разделение плотины Бурейской ГЭС (кривая 1- вид МСКО Йовица- Джексона для ВКФ/АКФ; кривая 2 – вид МСКО для их волатиностей; кривая 3 –фильтрация) для II вариационной задачи

## ВЫВОДЫ

1. Подстилающая среда представлена макросистемой. Для неё предполагается значительная дисперсия диэлектрической проницаемости в м-, дм- диапазонах длин волн. Рассматриваемый подход представляется наиболее простым и удобным способом построения классической статистической идентификации подповерхностных структур при зондировании в одной точке. Способ основан, по сути, на одной гипотезе и лишён ряда сложностей (эргодическая гипотеза, предельная теорема и т.д.).

2. Использован вариационный принцип описания динамики макросистемы с введением энтропии для двух ЭМИ СШП сигналов. Показано, что порядок построения ЭПВ определяется методом формирования числа интервалов группирования экспериментальных данных. Задача выбора числа интервалов группирования экспериментальных данных «ящичков» для их статистической обработки есть задача многокритериальной оптимизации. Оптимальные оценки числа интервалов существуют. Их нахождение сведено к задачам линейного программирования.

3. Практическая реализуемость рассмотренных вариационных задач позволяет упростить процедуру определения эллипса рассеяния, существующего для любой несмещённой оценки.

4. Путём введения сингулярности в ЭПВ ЭМИ СШП сигналов проведено построение энтропийных критериев оценивания объёмов выборки для сдвиг/масштабного преобразования сигналов с последующим нахождением АКФ, ВКФ и волатильностей для АКФ и ВКФ.

5. Показано, что центрировано – нормированные ЭМИ СШП сигналы (сдвиг/масштабно преобразованные) идентифицируемы по Г. Тейчеру. Для этого использованы гладкие (дифференцируемые по оценке) распределения, обеспечивающие сходимость оценки к локальному максимуму правдоподобия.

6. Применение корреляционно-дисперсионного анализа данных ЭМИ СШП зондирования позволяет расширить круг минимаксных задач: от

дифференциальных (правдоподобие спектров ВКФ / АКФ, их волатильностей) до таких как фильтрация.

7. Существование трендов волатильностей ВКФ и АКФ позволяет использовать спектры правдоподобия – один из самых мощных инструментов статистики. При этом решён вопрос о ширине окна Фурье преобразования.

## V ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

### 5.1 Контроль качества закрепления грунта в строящихся тоннелях

Сегодня контроль качества закрепления грунта - затратная по времени и дорогостоящая операция, связанная с бурением<sup>1</sup>. В качестве альтернативы может выступать контроль качества закрепления грунтов методом ЭМИ СШП зондирования, который впервые опробован на Северомуйском тоннеле [523].

#### 5.1.1 Геофизические исследования ЭМИ СШП зондированием Северомуйского тоннеля

Геологический разрез по трассе Северомуйского тоннеля<sup>2</sup> представлен на рис. 5.1. Работы, проведенные на данном участке (апрель 2000 г.), являлись вторым этапом подобных работ, выполненных здесь в сентябре 1999 г.

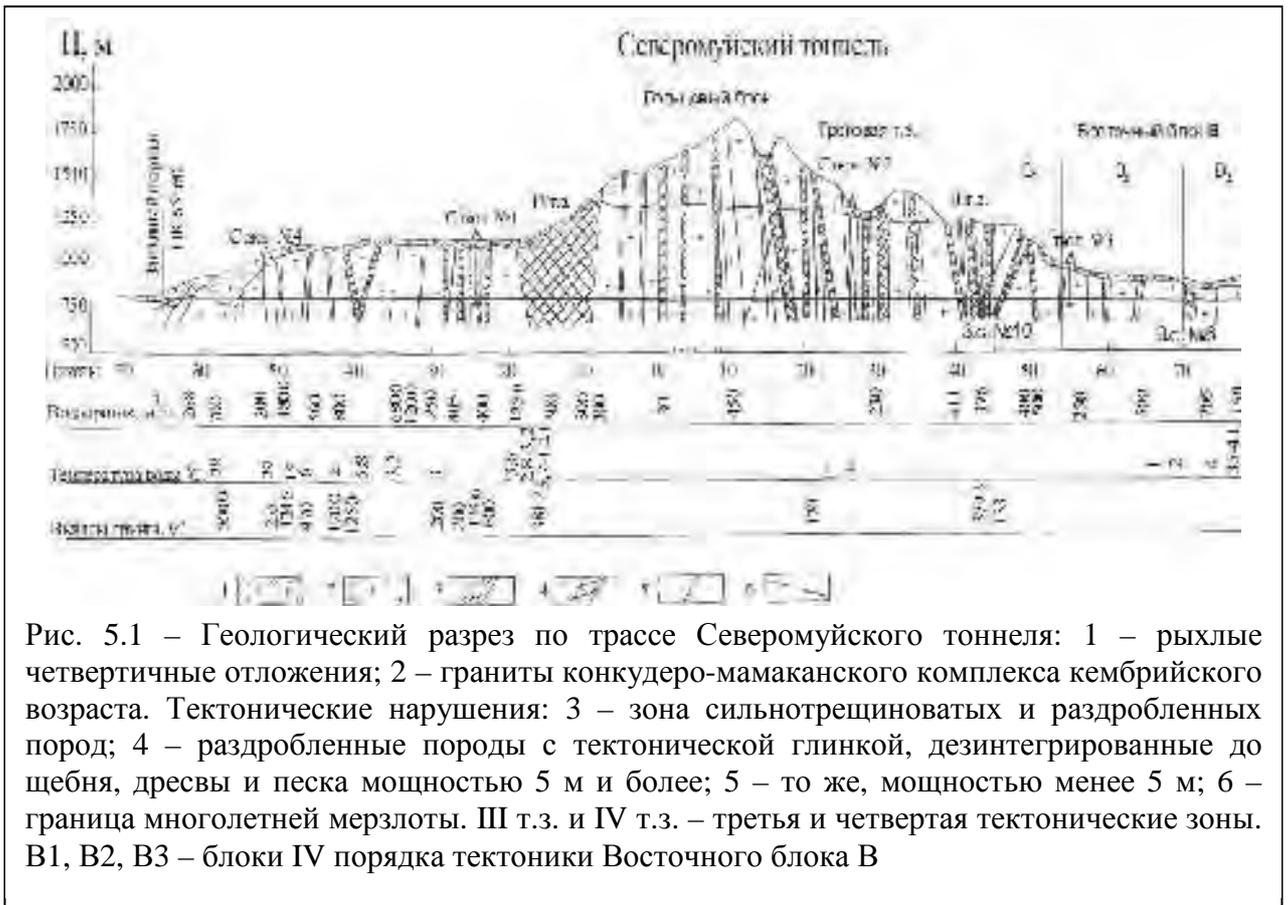
На данном этапе исследований предполагалось решение следующих задач: определить инженерно-геологическое строение непройденной части Северомуйского тоннеля между ПК<sup>3</sup> 14+96 – ПК 16+00, определить качество инженерного закрепления сводовой части тоннеля под "щитом" (ПК 16+00) по относительным плотностным свойствам пород (в направлении Восточного блока, рис. 5.1).

---

<sup>1</sup> *Объемный контроль*: контроль глубины бурения скважины; оценка качества приготовления цементного раствора (соблюдение проектного Вода/Цемент отношения), контроль проектного содержания вводимых добавок, порядка введения добавок, фиксация скорости подъема монитора из скважины и частоты его вращения, фиксация объема цементного раствора, подаваемого в грунт по длине буровой скважины с записью всех указанных выше параметров в журнал производства работ; *испытание статической вдавливающей нагрузкой*: контрольные работы выполняются после набора прочности цементогрунта в соответствии с действующими требованиями норм и стандартов; *отбор кернов*: отбор кернов из закрепленного массива через 0.5-1м по глубине скважины в нескольких местах по сечению. При контрольном бурении производится визуальная оценка всего керна по глубине с занесением данных в журнал, определение прочности цементогрунта. Устанавливаются размеры и количество агрегатов грунта в массиве закрепленного грунта; *мониторинг* за состоянием соседних сооружений.

<sup>2</sup> Построен в теле горной перемычки, разделяющей Верхнеангарскую и Муйскую впадины Байкальского рифта. Перемычка является частью водораздельного Северомуйского хребта, сложенного раннепалеозойскими гранитами Ангаро – Витимского батолита. Определяющий элемент геологии – многочисленные разноориентированные зоны тектонического дробления мощностью от десятков см до 1.5÷2 км. По трассе тоннеля отмечались термальные воды ( $\geq 40^{\circ}\text{C}$ ), выходы радона и гелия. Давление грунтовых вод  $\geq 5$  МПа.

<sup>3</sup> ПК – пикет, его длина 100 м.



План расположения точек ЭМИ СШП зондирования представлен на рис. 5.2, их общее количество на этом этапе работ составило 25. Глубины исследования колебались в пределах от 52 м до 64 м; в точках № 23 и № 24 глубины зондирования соответственно 30.17 м и 31.89 м. Привязка точек зондирования к плану объекта полуинструментальным способом.

Для определения инженерно-геологического строения непройденной части тоннеля проведены измерения из сопутствующих подземных камер и разведочно - дренажных штолен (РДШ) в направлении непройденной части тоннеля (в направлении Восточного блока, рис. 5.1), а также с забоя со стороны Восточного портала тоннеля.

В ходе предыдущего геофизического обследования места вывала в Северомуйском тоннеле (сентябрь 1999 г.) в 7 – 10 м выше свода тоннеля вблизи ПК 16+00 выявлена зона интенсивного разуплотнения горного массива, которую отнесли к "воронке" вывала грунтов.

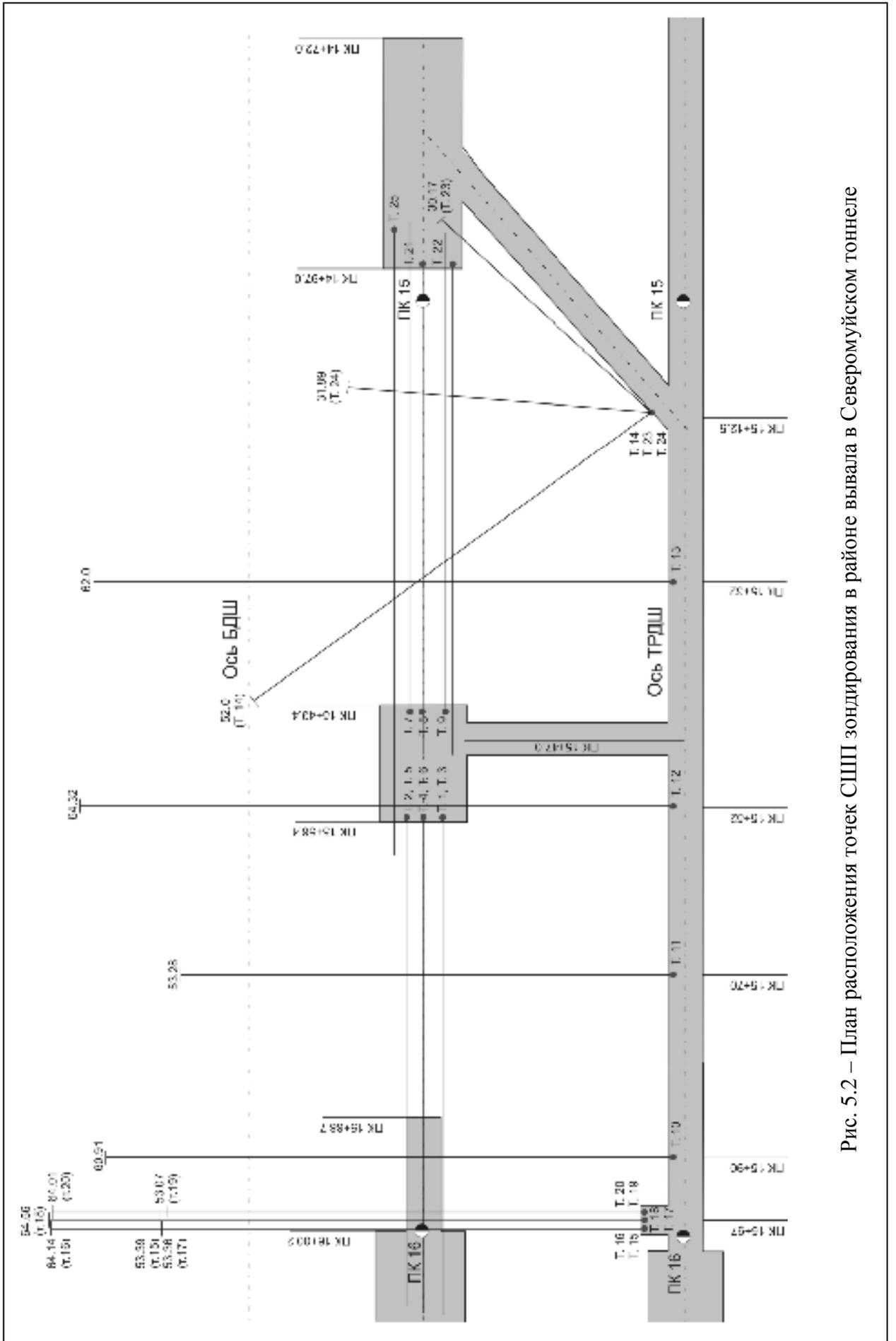
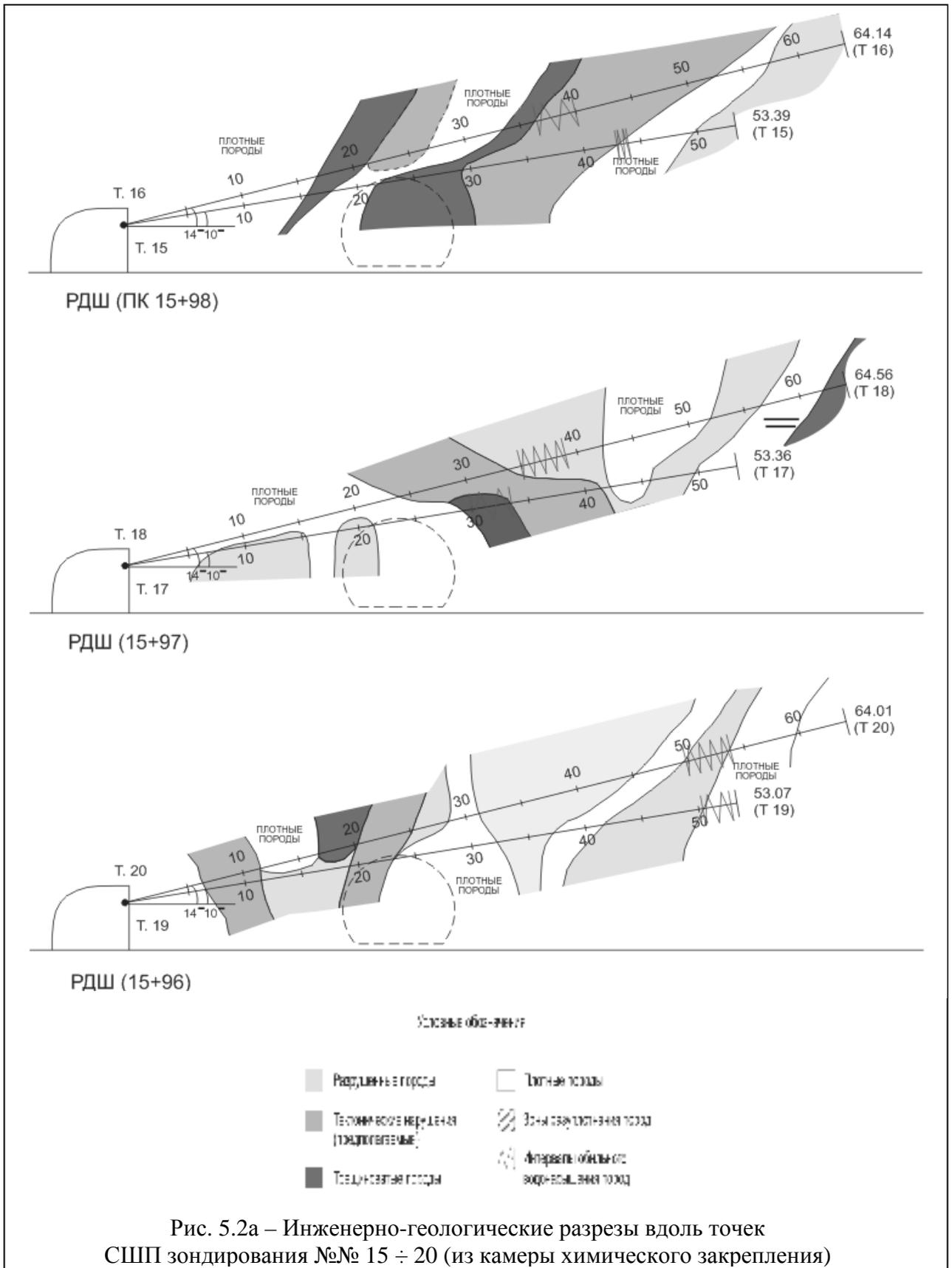


Рис. 5.2 – План расположения точек СШ зондирования в районе вывала в Северомуйском тоннеле



Отмеченная зона разуплотненных пород имела направление падения к "щиту". По этим результатам было начато инъекционное закрепление предполагаемой "воронки" вывала.

Одной из задач СШП исследований в апреле 2000 г. являлось определение состояния пород в позиции установленного вывала в результате проведенного химического закрепления. Геофизическое зондирование выполнялось из камеры химического закрепления на ПК 15+98, 15+97, 15+96. На каждом из этих пикетов проводились по два измерения с вертикальным углом зондирования  $10^\circ$  и  $14^\circ$ . Таким образом, обследован массив пород непосредственно в своде тоннеля и в в двух метрах выше свода тоннеля. Разрезы, составленные по результатам исследований, приведены на рис. 5.2а. Из них следует, что после инъекционного закрепления горного массива на участке развития "воронки" вывала вблизи ПК 16+00 в сводовой части тоннеля, сразу за "щитом" сохраняется преобладание нарушенных пород, уплотнение произошло лишь в районе ПК 15+97. Породы, слагающие стены тоннеля между ПК 15+96 – ПК 15+98, преимущественно прочные, слаботрещиноватые, реже трещиноватые.

Обводнённые породы в горном массиве отмечаются: в виде отдельных интервалов мощностью до 4.0 – 4.5 м впереди "щита"; в виде линейной зоны обводненности, залегающей субпараллельно трассе тоннеля ближе к БДШ, между ПК 14+96 – ПК 15+43.4; на ПК 15+97 и ПК 15+98 обводненный участок наблюдается в предсводовой части в породах северной стенки тоннеля [266, 434].

### **5.1.2 Контроль качества закрепления грунтов на территории строительства станции метрополитена «Звенигородская»**

#### **в г. Санкт-Петербурге**

Для сооружения эскалаторного тоннеля закрытым способом согласно технической документации было выполнено закрепление грунтов в интервале глубин с абсолютными отметками от 103.2 до 66.7 м по технологии струйной цементации установкой «Jet Grouting» (гидравлическое смешивание грунта и раствора на цементной основе).

В фиксированных точках дневной поверхности в пределах контура закрепления были выполнены вертикальные ЭМИ СШП измерения на глубину

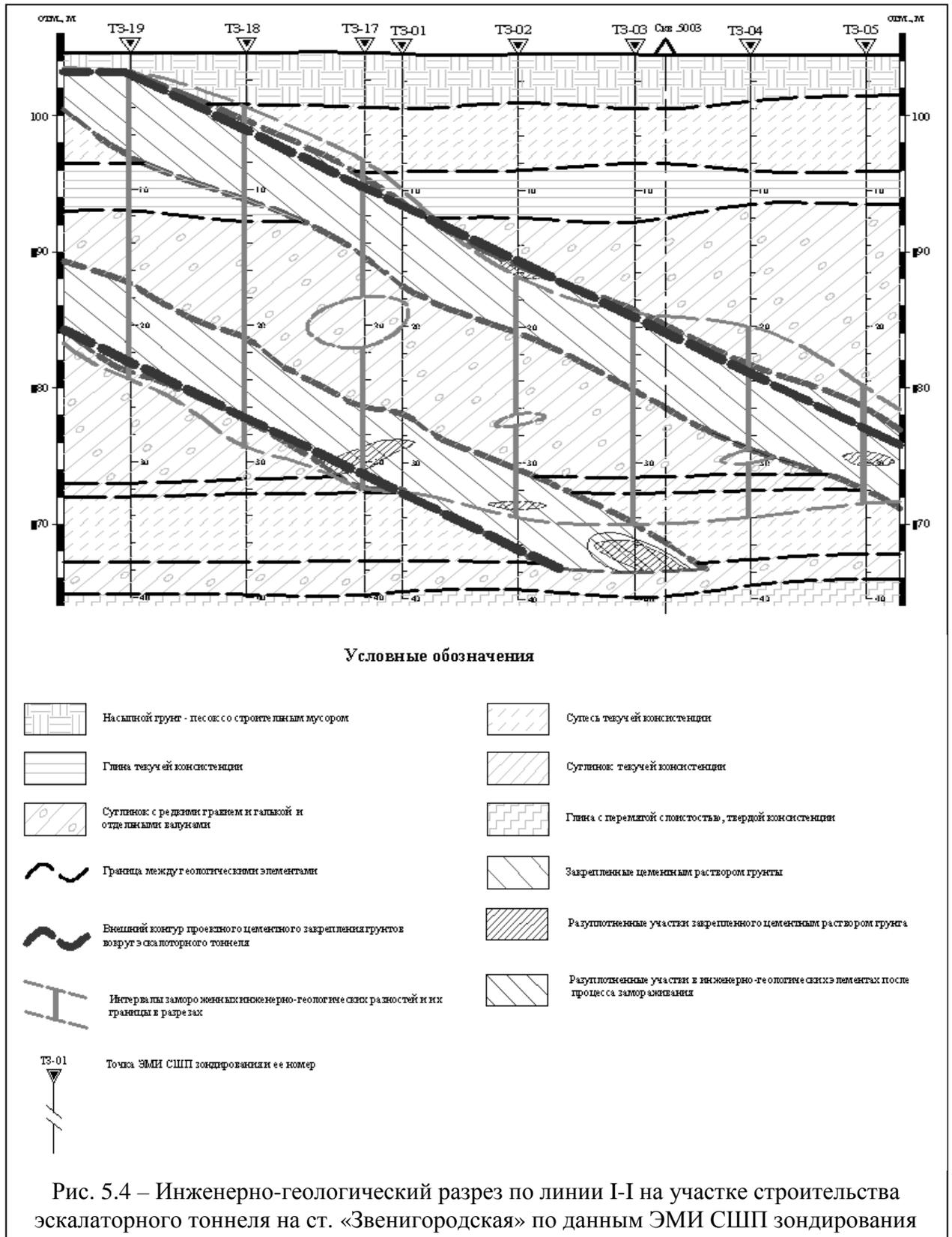
до 41.0 м от уровня дневной поверхности, что обеспечивало превышение проектной отметки закрепления по вертикали на 3.0 м. Измерения были выполнены на трех продольных сечениях участка: на линии I-I вдоль оси эскалаторного тоннеля (на расстоянии 0.8 м южнее оси) и на линиях II-II и III-III, находящихся на расстоянии 7.3 м в одну и другую сторону от линии I-I. Расстояния между точками измерений на линиях профилей варьировались от 2.2 до 10.0 м (рис. 5.3).

Контроль качества выполненного закрепления грунтового массива работ проводился в два этапа. На первом этапе оценивалось качество закрепления грунтов по технологии струйной цементации установкой «Jet Grouting»; на втором – оценивалось влияния процесса замораживания на закреплённый массив.

На первом этапе ЭМИ СШП обследования в разрезах участка строительства эскалаторного тоннеля выделены границы распространения цементно-грунтового массива. В пределах контура закрепления выявлены нарушения сплошности материала, относящиеся к неукрепленным грунтам, мощностью от 0.4 до 2.5 м.



Результаты первого этапа геофизического контроля качества работ по цементному закреплению свидетельствовали о том, что фактические размеры цементно-грунтового массива в разрезах в целом соответствуют проектным.



Нарушения сплошности материала в закрепленном массиве в виде участков разуплотнения (незакрепленного грунта) установлены фрагментарно. Мощности разуплотненных интервалов в измеренных точках колеблются от 0.4 до 2.5 м.

На втором этапе в тех же пунктах зондирования, что были выполнены на первом этапе измерений, проведены очередные измерения на глубину до 41.0 м. В результате сравнения измерений первого и второго этапов отмечено существенное сокращение внутри закрепленного массива количества фрагментов неукрепленных грунтов. Однако в разрезах восточной стены тоннеля (разрез по линии II-II) и по оси эскалатора (разрез по линии I-I) в нижней части сооружения (вблизи границы с протерозойскими глинами) установлен фрагмент незамороженного грунтоцементного массива мощностью от 3 до 6 м (рис. 5.4). Аналогичные работы проводились на ст. «Обводный канал» [418], «Адмиралтейская», «Южная».

## **5.2 Результаты ЭМИ СШП зондирования секции 17-I-2 плотины Бурейской ГЭС**

Целью данной работы являлось обследование качества бетонной кладки плотины и выявление в ней трещин, пустот и неоднородностей<sup>4</sup>.

В результате геофизического обследования, математической обработки [421] и последующей интерпретации данных ЭМИ СШП зондирования выделены границы между бетоном плотины и ниже залегающими горными породами. На основании вида правдоподобия спектра ВКФ/АКФ и их волатильностей тело плотины в точках измерений было дифференцировано на определенные интервалы, в которых бетон обладает различными физико-механическими свойствами (рис. 5.5). Основными геофизическими критериями для характеристики изучаемой среды (бетона плотины) являются рассчитанные значения относительной диэлектрической проницаемости, периода колебаний электромагнитного сигнала и амплитуды АКФ и ВКФ отраженных центрировано-нормированных сигналов.

---

<sup>4</sup> На данный пример распространяются все рисунки гл.IV.

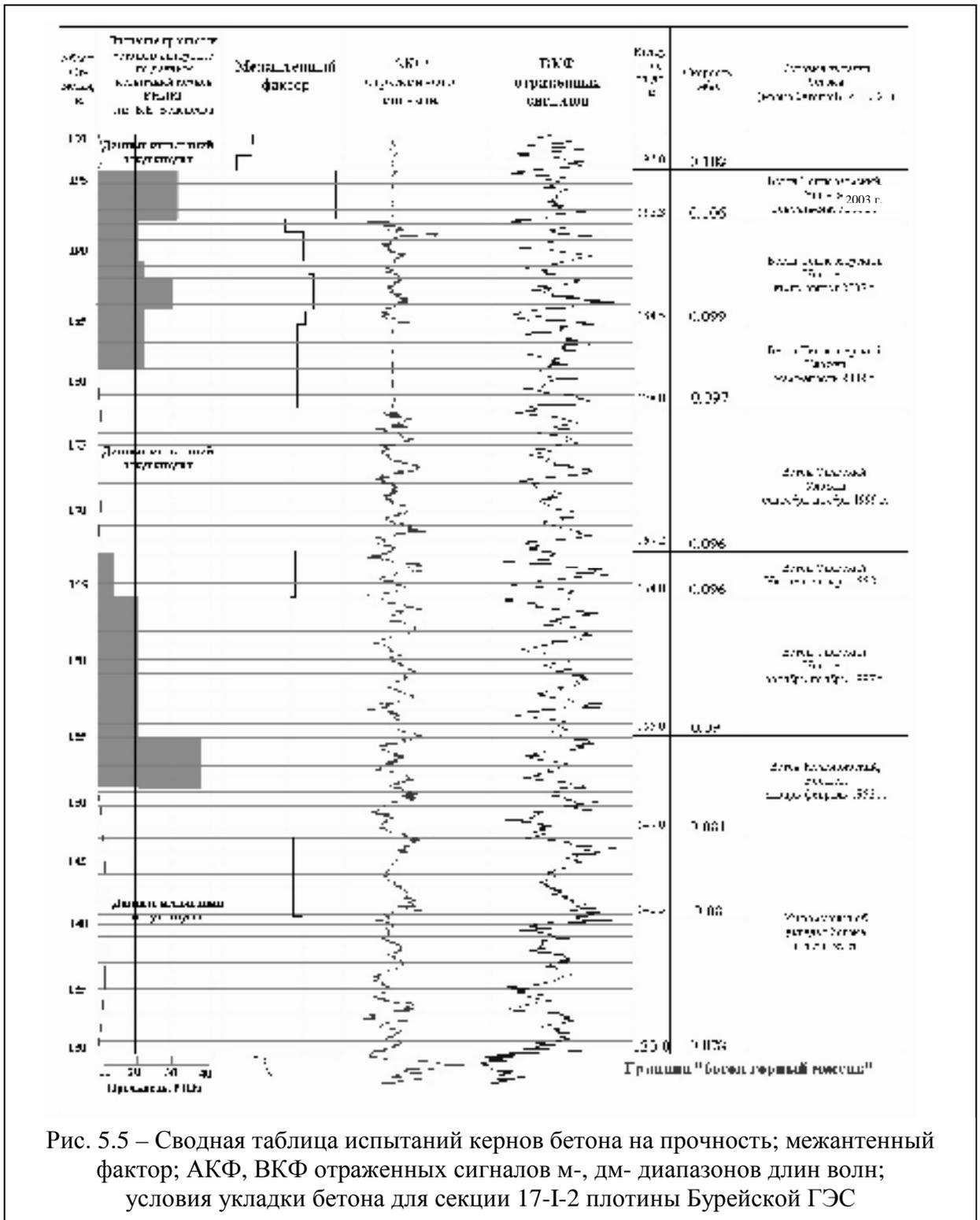


Рис. 5.5 – Сводная таблица испытаний кернов бетона на прочность; межпанельный фактор; АКФ, ВКФ отраженных сигналов м-, дм- диапазонов длин волн; условия укладки бетона для секции 17-I-2 плотины Бурейской ГЭС

Рассчитанные по методике определения глубины залегания слоя (гл. III, п.3) значения относительной диэлектрической проницаемости бетона колеблются от 4.8 до 8.8.

По периоду колебаний электромагнитного сигнала выделяются интервалы с малым (абсолютные значения до 25 наносекунд), средним (абсолютные

значения 25 - 40 наносекунд) и большим (абсолютные значения > 40 наносекунд) периодом.

Амплитуды АКФ и ВКФ центрировано-нормированных ЭМИ СШП сигналов подразделяются на три относительные категории: малых, средних и больших значений. Кроме этого, на отдельных интервалах графиков АКФ и ВКФ наблюдается неустойчивое поведение амплитуды, выражающееся в частой смене фаз. Такое поведение амплитуды условно названо «высокой изломанностью» сигнала.

Из опыта исследований геологических объектов методом ЭМИ СШП зондирования установлено, что малый период колебаний электромагнитной волны характерен для песчанистых (рыхлых) литологических разностей, а большой период колебаний присущ плотным разностям.

Высокие значения амплитуды СШП сигнала связаны с повышением электропроводных свойств среды, что в свою очередь может свидетельствовать о наличии влаги в порах породы. «Высокая изломанность» АКФ и ВКФ указывает, как правило, на локальное нахождение (локализацию) в грунтах большого количества гравийно-галечникового материала.

Известно, что рост значений относительной диэлектрической проницаемости в пределах одного и того же инженерно – геологического элемента связан с увеличением влажности [274, 299].

На рис. 5.5 в качестве примера приводится результат геофизического обследования секции 17-I-2, которое осуществлялось посредством вертикального зондирования в точке измерения №3.

В соответствии с рабочей документацией в точке измерения №3 поверхность плотины имеет абсолютную отметку +199.0 м; подошва тела плотины в этой секции находится на абсолютной отметке +130.0 м. Мощность бетона плотины в точке зондирования на момент измерения составляла 69.0 м. По методу укладки бетон вибрированный.

В результате геофизического обследования секции 17-I-2 установлено положение подошвы плотины на глубине 69.0 м от поверхности измерения на

отметке +130.0 м. В разрезе плотины бетон разбит на отдельные интервалы, в пределах которых рассчитывались значения относительной диэлектрической проницаемости, величина периода колебаний электромагнитной волны и даны особенности амплитудных характеристик ЭМИ СШП сигнала.

Анализ геофизических данных в разрезе точки зондирования №3 выявил следующие особенности в строении бетона секции 17-I-2:

- в интервалах 195.8 – 192.2<sup>5</sup> м, 136.5 – 130.0 бетон плотный с малым содержанием поровой влаги;

- в интервалах 192.2 – 186.5 м, 180.0 – 167.2 м, 148.5 – 140.0 м преобладает песчанистая составляющая в бетоне;

- в интервалах 186.5 – 180.0 м, 167.2 – 148.5 м и 140.0 – 136.5 м преобладает гравийно-галечниковый заполнитель бетона.

На графиках АКФ и ВКФ (рис. 5.5) центрировано-нормированных сигналов видно, что период и амплитуда изменяются в зависимости от типа бетона, различающегося временем укладки и поставщиком. График межантенного фактора (сумма МСКО ВКФ и АКФ, МСКО их волатильностей, МСКО диффузионной составляющей дисперсии ВКФ и АКФ для трёх вариационных задач) указывает конкретное положение в разрезе границ интервалов бетона с однородными свойствами в среде, что подтверждается различными значениями прочности по данным испытаний кернов ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [281, 522].

По результатам обработки данных ЭМИ СШП зондирования, полученных на плотине Бурейской ГЭС, можно говорить о том, что бетонная кладка плотины по своим электрофизическим свойствам существенно неоднородна. Об этом свидетельствуют:

- разновеликие значения относительной диэлектрической проницаемости;
- существенно различающиеся величины периода электромагнитной волны;
- значительные колебания значений ЭМИ СШП сигнала.

На основе различных геоэлектрических характеристик выделены группы неоднородностей в бетоне: I - по значениям относительной диэлектрической

<sup>5</sup> Здесь и далее абсолютные отметки высоты.

проницаемости, изменяющейся как в зависимости от плотности, так и от влажности инженерно-геологического материала; II – по плотности искусственного материала: рыхлые (песчанистые, гравийно - галечниковые) и плотные (однородные) разности; III – по характеру пористости бетона: участки с повышенной поровой влажностью; участки высокопористого бетона.

Таким образом, на рис. 5.5 показана эффективность обработки данных ЭМИ СШП зондирования при построении разреза на глубину до 69.0 м даже в пределах одной инженерной разности – бетона, послойно различающегося временем укладки и изготовителем.

### **5.3 Применение метода ЭМИ СШП зондирования как составляющей геотехнического мониторинга**

Мониторинг инженерно-геологического пространства методом ЭМИ СШП зондирования позволяет решать следующие задачи:

- определение числа слоев, участвующих в разрезе (литологическое расчленение разреза);
- прогноз тектонического и гидрогеологического состояния горного массива;
- контроль качества производимого инъекционного закрепления горных пород.

#### **5.3.1 Результаты ЭМИ СШП зондирования при геотехническом мониторинге зоны «Размыва»**

Из-за неустойчивого состояния грунтов, вызванного специфическими геологическими особенностями и влиянием на них процесса замораживания, на участке метрополитена между станциями метро “Лесная” - ”Площадь Мужества” в г. Санкт-Петербурге (рис. 5.6) произошли аварии в тоннелях.

8 апреля 1974 г.<sup>6</sup> и 15 марта 1995 г.

В процессе аварий происходил вынос больших объемов грунта и воды, что привело к осадкам поверхности и серьезным повреждениям зданий и сооружений по Политехнической улице: в первом случае – на Политехнической улице и на территории НПО «Аврора», во втором – на территории ОАО «Красный Октябрь».

Основной общепринятой версией причины аварий до сих пор является наличие незамороженного участка плавунных (мелких и пылеватых) песков, вскрытого забоем в процессе проходки, в том месте, где тоннели метрополитена пересекают русло палеореки (зона “Размыва”).

ЗАО НПФ “Геодизонд” участвовало в геотехническом мониторинге состояния грунтов около тоннелей по трассе Кировско-Выборгской линии Петербургского метрополитена в период с лета 2005г. по осень 2011 г.

Проведено 14 этапов геофизических исследований на территории ОАО «Красный Октябрь» и ул. Политехнической (рис. 5.7). Задачи геофизических исследований: выявление в разрезах по линиям профилей, составленных на основе пунктов геофизического зондирования, участков различной степени разуплотняемых грунтов; определение масштабов их развития и количественные изменения за период проведения наблюдений. Основная часть аномальных зон, характеризующихся описанными нарушениями во вмещающих тоннели грунтах, находится в «блоке провала» - вертикальной структуре эллипсоидальной формы, в пределах которой вследствие постоянного процесса миграции микрочастиц породы находятся в неустойчивом состоянии (оконтурен по данным ЭМИ СШП зондирования в

---

<sup>6</sup> 8 апреля 1974 года около 16 часов 30 минут на плоскости забоя в нижнем тоннеле была вскрыта зона незамерзшей породы (пльвуна), из которой поступала вода. Забой начал заполняться водой и грунтом через появившиеся трещины. Вскоре и верхний тоннель (у него не было прямого сообщения с нижним забоем) через образующие трещины стал заполняться грунтом с водой. Аварийные затворы из-за быстрого поступления пльвуна полностью закрыть не удалось. Тоннели были затоплены на длине километр, значительная часть ледогрунтового массива разморозилась. Тоннели спасти не удалось. В ночь с 5 на 6 декабря в штабе по ликвидации аварии решили затопить двухкилометровый участок перегона от станции «Лесная» до станции «Площадь Мужества». Для предотвращения дальнейшего выноса грунта, осадок дневной поверхности в районе площади Мужества и разрушения близлежащих строений тоннели через шахтный ствол были заполнены водой.

1998 г.). Бурение подтвердило отсутствие каких-либо физико-механических связей грунтов в пределах данного «блока».



В ходе наблюдений околотоннельного пространства по результатам ЭМИ СШП исследований в разрезах участка были выявлены и околтурены зоны разуплотненных грунтов и зоны суффозии<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Разуплотнение грунтов - физико-механические нарушения сплошности грунтов, в результате которых увеличивается их пористость. Определяющим признаком при этом являлся высокий уровень затухания сигнала (резкое уменьшение значений амплитуды АКФ и ВКФ центрировано-нормированных ЭМИ СШП сигналов) в той части разреза, где присутствует нарушение сплошности геологической среды. В зависимости от степени нарушенности выделялись слабо и интенсивно разуплотненные грунты.

Суффозия - физический процесс, способствующий выносу из определенных участков разреза мелких минеральных частиц подземными водами, фильтрующимися в грунтах. В результате анализа отраженных сигналов в пределах некоторых интервалов разреза отмечалось одновременное присутствие геофизических признаков, выраженных высоким уровнем затухания АКФ и ВКФ центрировано-нормированных сигналов, что свидетельствует о высокой пористости среды, и нулевыми значениями разности фаз Фурье - преобразований для АКФ и ВКФ, что соотносится с водонасыщенностью грунтов. Совпадение этих признаков было отнесено ведущими специалистами проектных организаций, в том числе «Ленметрогипротранса», к проявлению

Для прослеживания динамики и характера развития физико-механических нарушений в горном массиве на инженерно-геологические разрезы, составленные по многолетним данным ЭМИ СШП исследований, были вынесены все зоны разуплотнения грунтов и зоны суффозий, наблюдавшиеся в период с 2005 по 2011 гг. На рис. 5.8 приведено обобщение результатов наблюдений на разрезе по линии П-6 (пересечение заводской территории и ул. Политехнической - на рис. 5.7).



Далее для общей оценки состояния грунтового массива были оконтурены области наибольшего скопления фрагментов физико-механической нарушенности геологических разностей. По количеству выявленных за весь период мониторинга зон разуплотнения и суффозии внутри оконтуренных областей выделены участки различной степени возможного влияния на образование просадок дневной поверхности.

*Участки I степени влияния* характеризуются наличием суффозионных зон и

разуплотненных грунтов с переменной степенью нарушенности. Нарушения в сплошности грунтов в пределах участка наблюдались на протяжении всего периода измерений.

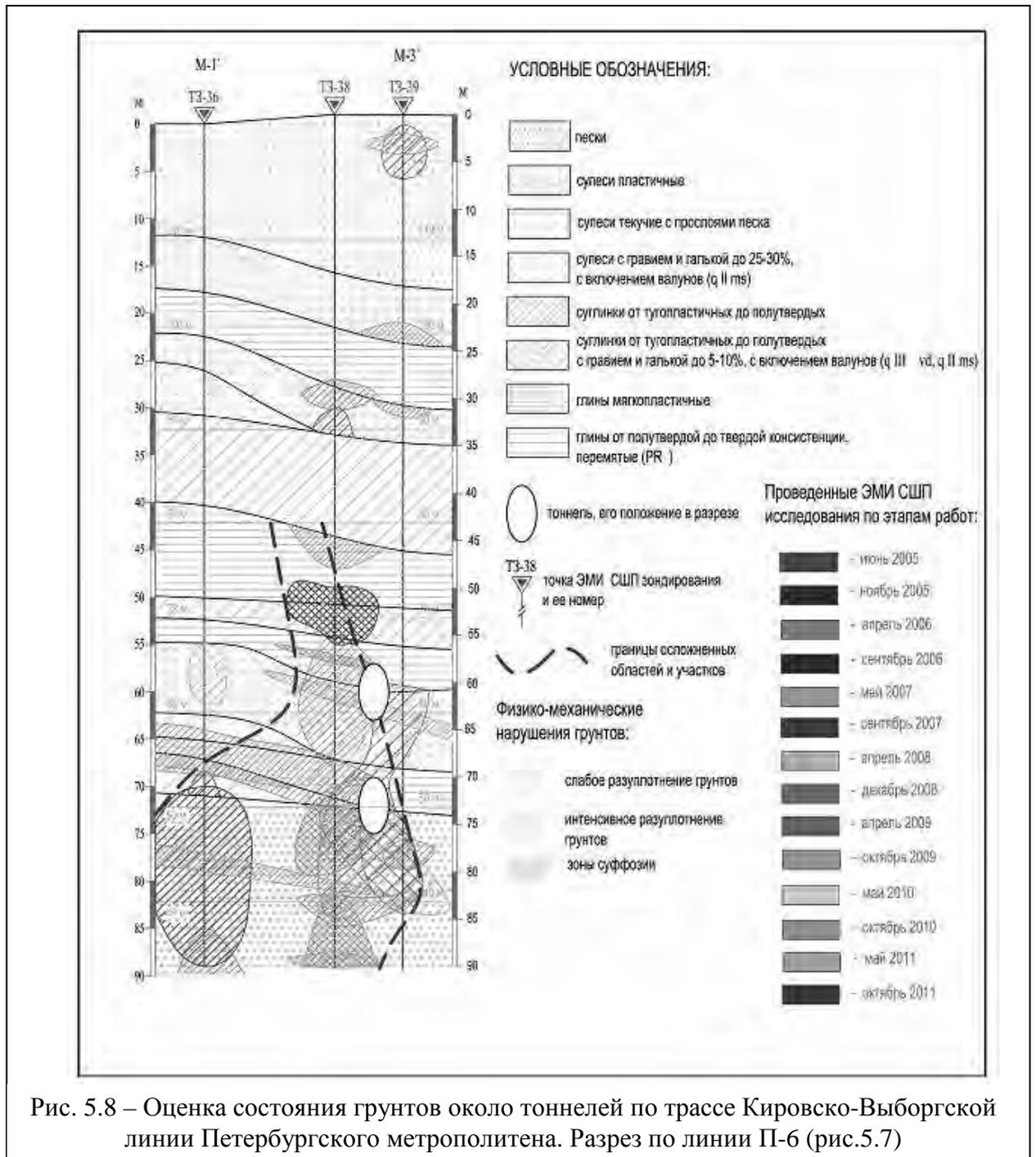


Рис. 5.8 – Оценка состояния грунтов около тоннелей по трассе Кировско-Выборгской линии Петербургского метрополитена. Разрез по линии П-6 (рис.5.7)

*Участки II степени влияния* характеризуются единичными проявлениями суффозионных зон и разуплотнённых грунтов, при этом зоны слабо разуплотненных разностей преобладают над зонами интенсивного разуплотнения. Нарушения в сплошности грунтов отмечались в течение всего периода наблюдений.

*Участки III степени влияния* характеризуются отсутствием суффозионных зон, наличием единичных проявлений зон интенсивного разуплотнения на фоне слабо разуплотненных грунтов. Нарушения в сплошности грунтов наблюдались периодически на отдельных этапах мониторинга.

На рис. 5.9 приведен разрез по линии П-2 (рис.5.7) с участками I, II и III степеней влияния на возможное образование просадок дневной поверхности.

Анализ результатов геофизических исследований, периодически проводимых в период с июня 2005 г. по октябрь 2011 г., позволяет выделить следующие аспекты в динамике развития осложняющих процессов, происходящих в грунтовой толще объекта:

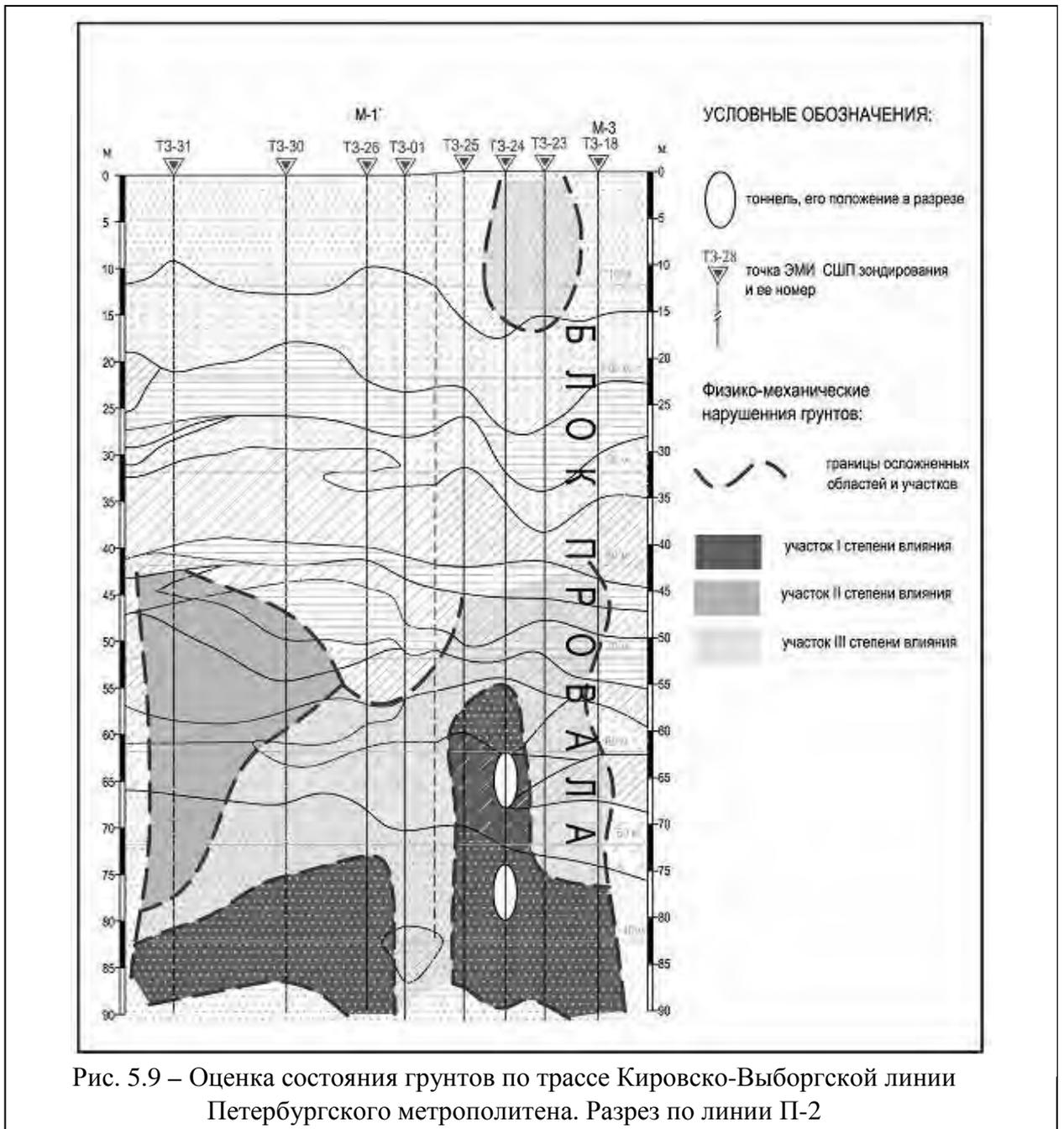
- в горном массиве до глубины 100 м от уровня дневной поверхности выявлены многочисленные фрагменты грунтовой толщи, характеризующиеся деструктивными нарушениями - разуплотнениями геологических разностей и суффозионными процессами, которые преимущественно наблюдаются либо в непосредственной близости с тоннелями метрополитена, либо на удалении до 30 м от них. Большая часть указанных зон разуплотненного грунта в разрезах объекта выражена локально, некоторые из них формируют протяженные структуры;

- установлено, что в околотоннельном пространстве сосредоточены преимущественно участки I степени влияния на образование просадок дневной поверхности (рис. 5.10).

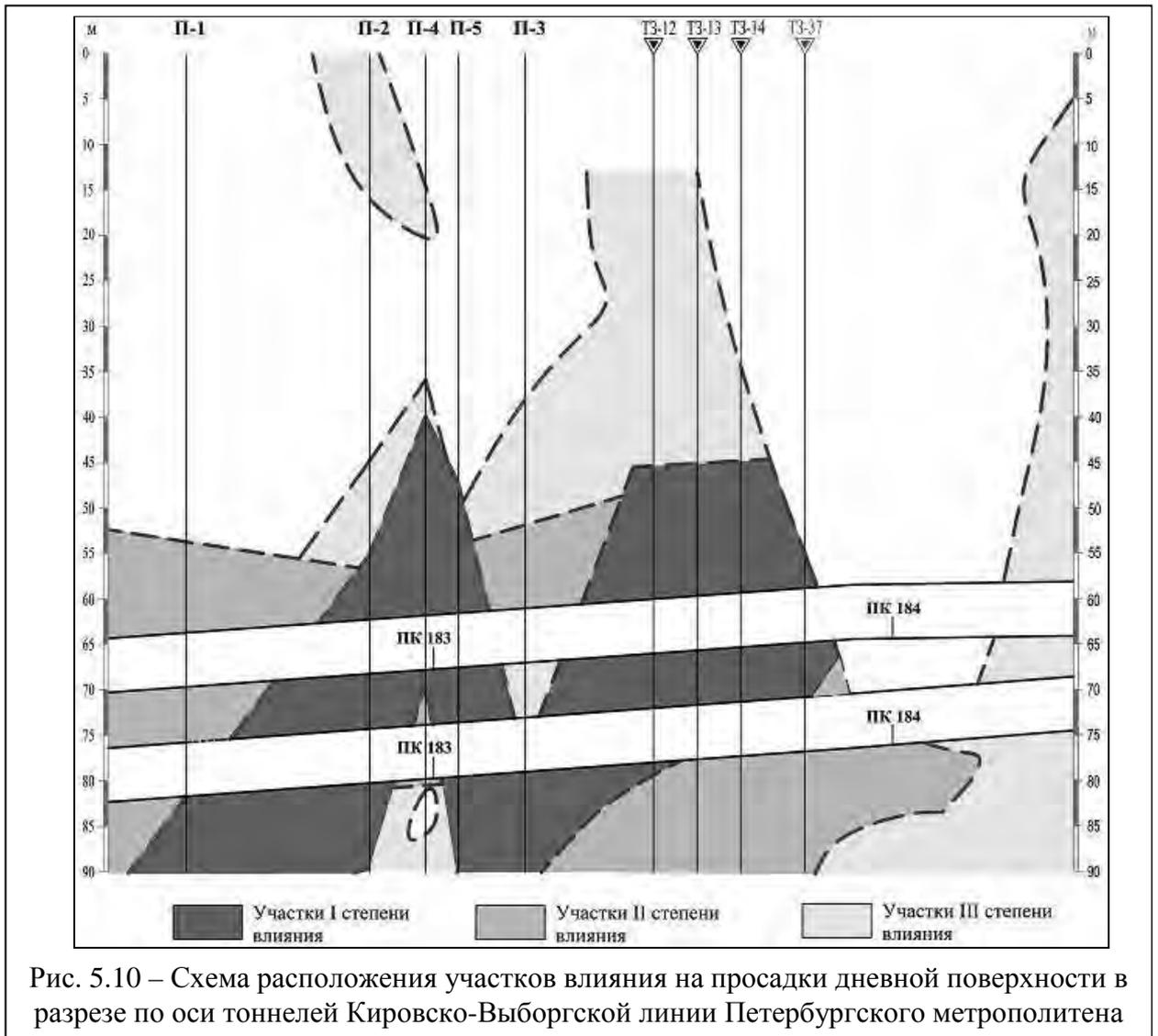
На рис. 5.10 приведена схема расположения участков влияния на просадки дневной поверхности в разрезе по оси тоннелей Кировско-Выборгской линии Петербургского метрополитена.

Из рис. 5.10 следует, что участки I степени влияния, характеризующиеся наличием зон суффозии и разуплотненных грунтов различной степени интенсивности, наблюдаются: над сводом верхнего тоннеля в интервалах между ПК 182+75 – ПК 183+12 и ПК 183+32 – ПК 183+84; в целике между тоннелями в интервале между ПК 182+56 – ПК 183+88.5 (за исключением района ПК 182+98 и ПК 183+20); в подошве нижнего тоннеля в интервалах

между ПК 182+46 – ПК 182+92 и ПК 183+02 – ПК 183+54. Наибольшее приближение к дневной поверхности участков I степени влияния на глубине 43.8 м.



Оценка динамики процессов, происходящих в системе «затопленные тоннели – массив», проведена по характеру проявления нарушений в грунтах в общем контуре участков I степени влияния за весь период мониторинга. Для этого было подсчитано суммарное количество нарушений сплошности грунтов на разрезах на каждом этапе наблюдений.



На рис. 5.11 приведены графики суммарного количества выявленных зон с нарушениями сплошности в грунтах в объединенном контуре участков I степени влияния в околотоннельном пространстве. Анализ графиков свидетельствует о “волнообразном” процессе происходящих изменений в структуре грунтов в околотоннельном пространстве в период с 2005 по 2011 гг.: во время осеннего этапа измерений 2006 г. и весенних 2009 и 2011 гг. количество наблюдаемых нарушений в грунтах было минимальным, а осенью 2007 г. – максимальным за весь период мониторинга. В период с весны 2007 г. по весну 2008 г. отмечалась активизация суффозионных процессов.

Для стабилизации горного массива в так называемой зоне «Размыва» рекомендовано, в первую очередь, закреплять грунты на участках в зависимости от степени их влияния на образование просадок дневной

поверхности, во – вторых, решить вопрос о замещении водного заполнения затопленных тоннелей метрополитена твердеющими растворами или реагентами [523].



### 5.3.2 Мониторинг инженерно-геологического пространства в г. Сочи вперёд забоя

Проект трассы совмещенной дороги Адлер – горноклиматический курорт «Альпика - Сервис» предусматривал строительство в едином техническом коридоре железной и автомобильной дорог протяжённостью ~ 49 км, включающих в себя:

- 6 железнодорожных тоннелей протяжённостью 11096 м;
- 3 автодорожных тоннеля протяжённостью 6867.4 м;
- 3 сервисно – эвакуационные штольни протяжённостью 9833.4 м.

Мониторинг подземного пространства вперёд забоя в строящихся тоннелях в г. Сочи как инженерно-геологического пространства имел ряд характерных особенностей:

- ЭМИ СШП измерения производились при различных способах проходки тоннелей и штолен и, как следствие, с разной оперативностью в предоставлении прогноза развития геологической ситуации впереди забоя;

- на трассах подземных выработок отмечено большое разнообразие физико – механических характеристик грунтов от скальных высокой прочности до щебня и глин; сезонные колебания осадков, меняющих водоприток в выработках; резко изменяющиеся плотности горных пород;

- несоизмеримость общей площади забоя выработки с площадью, доступной для проведения ЭМИ СШП измерений (при проходке щитом, рис. 3.36).

В табл. 5.1 приведены основные способы проходки, определяющие состав ЭМИ СШП комплекса в части антенн и длину интервала обследования. Комбинированная проходка (комбайн «Eichhoff» и способ «Буро – взрывных работ» - БВР) позволяют использовать всю площадь забоя для проведения измерений, что делает прогноз более точным (рис. 5.13).

Таблица 5.1

№	Наименование тоннеля	Способ проходки	Общая длина тоннеля, м	Количество прогнозов/измерений
п/п	1	2	3	4
1	Ж/д тоннель №1	Комбин.	2484.34	56/327
2	А/д тоннель №1	Комбин.	2292.68	53/317
3	Штольня №1	Щит 1	2337.4	85/407
4	Ж/д тоннель №2	Комбин.	105	4/22
5	А/д тоннель №2	Комбин.	4134	89/537
6	Ж/д тоннель №3	Щит 2	4073.89	146/731
7	А/д тоннель №3	Щит 3	1372	43/232
8	Штольня №3	Щит 4	4073.8	148/728
9	Ж/д тоннель №4	БВР	448.71	12/67
10	Ж/д тоннель №5	Щит 5	2901	105/450
11	Штольня №5	Щит 6	2863.6	102/354
12	Ж/д тоннель №6	Комбин.	470.16	14/79
		Итого:	27556.58	857/4251



Рис. 5.13 – Пример проведения ЭМИ СШП измерений вперед забоя при проходке комбинированным способом

При проходке (см. столбец 2 табл. 5.1) задействованы следующие способы: комбинированный – комбайн + БВР; щит 1 – Lovat RME 232 SE; щит 2 - Lovat SELI RM 394 DS; щит 3 – Herrenknecht 13210 HART; щит 4 - Lovat SELI RM 243 DS; щит 5 – Herrenknecht 10690; щит 6 - Lovat RME 167 SE. Скорость проходки в среднем составляет 265÷300 м/месяц.

Основной практической задачей при идентификации подповерхностных структур является определение глубины залегания слоя [311] или объекта (см. гл. II, п. 2.3).

По результатам мониторинга [276, 524] подземного пространства вперед забоя ЗАО НПФ «Геодизонд» награждён 3 дипломами Тоннельной Ассоциации РФ (рис. 5.14) в 2010÷2012 гг.



Рис. 5.14 – Диплом Тоннельной Ассоциации

Применение горнопроходческого щита усложняет проведение ЭМИ СШП измерений на забое: максимальный размер технологического отверстия ( $40 \times 40 \text{ см}^2$ ) (рис. 3.36) определяет апертуру измерительных антенн и задаёт направление измерений, куда дается прогноз, при этом длина интервала зондирования не превышает 28 м (для комбайна и БВР – 42 м). Для проведения многоточечных измерений используется поворот щита.

#### **5.4 Применение метода ЭМИ СШП зондирования при разведке месторождений полезных ископаемых на примере горючих сланцев**

Горючий сланец (oil shale) - полезное ископаемое из группы твёрдых каустобиолитов, служащее сырьём для газификации<sup>8</sup>, а при химической переработке является продуктом для получения различных масел, моторного топлива, химических продуктов и горючего газа.

<sup>8</sup> Не путать с «гидроразрывом» пласта.

### 5.4.1 В полупустынях (Иордания)

В январе 2010 г. ЗАО НПФ «Геодизонд» выполнило обследование месторождения горючих сланцев методом ЭМИ СШП зондирования в центральной части Королевства Иордания (блок AUG22), на площади 12 кв. км, представляющей из себя труднопроходимую каменисто-кремнистую пустыню (Заказчик работ - ОАО «Incosin»).

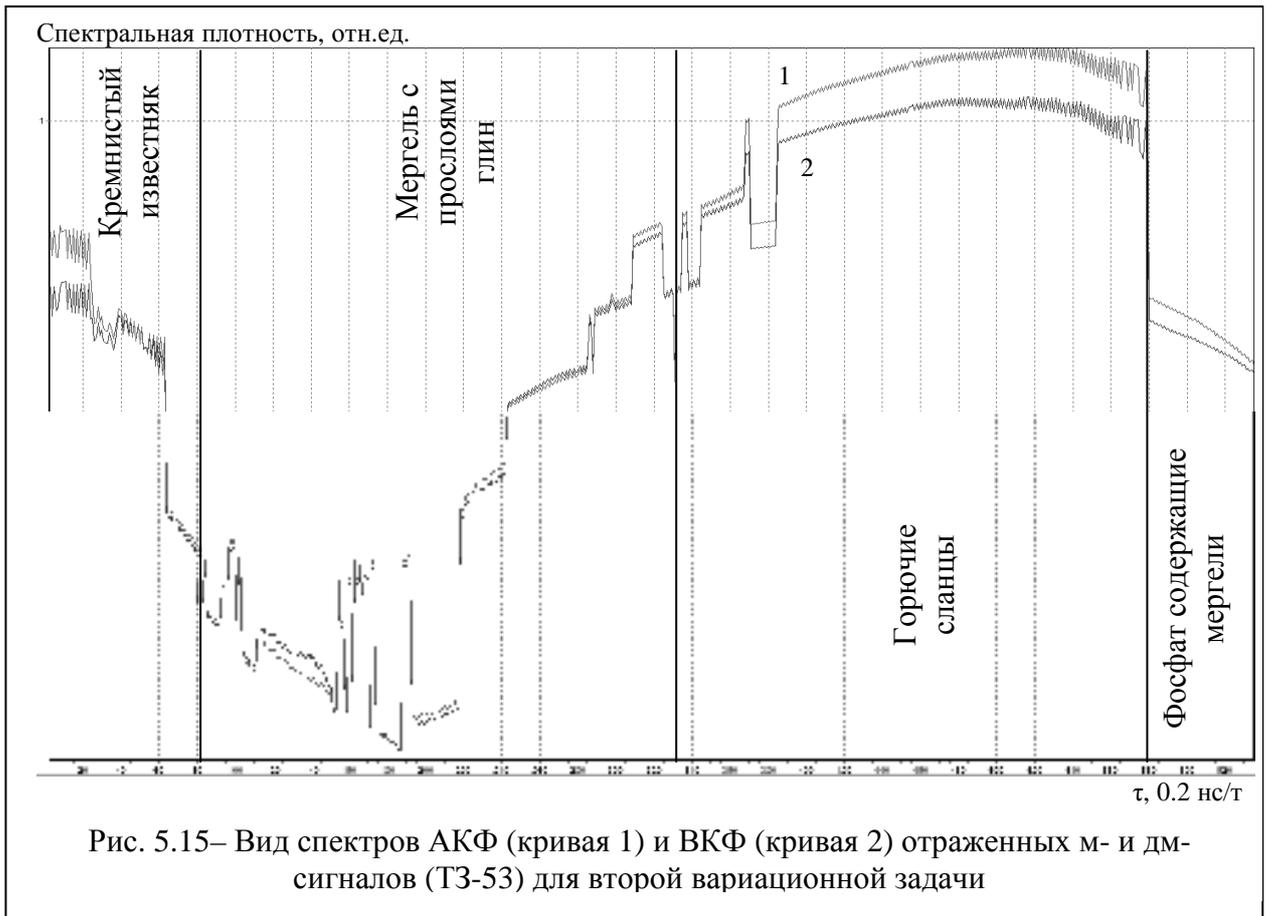
Основными задачами изысканий являлись:

- 1) определение положения слоя горючих сланцев в разрезах участка между разведочными скважинами, пробуренными ранее;
- 2) дифференциация сланцев на относительно “богатые” и “бедные” разности по содержанию в них сланцевого масла из сравнения (калибровки) результатов измерений с лабораторными данными, полученными в разведочных скважинах.

В указанном регионе при проведении работ на участке точки зондирования (ТЗ) располагались как вершины квадрата ~ 400 м x 400 м так, чтобы одна из вершин квадрата опиралась на разведочную скважину. Топопривязка точек к плану блока AUG22 согласовывалась с представителем Заказчика и выполнялась прибором GPSMAP 60CSx. В каждой ТЗ излучался ЭМИ СШП сигнал, и здесь же регистрировался отраженный сигнал на две антенны: метрового (м-) и дециметрового (дм-) радиочастотных диапазонов.

Для калибровки результатов ЭМИ СШП измерений комплекса использованы данные по кернам разведочных скважин №№ INAT-1 ÷ INAT-15, пробуренных на участке в 2009 г. компанией Mazen Rial Expert Decision Engineering Office (MRO). Геофизические измерения на площади участка AUG22 выполнены в 20 точках. Глубина исследований ~ 130 м.

На рис. 5.15 представлены спектры АКФ и ВКФ отраженных сигналов м- и дм- диапазонов для второй вариационной задачи (ТЗ-53).



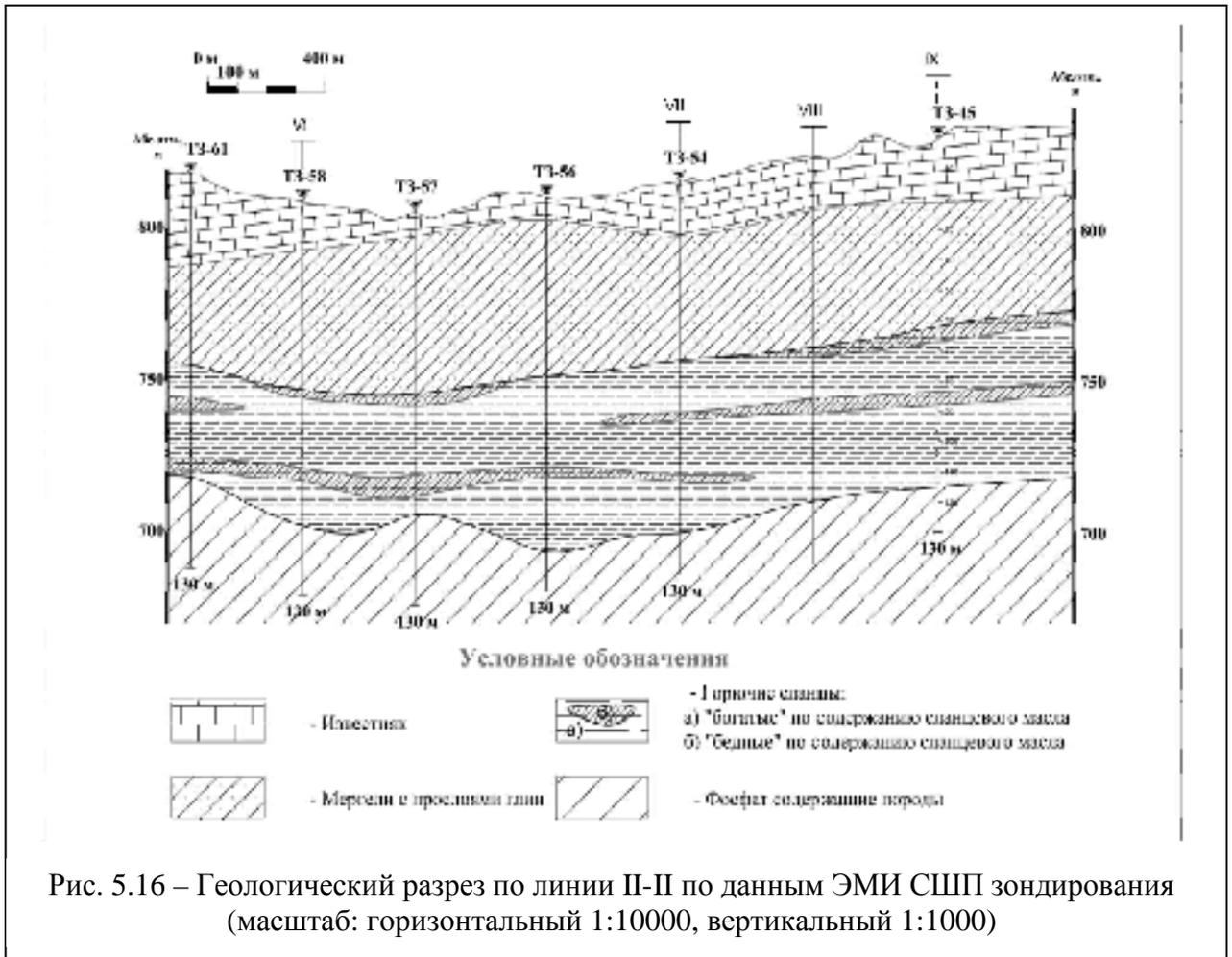
На основе предоставленных Заказчиком материалов разведочного бурения на участке AUG22 и калибровочных измерений на скважинах INAT-10, INAT-9 и INAT-7 были определены геофизические критерии для выявления и прослеживания в разрезах горного массива основных геологических слоев, а именно: известняков с прослоями мела; глинистых мергелей; горючих сланцев; мергелей фосфатсодержащих.

Поэлементная геологическая дифференциация разреза в каждой ТЗ производилась на основе амплитудных спектров сигналов м- и дм- диапазонов. В качестве модели принята многослойная среда.  $\sqrt{\epsilon_3} \approx 2.143$ .

На рис. 5.16 представлен геологический разрез по линии II-II по данным ЭМИ СШП зондирования, отражающий положение основных слоёв относительно друг друга и распределение “богатых” (6% сланцевого масла и выше) и ”бедных” (менее 6%) разностей в слое горючих сланцев.

В разрезах обследованного участка были установлены и прослежены на площади следующие геологические разности: в верхней части разреза -

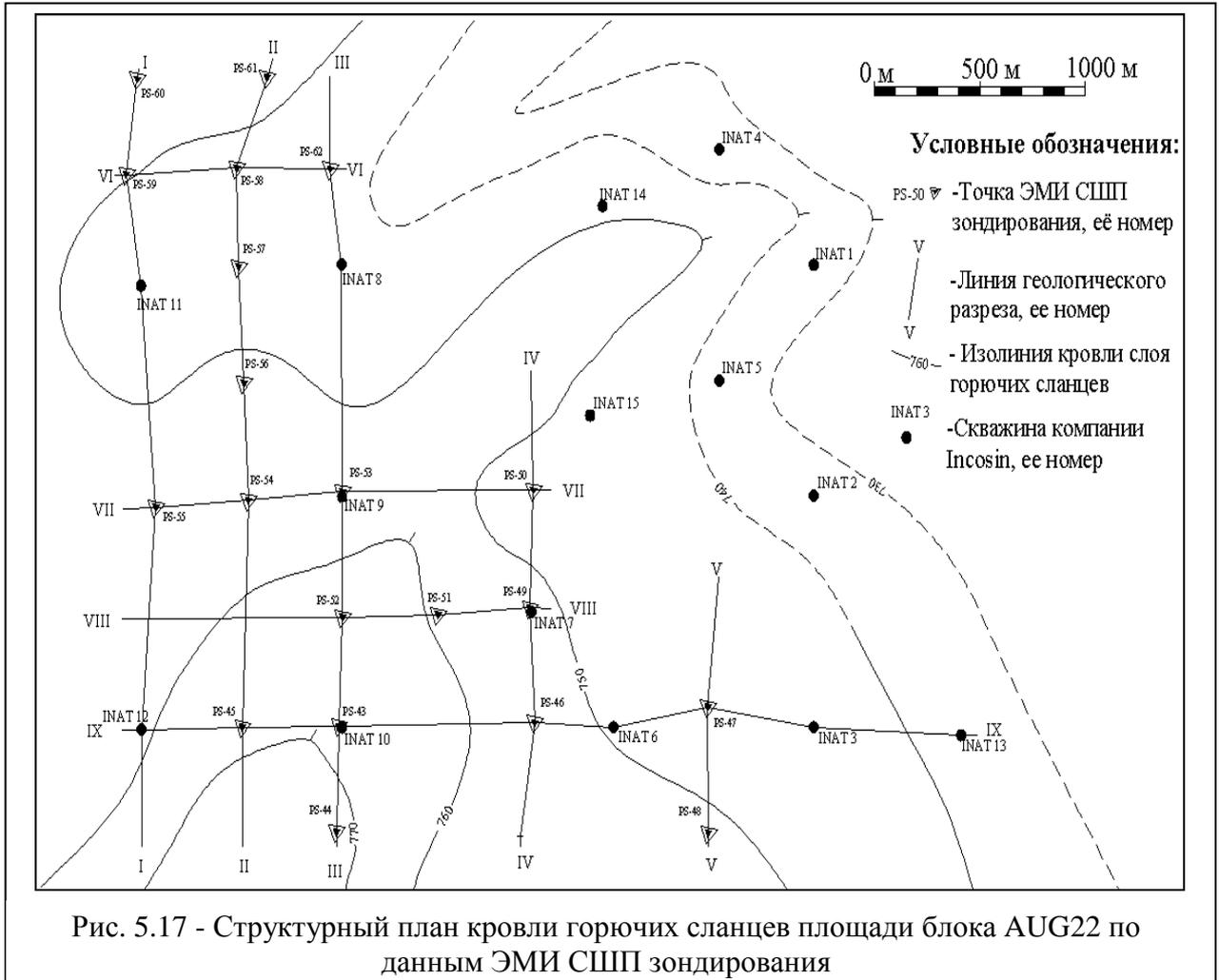
известняк с прослоями мела, мощность которых в пунктах геофизического зондирования колеблется от 8 м (ТЗ-57) до 30 м (ТЗ-61); ниже по разрезу - мергели глинистые, мощность которых варьируется от 33 м (ТЗ-61) до 52 м (ТЗ-57). Мергели глинистые «перекрывают» слой горючих сланцев, в основании которых залегают мергели фосфатсодержащие.



Таким образом, в результате геофизического обследования методом ЭМИ СШП зондирования участка месторождения горючих сланцев Block AUG22 в центральной части Иордании в разрезах горных пород уточнено положение слоя полезного ископаемого и прослежены границы основных геологических разностей до глубины исследования 137 м. Для месторождения Block AUG22 прогнозируется преобладание относительно “богатых” по содержанию сланцевого масла разностей [250].

По результатам проведенных измерений составлены геологические разрезы по линиям профилей I-I÷IX-IX. На рис. 5.17 представлен структурный план

кровли горючих сланцев, равномерно распределенных по всей обследованной площади участка. Мощность слоя изменяется от 28.5 м в скважине INAT-11 до 70.5 м (ТЗ-47). Абсолютные отметки слоя колеблются: кровли от 741.7 м (ТЗ-62) до 771.4 м (ТЗ-44); подошвы - от 672.6 м (ТЗ-47) до 722.8 м (ТЗ-44).

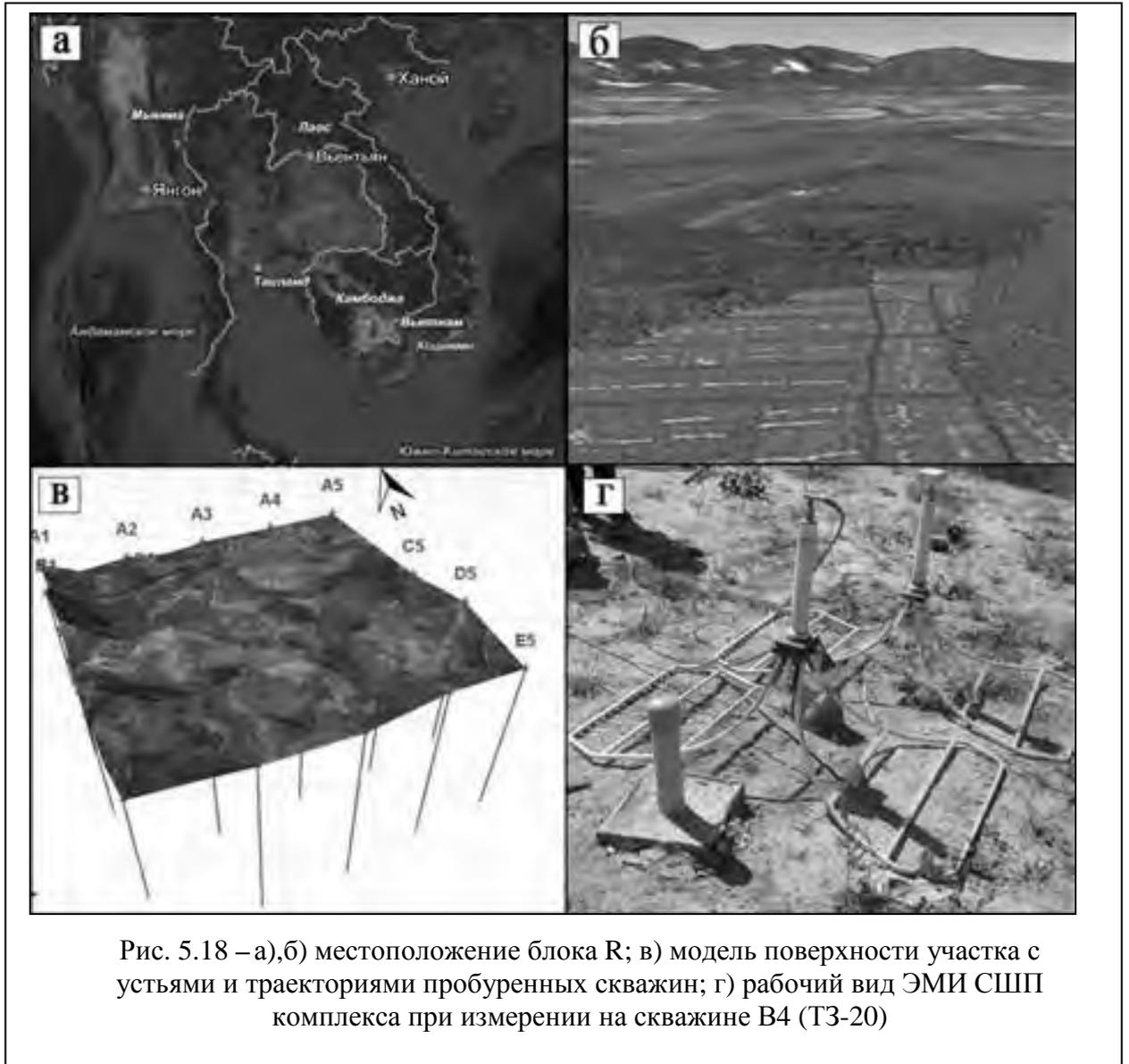


#### 5.4.2 В саванне (Мьянма)

В период с ноября 2011 г. по май 2012 г. ЗАО НПФ «Геодизонд» выполнило обследование месторождения горючих сланцев в юго-восточной части республики Союза Мьянмы.

Основными задачами являлись определение перспективных участков в пределах трёх бассейнов горючих сланцев (Merale, Melamat and Phalu basins), с целью дальнейших разведочных работ, а также дифференциация толщи горючих сланцев на «богатые» и «бедные» разности по содержанию в них сланцевого масла. Пример аналогичной работы [250].

Участок площадью около 10 кв. км, условно названный «блок R» (рис. 5.18а, 5.18б), представляет собой древнюю долину реки (озера), сложенную осадочными породами, сформированными в третичном периоде около 50÷52 млн. лет назад<sup>9</sup>.

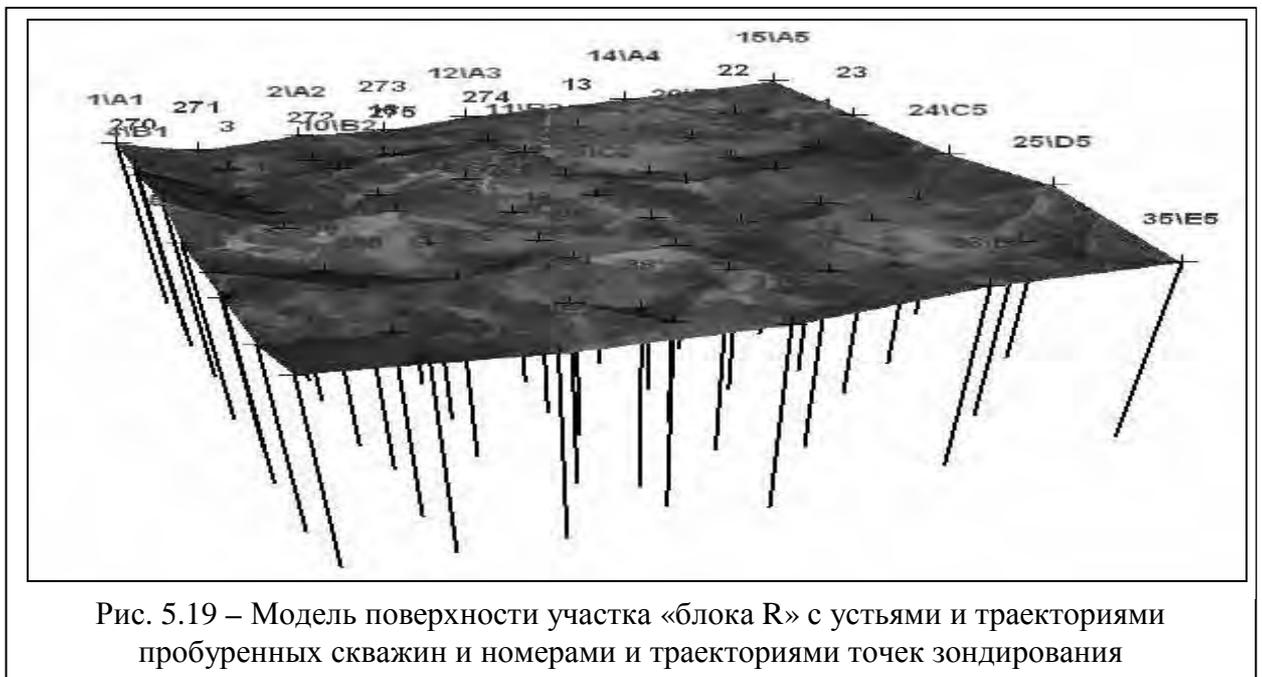


Обследованная территория участка окружена горными поднятиями триасового периода ( $\approx 250$  млн. лет назад), которые на протяжении многих миллионов лет изолировали среду от внешнего воздействия и сохраняли оседавший на дне озера биоматериал, послуживший генезису горючих сланцев

<sup>9</sup> Near the Myanmar (Burma) border [529]. It contains an estimated 18.7 billion tons of oil shale, which is estimated to yield 6.4 billion barrels (916 million tons) of shale oil. The gross heating value ranges from 287 to 3,700 kcal/kg, the moisture content ranges from 1 to 13 percent, and the sulfur content is about 1 percent. The deposit at Li is probably also a lamosite but the reserves are small—estimated at 15 million tons of oil shale yielding 12–41 gallons of shale oil per ton of rock (50–171 l/t) (Vanichseni and others, 1988, p. 515–516)

В настоящее время породы прикрыты чехлом четвертичных отложений мощностью до 2 м.

Исходя из материалов 24 пробуренных на участке разведочных скважин (рис. 5.18в), геологический разрез «блока R» представлен толщей горючих сланцев с прослоями «пустых» пород (песчаников, аргиллитов, глинистых сланцев и мергелей). Калибровка электромагнитного сигнала по данным скважин осуществлялась в непосредственной близости от них (рис. 5.18г). Геофизические измерения на площади блока выполнены в 66 точках зондирования с глубиной исследования  $\approx 170$  м (рис. 5.19, обозначение 35\E5 означает, что ТЗ № 35 выполнена на скважине E5), отношение масштабов поверхности ( $X, Y = M 1:1000$ ) к глубине ( $Z = M 1:100$ ) составляет 1:10.



Работы проводились в два этапа. На первом этапе пункты геофизических измерений располагались таким образом, чтобы шаг исследований вкуче с разведочными скважинами составлял квадрат  $\sim 400\text{м} \times 400\text{м}$ .

На втором этапе с целью сгущения разведочной сети выполнены измерения в западной и центральной части «блока R». В каждой точке зондирования излучался ЭМИ сигнал, и здесь же регистрировался отраженный сигнал на две приёмные антенны м-, дм- диапазонов (рис. 5.20, 5.21).

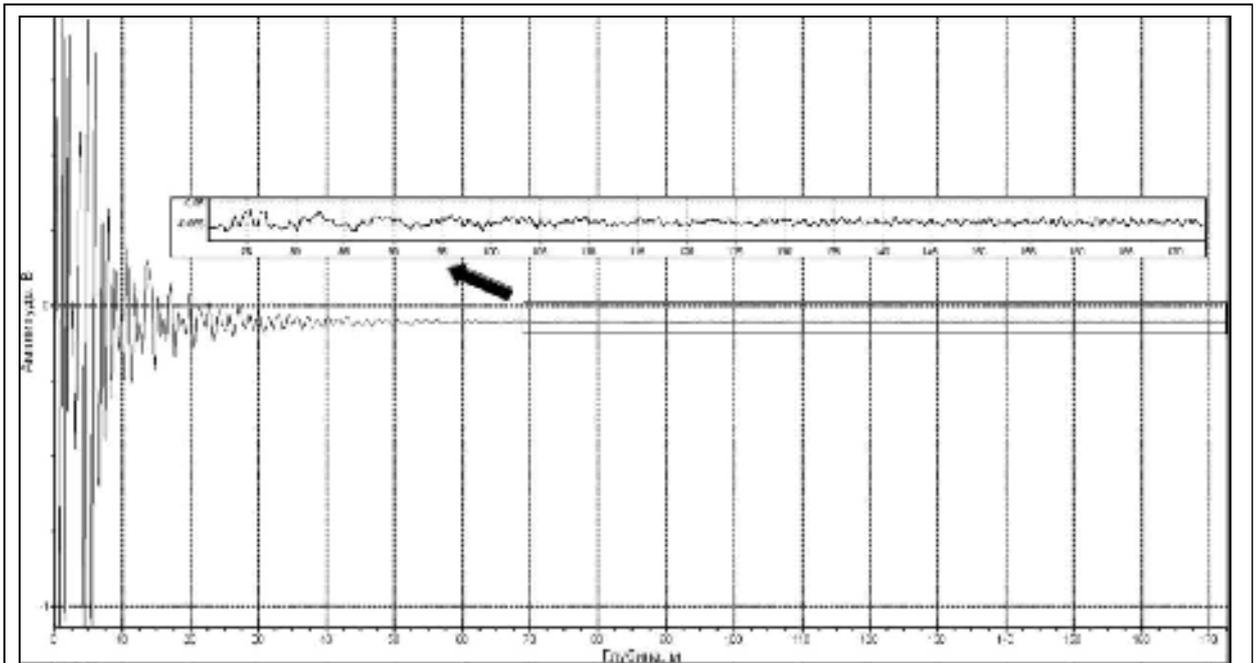


Рис. 5.20 – Отраженный сигнал м- диапазона длин волн, принятый в точке зондирования, выполненной на скважине В4 (ТЗ-20)

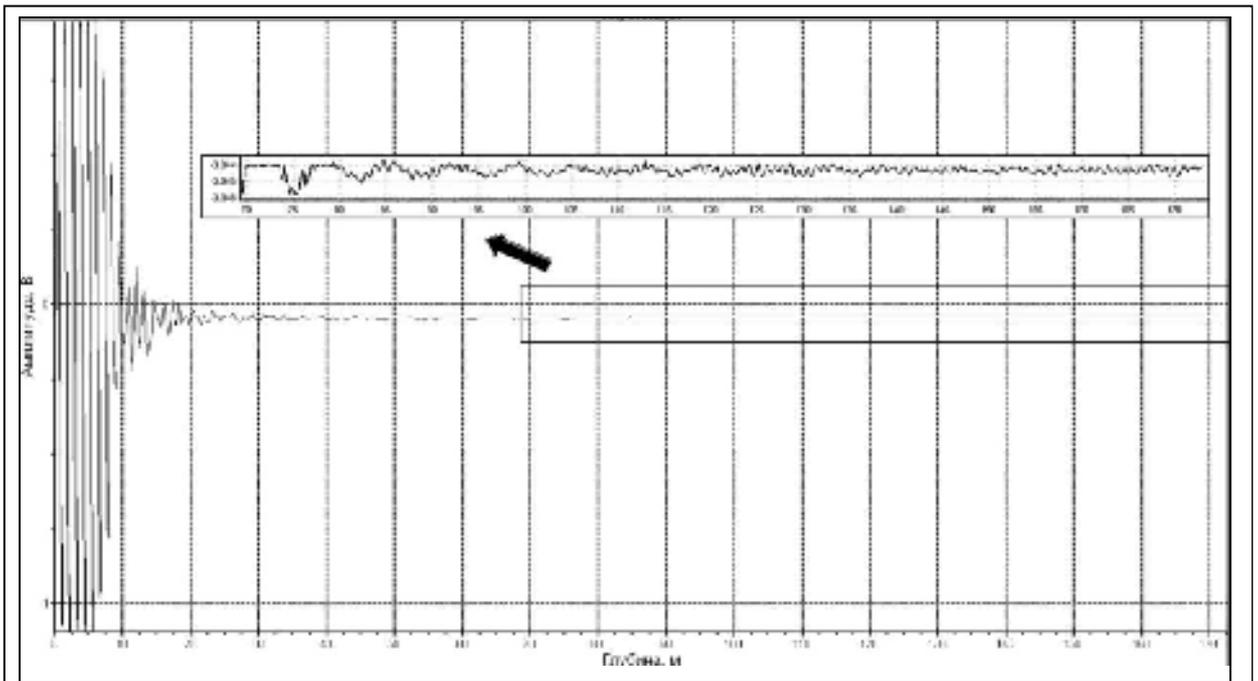
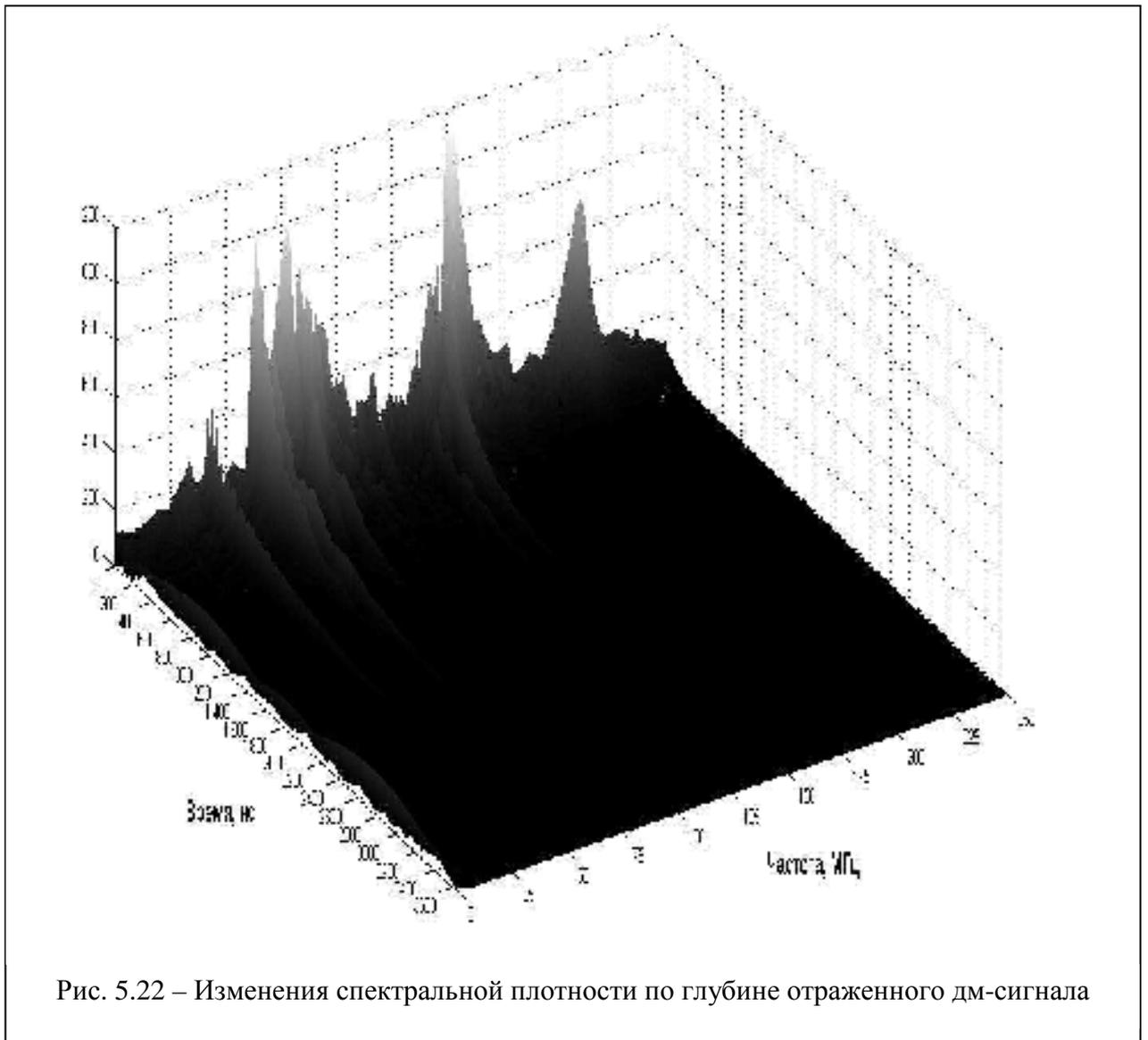


Рис. 5.21 – Отраженный сигнал дм- диапазона длины волны, принятый в точке зондирования, выполненной на скважине В4 (ТЗ-20)

Топопривязка точек к плану «блока R» согласовывалась с представителем Заказчика и выполнялась прибором GPSMAP 60CSx.

На рис. 5.22 приведены изменения спектральных плотностей ряда «звонящих» частот.



В результате решения обратной задачи для проведенных измерений были получены АКФ и ВКФ центрировано-нормированных ЭМИ СШП сигналов для каждой точки зондирования, которые отображают корреляционные связи сигналов в пределах различных геологических элементов и характеризуют изменения электродинамических и электрофизических свойств среды в радиочастотном диапазоне. Для калибровки результатов ЭМИ СШП измерений использованы данные по кернам разведочных скважин №№ А1 ÷ Е5, пробуренных на участке в апреле 2011 г. компанией Заказчика.

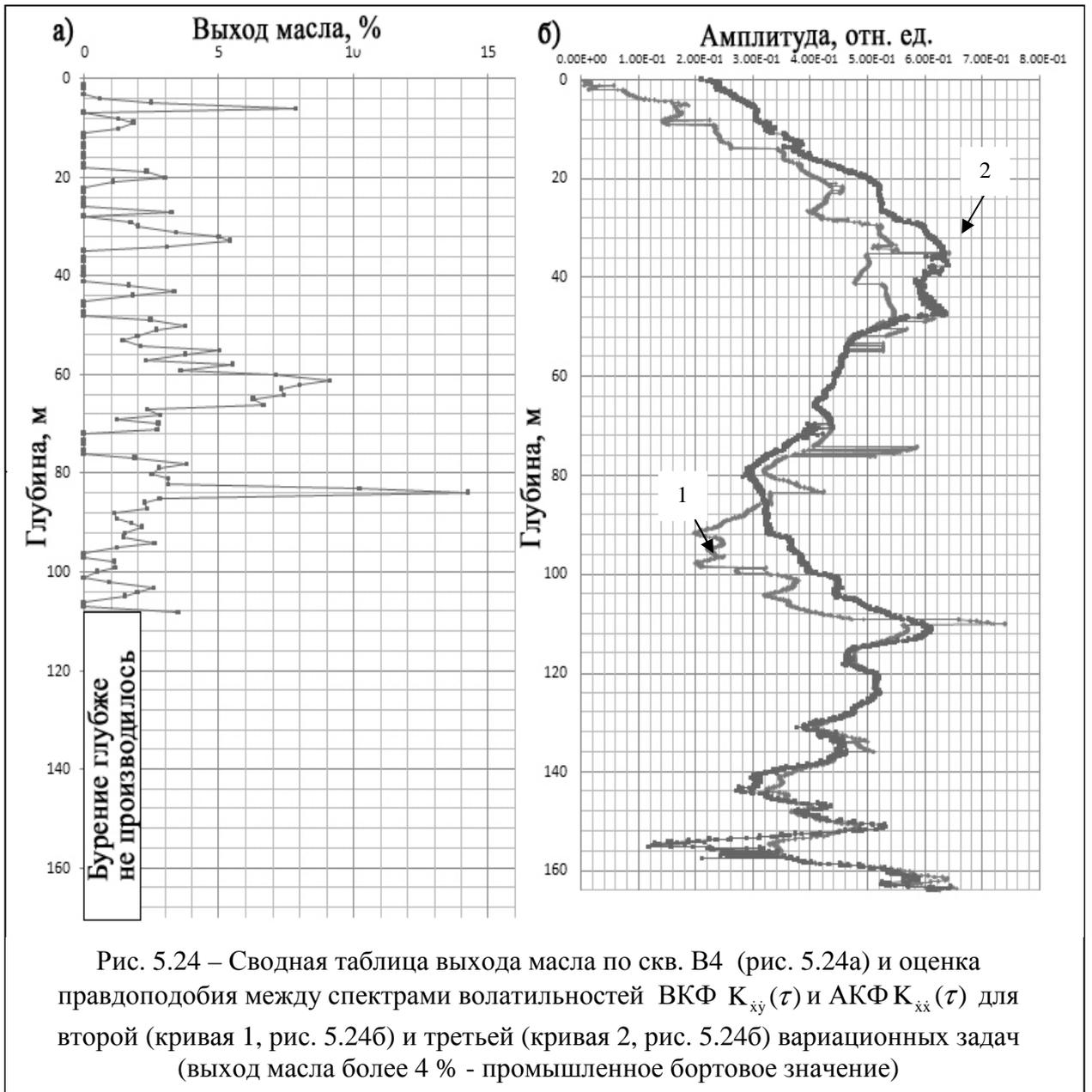
По результатам сопоставления материалов разведочных скважин, разбуренных на «блоке R» и калибровочных ЭМИ СШП измерений, выполненных на этих же скважинах, определены геофизические критерии для

выявления и прослеживания в разрезах горного массива «богатых» (по содержанию сланцевого масла) слоев и разработана методика расчета количества масла в породе по данным ЭМИ СШП зондирования. Пример соотношения результатов обработки данных ЭМИ СШП зондирования со значениями выхода сланцевого масла по глубине, полученными по скважине В4, представлен на рис. 5.24.

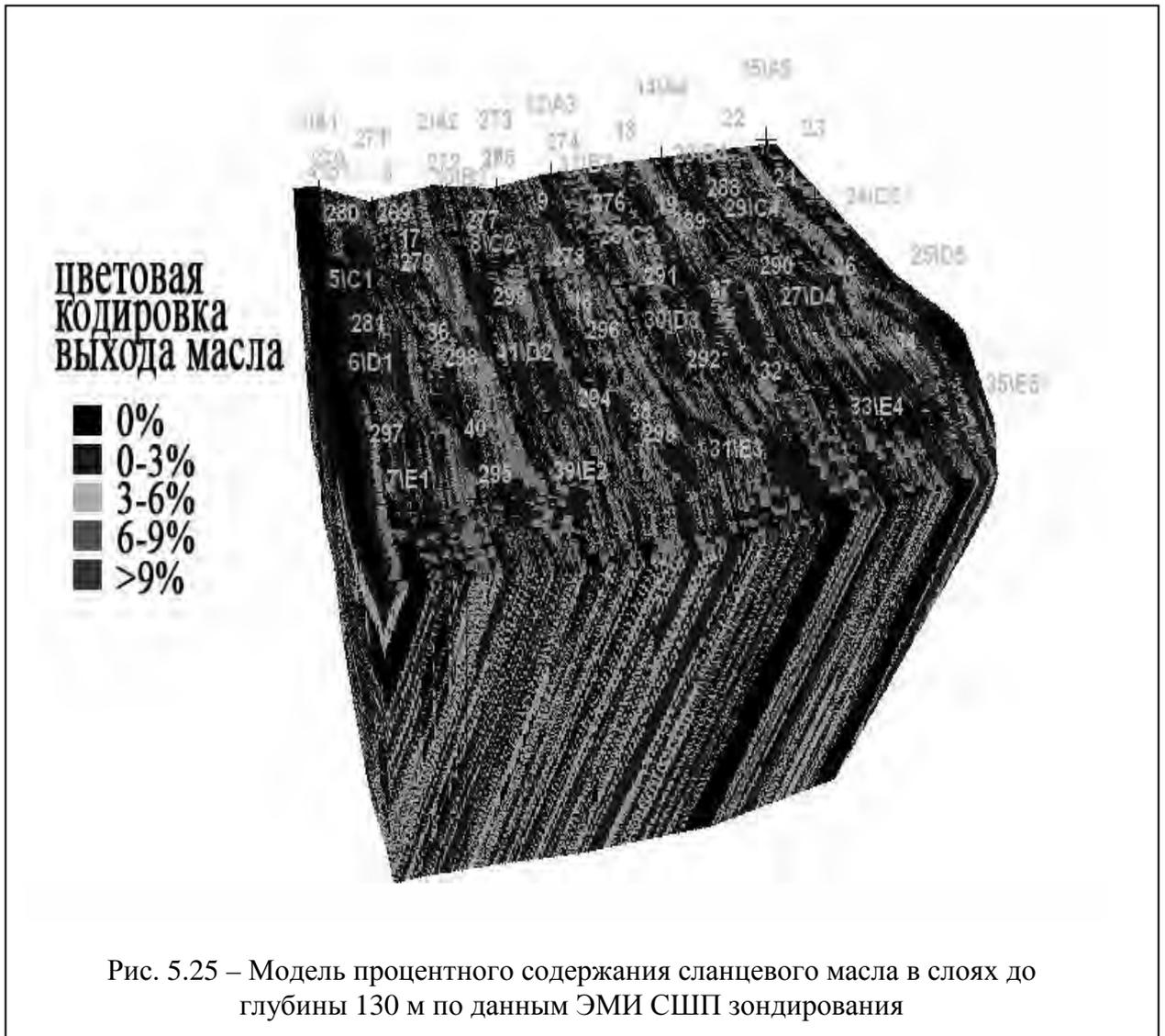


Из оценки правдоподобия между спектрами волатильностей ВКФ  $K_{xy}(\tau)$  и АКФ  $K_{xx}(\tau)$  для второй (кривая 1, рис. 5.24б) и третьей (кривая 2, рис. 5.24б) вариационных задач следует, что значения их подобия пропорциональны процентному содержанию сланцевого масла в породе.

При сравнении расчетного содержания масла по данным ЭМИ СШП зондирования и фактического содержания по данным технологического опробования скважин было установлено, что систематическая погрешность расчетного содержания масла составляет «минус» 0.95%.



Результатом обработки данных ЭМИ СШП зондирования, полученных на стадии разведки месторождения горючих сланцев на участке «блокаR», является база данных, включающая в себя информацию о прогнозируемом выходе сланцевого масла в %-ом отношении по каждому метру подповерхностного пространства в точках стояния антенн до глубины 170 м [525]. Для визуализации базы данных в программе MICROMINE по 3D координатам была построена модель с окраской значений выхода масла (рис. 5.25).



### 5.5 Применение надводного варианта комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования

Вопросы по инженерным изысканиям в море, как правило, решаются с помощью разведочного бурения. Однако работы по изысканиям под строительство Нижегородского метромоста показали, что даже на «спокойной» воде р. Оки в центре города возникают серьезные проблемы по установке буровой платформы на открытой воде.



Рис. 5.26 - Размещение приёмо – передающей части комплекса в резиновой лодке за бортом катера



Рис. 5.27 - Размещение приёмо – передающей части комплекса на плоту за бортом катера

Опыт работы ЗАО НПФ «Геодизонд» позволил решить задачи инженерных изысканий на р. Оке. Опыт работы с надводным комплексом ЭМИ СШП зондирования на русловой части большинства рек РФ (рис. 5.26, 5.27) в интересах прокладки нефте - и газопроводов (Прил. J), выполняемых методом наклонно - направленного бурения (ННБ), показал, что спектральный состав отражённого сигнала содержит признаки всех видов структурной, дипольно – релаксационной и ионно - релаксационной поляризаций.

Очевидно, что основной вклад в этом принадлежит глинам и илам как донным отложениям. Илы и глина в виде суспензии находятся, как правило, во взвешенном состоянии из-за волнения на воде.

## ВЫВОДЫ

1. Применение метода ЭМИ СШП зондирования как составляющей геотехнического мониторинга подземного пространства позволяет решать следующие задачи: определять количество геологических числа слоев, участвующих в строении разреза (литологическое расчленение разреза); прогнозировать геологическую и гидрогеологическую обстановку на строительных и добычных участках; контролировать качество инъекционного закрепления горного массива.
2. На примере результатов, полученных в Северомуйском тоннеле (БАМ), на «Размыве» (СПб), при зондировании вперёд забоев в автодорожных и железнодорожных тоннелях г. Сочи<sup>10</sup> показана эффективность применения данного комплекса.
3. В результате геофизического обследования методом ЭМИ СШП зондирования участка месторождения горючих сланцев Block AUG22 в центральной части Иордании уточнено положение в разрезах горных пород слоя полезного ископаемого – горючих сланцев, выявлены и прослежены на разрезах основные геологические разности до глубины 130 - 137 м от уровня дневной поверхности. Для месторождения характерно преобладание относительно “богатых” по содержанию сланцевого масла разностей. Аналогичные работе проведены в Мьянме. Отличительной особенностью месторождения в Иордании и месторождения в Мьянме является «природа» сланцев - в Иордании они являются продуктом морских отложений, в Мьянме – озёрных, что заметно сказывается на сигнале; в Иордании – горизонтально – слоистая структура, в Мьянме – субвертикальная.
4. В Прил. Е приведено заключение Заказчика на исследования по основной

---

<sup>10</sup> Согласно исполнительной документации по проходке и материалов опережающего бурения на участке ПК 384+82.5 – ПК 385+43.8 в кровле свода автодорожного тоннеля №3 вскрыты четвертичные отложения (в техническом отчете над щелью свода до 20 м коренных пород). Причем, по результатам геофизических изысканий (ЭМИ СШП), граница коренных пород указывалась правильно. Выдержка из письма № 15-10/1816 от ОАО «Минскметрпроект», датировано 24 сентября 2010 г.

нитке нефтепровода, проведенные в мае 2002 г.; в Прил. F приведен акт контрольного вскрытия обделки «Необслуживаемого технологического тоннеля «Грушовая - Шесхарис» с трубопроводами» (г. Новороссийск); в Прил. G – письмо по прогнозу вперед забоя строящегося двухпутного тоннеля между станциями «Южная» и «Проспект Славы» Петербургского метрополитена; в Прил. J показана эффективность применения надводного варианта комплекса ЭМИ СШП зондирования.

## VI ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЭМИ СШП ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Учитывая относительно низкую производительность наземных подповерхностных георадиолокаторов, в проекте Европейского Союза исследуются возможности воздушных РЛС для изучения подстилающей среды. На транспортном самолёте Skyvan (рис. 6.1) смонтирована двухдиапазонная (длины волн: 3 см и 65 см; 2 см и 53 см) РЛС с учётом эксплуатации в Африке (Анголе и Мозамбике). Самолёт отличается хорошими взлётно – посадочными характеристиками<sup>1</sup>. РЛС CARABAS-II с синтезированной апертурой работает в нижней части ВЧ - диапазона (20...90 МГц) с применением горизонтальной поляризации.

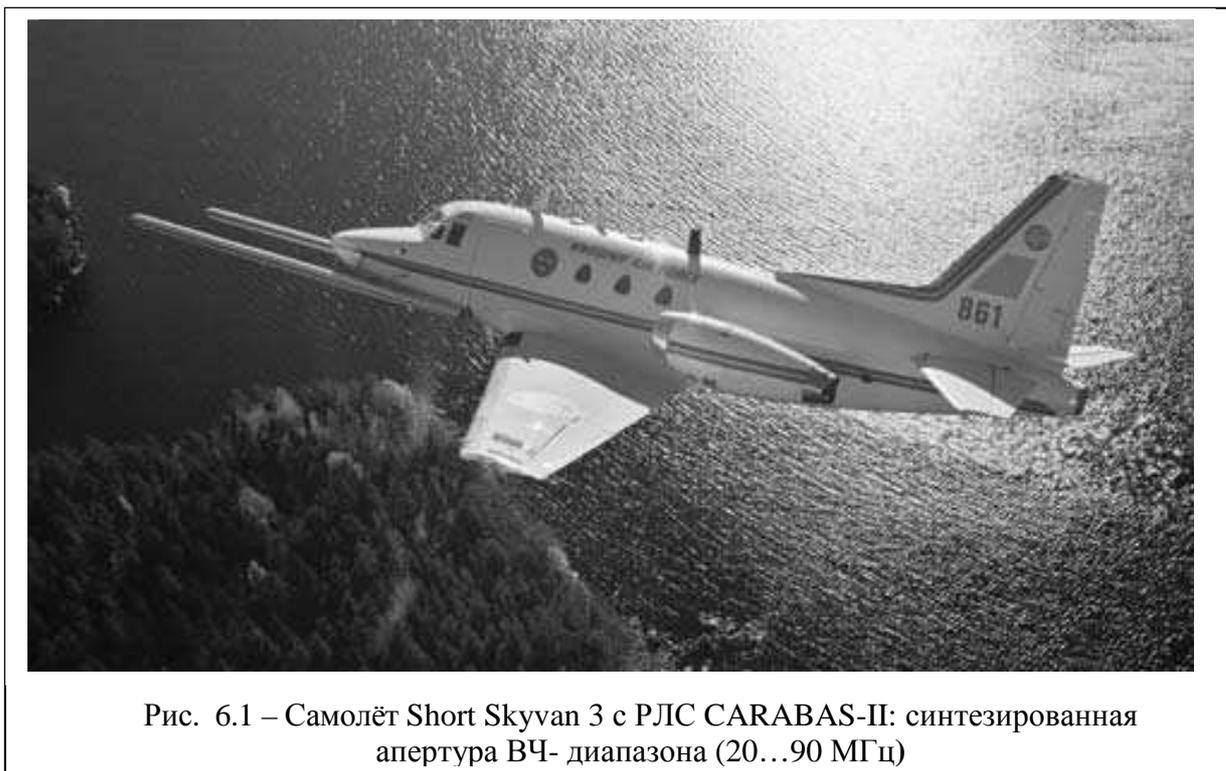


Рис. 6.1 – Самолёт Short Skyvan 3 с РЛС CARABAS-II: синтезированная апертура ВЧ- диапазона (20...90 МГц)

Используемый диапазон частот позволяет осуществлять обзор через

<sup>1</sup> Приведённые ниже характеристики соответствуют модификации Short Skyvan 3: Экипаж 2 человека; Пассажировместимость: 19 человек; Длина: 12,21 м; Размах крыла: 19,79 м; Высота: 4,6 м; Площадь крыла: 35,12 м<sup>2</sup>; Масса пустого: 3 356 кг; Нормальная взлётная масса: 4 797 кг; Максимальная взлётная масса: 5 670 кг; Силовая установка: 2 × ТВД Garrett AiResearch TPE-331-201; Мощность двигателей: 2 × 715 л.с.; Максимально допустимая скорость: 402 км/ч; Максимальная скорость: 324 км/ч; Крейсерская скорость: 315 км/ч; Скорость сваливания: 111 км/ч; Практическая дальность: 1 200 км.

определённый поверхностный слой земли. Наиболее дорогостоящей составляющей РЛС CARABAS-II является сигнальный процессор, работающий в реальном масштабе времени [104, 105]. Для невоенного применения в качестве авиационного носителя используется пилотируемый летательный аппарат, на борту которого находятся лётчик и оператор системы. Это сводит всю систему к автономному информационному комплексу.

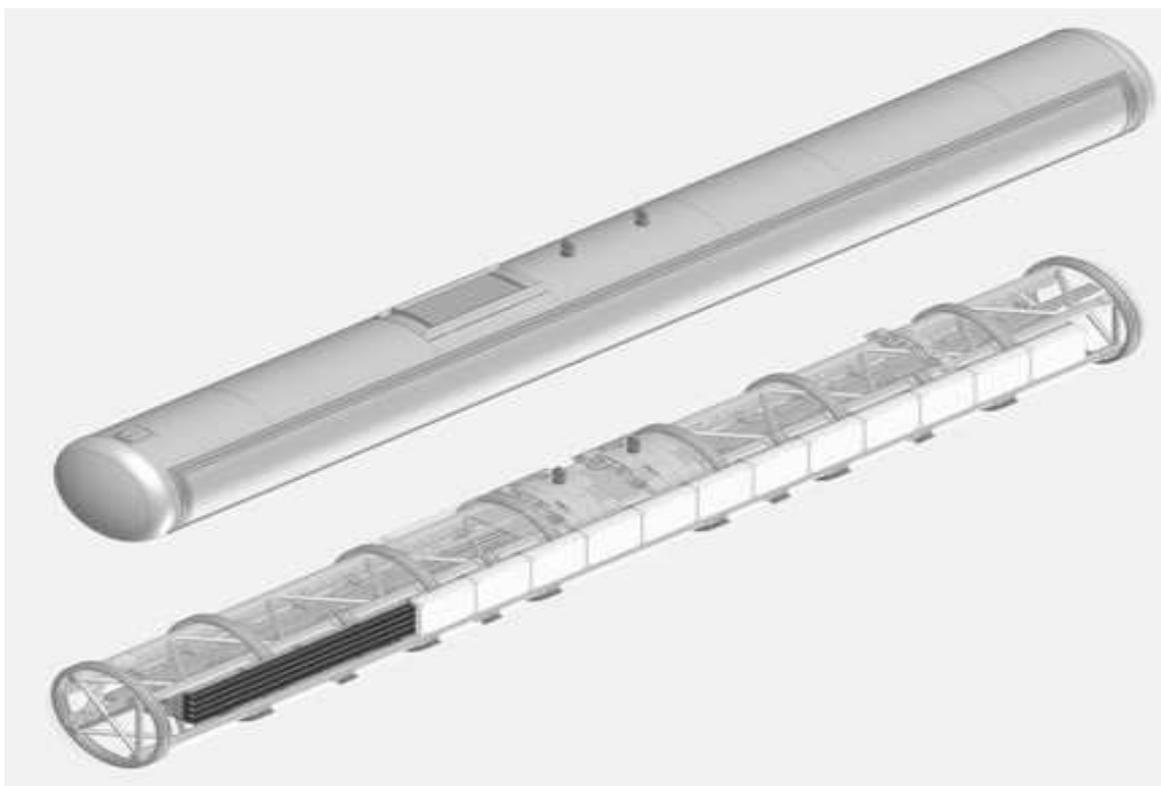


Рис. 6.2 – Антенна «POD», состоящая из 16 автономных блоков антенн Вивальди, или 40 рупоров типа «horn» с внутренней сеткой и крышкой с обтекателем

Ряд зарубежных исследовательских центров работают над применением длинноволновых радаров с синтезированной апертурой (РСА) [106-113]. Такой разработкой и испытаниями подповерхностных РСА в США занимается ряд известных научно - исследовательских организаций (Sandia National Laboratories, SRI International, US Army Research Laboratory). Например, многорежимная РСА высокого разрешения PAMIR (Phased Array Multifunctional Imaging Radar) имеет рабочую полосу сигнала 1820 МГц. РСА PAMIR формирует длинноволновые

радиолокационные изображения (РЛИ) с заявленной разрешающей способностью 0.1 м. В качестве антенной системы применена антенна «POD», состоящая из 16 автономных блоков антенн Вивальди, или 40 рупоров типа «horn» с внутренней сеткой и крышкой (рис. 6.2) размером 4.25×0.15 м и с суммарной импульсной мощностью излучения ~2 кВт, воздушное судно «Transall C-160» (рис. 6.3, 6.4) [114÷118]. В результате начального этапа экспериментальных исследований было установлено, что для интерпретации (дешифрирования) РЛИ требуются новые технологии, основанные на методе обработки change detection (обнаружение изменений) и учитывающие поляризационные особенности радиолокационного сигнала, проникающего в растительную среду. В ходе экспериментальных исследований было также установлено, что обнаруживать изменения на РЛИ следует в несколько проходов при различных углах визирования и на разных высотах, в результате чего можно создавать трехмерные изображения целей, используя технологию реконструкции 3D РЛИ [119, 120].



Рис. 6.3 – Антенна «POD» установленная под крылом грузового воздушного судна «Transall C-160»



С 1997 г. в ФГУП НИИТП целенаправленно ведётся последовательная систематическая деятельность по созданию ряда мобильных авиационных РСА серии (семейства) "Компакт", функционирующих в различных частотных диапазонах. Ключевым моментом в реализуемости идеи мобильных РСА явилось экспериментальное подтверждение возможности работы антенны РСА через штатный иллюминатор воздушного судна. Данное техническое решение было практически воплощено в РСА "Компакт-1" [121, 122].

### **6.1 Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования**

Бесспорной особенностью науки является повторяемость экспериментов, поэтому когда на современном технологическом уровне воспроизводятся результаты 50 летней давности – это вызывает особый интерес. Следует отметить и тот факт, что стремление к расширению возможностей по сбору и детализации

измерительной информации существовало всегда. Особое место в этом занимает авиация [295]<sup>2</sup>.

Необходимость самолётного варианта комплекса обусловлена низкой производительностью комплекса наземного базирования и важностью решения таких инженерно – геологических задач как площадные геофизические съёмки с труднодоступными участками (например, сегодня подлежат доразведке 189 месторождений сланцев на территории РФ, большинство из них в тундре); обследование пространства под дном реки на предмет наличия валунов и зон разуплотнения при прокладке нефтегазовых магистралей.

Опыт работы по созданию аэровоздушного (самолётного) варианта комплекса [296 - 298] показал, что сегодня есть все условия для решения этой задачи [314, 315]. Из летательных аппаратов малой авиации выбран малогабаритный самолет STOL-701 (рис. 6.5).

Основные причины такого выбора:

- разборность конструкции самолёта;
- короткая взлётно-посадочная полоса (ВПП) 25 ÷ 50 м;
- наличие малых скоростей – на скорости 60 км/час при скорости записи данных ЭМИ СШП зондирования в компьютер 5.9 измерений/сек, шаг (детальность) геофизической съёмки по траектории полёта составит 2.78 м (одно измерение через каждые 2.78 м);
- существующие варианты шасси самолёта – колёсные, лыжные, поплавковые.

Основной задачей по переводу комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования наземного базирования [278, 299] в воздушный оказалось обеспечение надёжной аэродинамики летательного аппарата вследствие выноса

---

<sup>2</sup> Один из самых знаменитых мировых «несостоявшихся» полётов - полёт А. Уэйта в Антарктиде (1957), когда радиовысотомер его самолёта начал показывать высоту 900 футов ещё до момента отрыва от взлётной полосы. Оказалось, что радиовысотомер, представлявший собой импульсный радиолокатор, фиксировал отражение от нижней границы ледника. Огромное значение, приданное этому факту в ходе операции «Высокий прыжок» (руководитель полярный исследователь Р. Э. Берд, США), позволило считать этот полёт днём рождения георадиолокации. В нашей стране аналогичные работы начались в 1976 г. с письма проф. М. И. Финкельштейна в Президиум АН СССР. В письме указывалось, что это послужит интересам гляциологии, получившийся эффект – новое направление в науке (по этим работам присуждена Гос. премия СССР, 1984).

антенн под крыло самолёта (передающей – слева от пилота, приёмных - справа). Антенны размещены в качестве «второго крыла» (рис. 6.6).

Изменение геометрии антенны и волнового сопротивления внешнего пространства потребовало пересчёта параметров микрополосковой антенны и отдельной аттестации новых антенн «по воздуху» ( $\rho \approx 377$  Ом, КСВН  $\leq 2.25$  в полосе частот 0.3 – 650 МГц; рис. 6.7).

### 6.1.1 Отладка (юстировка) бортовой аппаратуры

Поскольку трасса распространения ЭМИ СШП сигнала меняется по отношению к трассе, характерной для комплекса наземного базирования (воздух – граница воздух/среда - подстилающая среда – границы в среде - граница среда/воздух - воздух), принципиальным моментом является получение сравнительных характеристик сигналов, принимаемых наземными антеннами – обнаружение сигнала из подстилающей среды при излучении его с борта самолёта (рис. 6.8, 6.9).

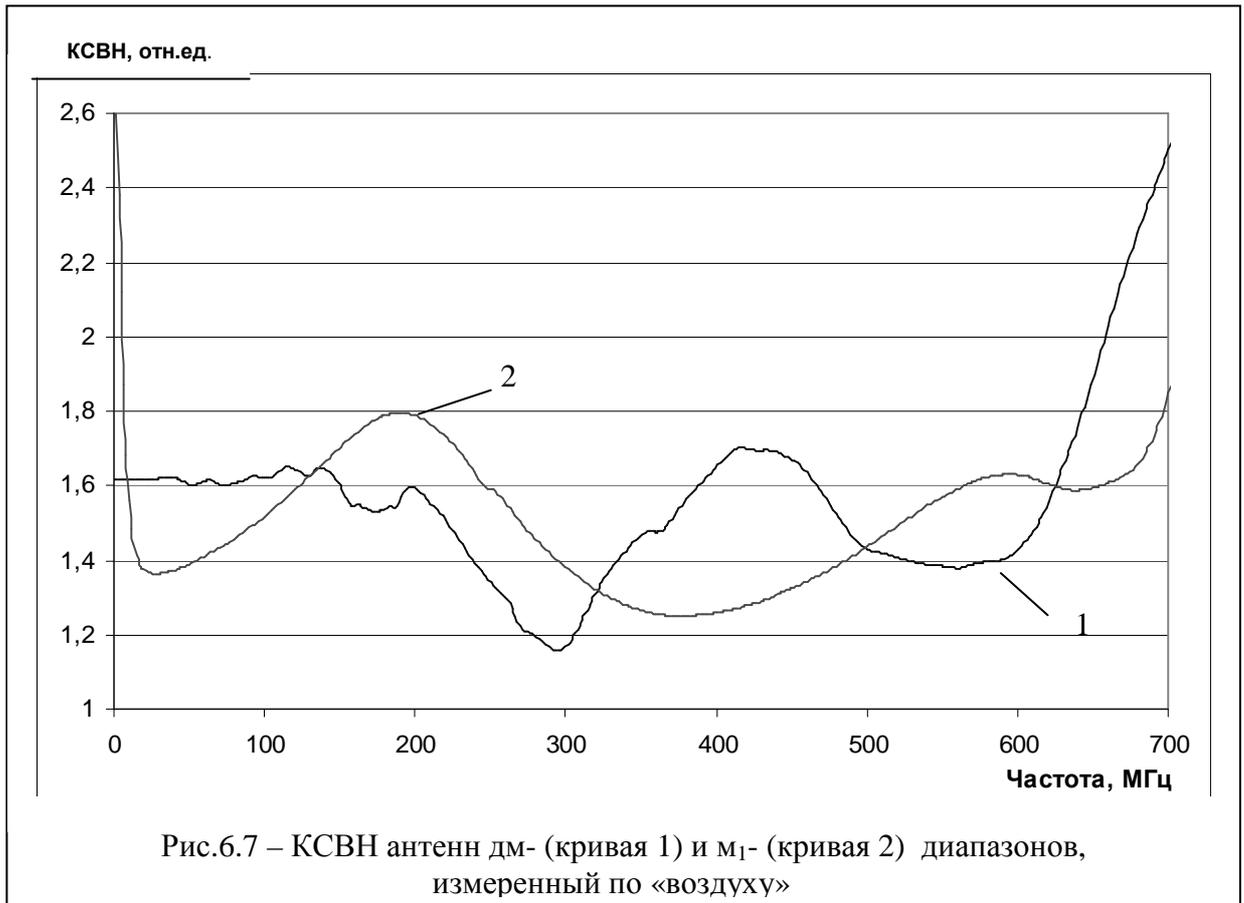
Для решения этой задачи передающее устройство на базе ДДРВ генератора с передающей антенной разместили на борту STOL – 701, приёмная часть комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования - приёмник (стробоскопический осциллограф) с приёмными антеннами м- и дм- диапазонов размещены на земле, антенны направлены в подстилающую среду. Сигнал с выхода АЦП приёмника непрерывно пишется в компьютер в относительных единицах. В отсутствии сигнала пишется шумовая дорожка. Факт появления сигнала из подстилающей среды, сравнение времени и координат самолётного GPS со временем появления сигнала на компьютере является характерным признаком отладки аппаратуры – обнаружения сигнала (рис. 6.9). На рис.6.10 показано изменение амплитуды сигнала 2 соседних измерений м<sub>1</sub>- диапазона при пролёте самолёта 4 м (сигналы 1, 2) вдоль приёмных антенн, расположенных на взлётно – посадочной полосе (ВПП), на рис.6.11 показано изменение спектров амплитуд сигналов этих же измерений.



Рис.6.5 - Самолет STOL-701, используемый как летательный аппарат для комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования. Технические характеристики STOL-701: размах крыла – 8.23 м; площадь крыла – 11.33 м<sup>2</sup>; вес (пустой) – 209 кг; дальность – 465 км; крейсерская скорость - 140 км / ч; скорость сваливания – 46.5 км / ч



Рис.6.6 - Размещение антенны под крылом самолета STOL-701. Крепящие антенну металлические тяги электрически развязаны с приёмной и передающей поверхностями антенны



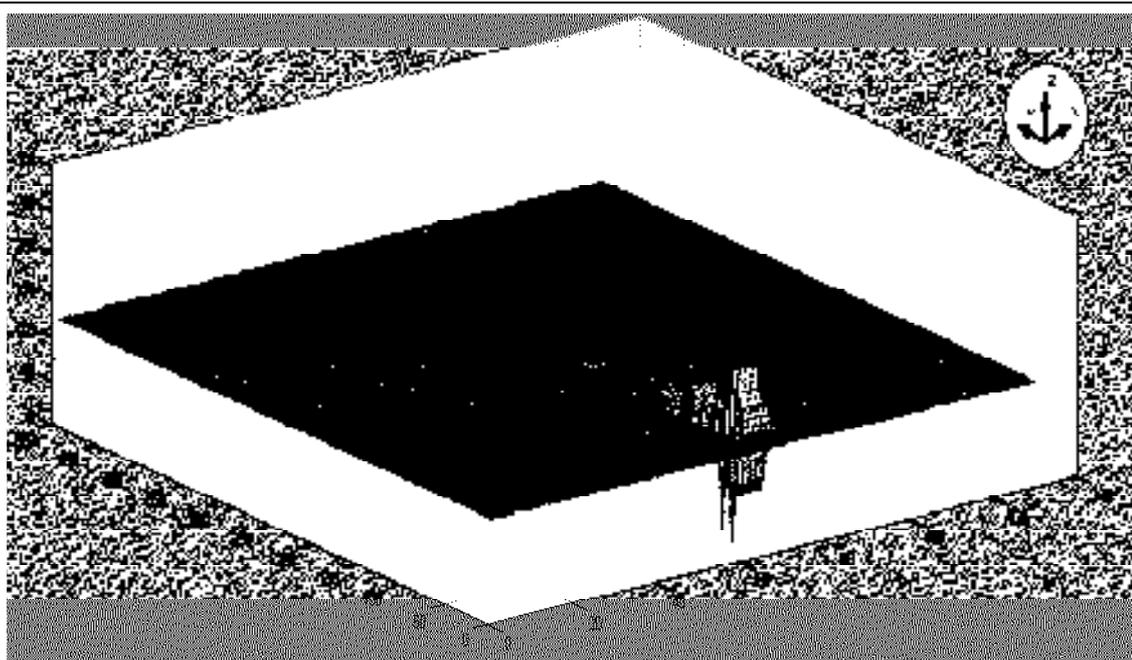


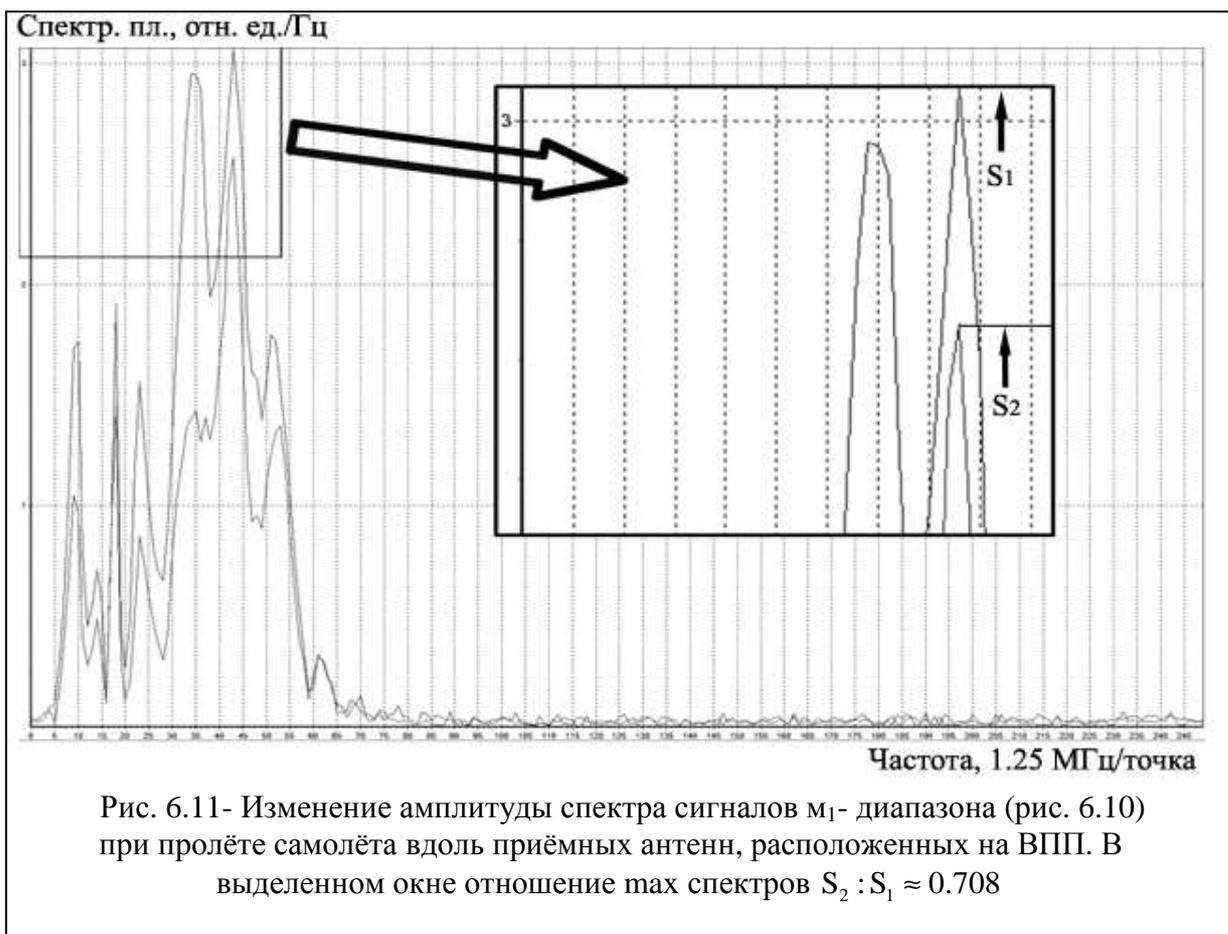
Рис.6.9 - Появление сигналов, принимаемых наземной антенной м - диапазона комплекса ЭМИ СШП зондирования при юстировке бортовой аппаратуры. Передающая часть – на борту самолёта, приёмная на земле («смотрит» в землю). Тёмным цветом показана «шумовая» дорожка в отсутствии сигнала; «волной» в глубину- появление сигнала при подлёте; «шумовая» дорожка - при пролёте (оси: X - ВПП, детальность по X ~ 4 м; Y – глубина, детальность по Y ~ 4 см; Z – амплитуда сигнала, отн. ед.)

Ампл., отн.ед.



Время, 0.8 нс/точка

Рис.6.10 - Поведение амплитуды сигнала 2 соседних измерений м<sub>1</sub>- диапазона при пролёте самолёта 4 м (сигналы 1, 2) вдоль приёмных антенн, расположенных на ВПП

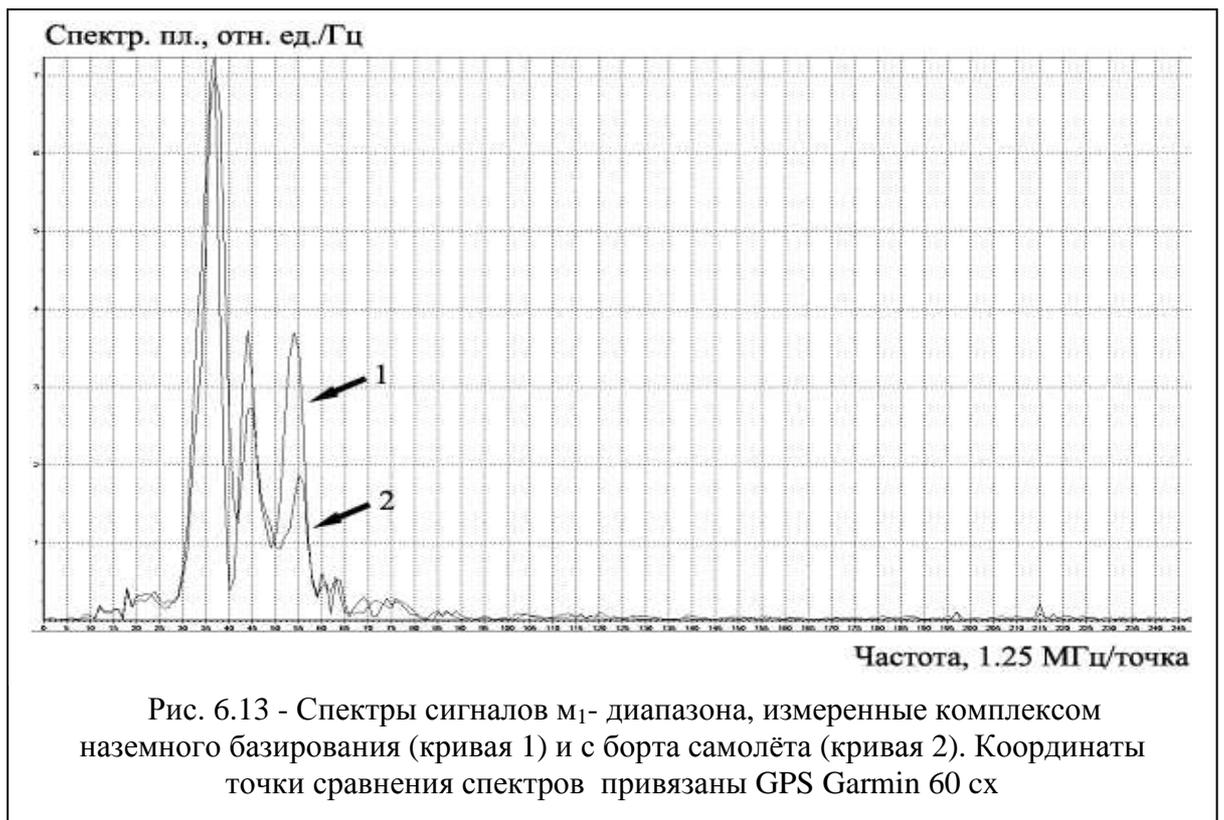


### 6.1.2 Сравнение результатов наземных и воздушных ЭМИ СШП измерений

Перед проведением измерений с борта самолёта по трассе полёта было проведено 13 наземных измерений методом ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды. Результаты наземных измерений приняты за эталонные, при этом глубина зондирования подстилающей среды составила 28 м, по данным этих измерений подстилающая среда трёхслойная (суглинок, валуны, песчаник, рис. 6.12). Соответствие спектров сигналов самолётного и наземного комплексов представлено на рис. 6.13.

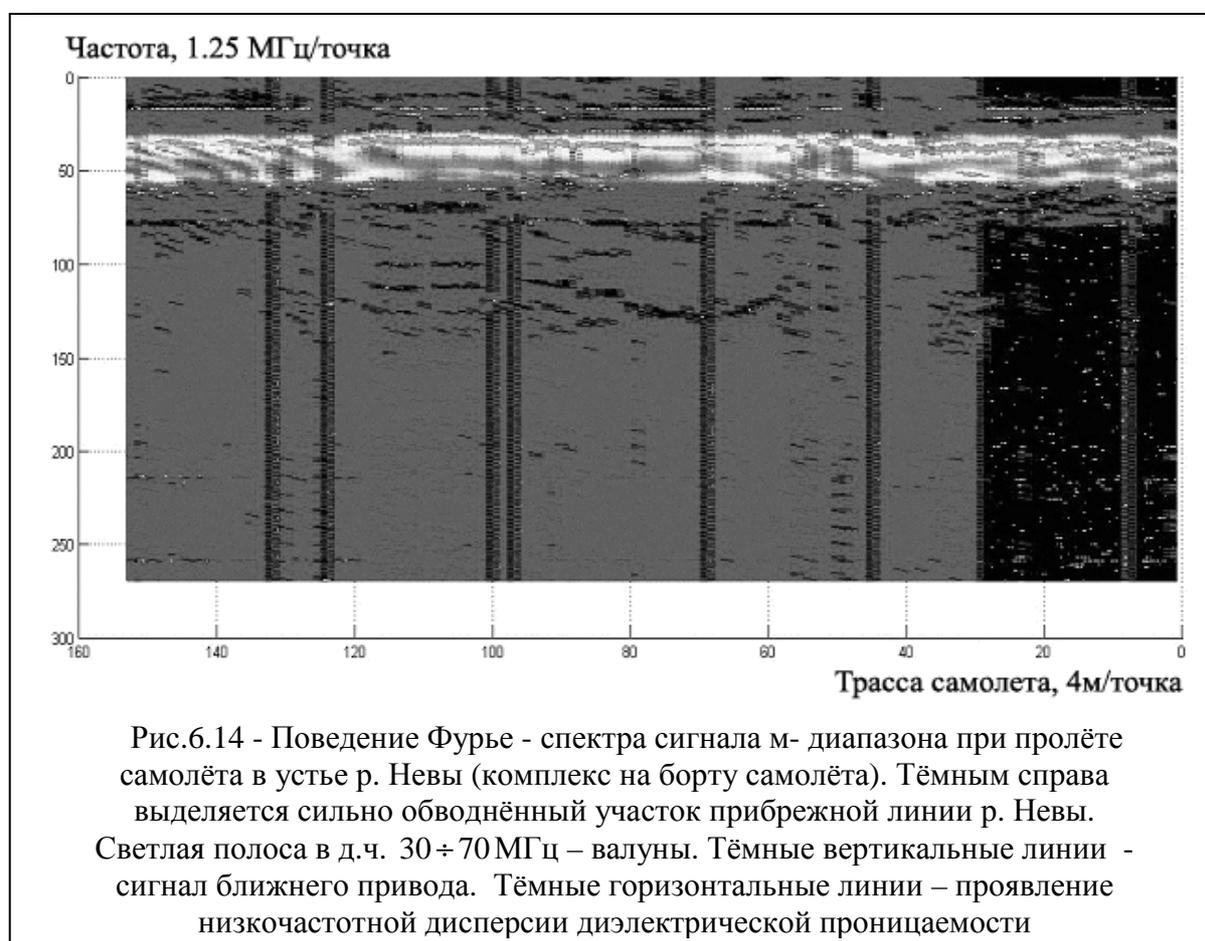


Рис.6.12 – Вид карьера на берегу р. Невы



### 6.1.3 Низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости влажных грунтов (площадная оценка)

Для проверки эффективности применения самолётных ЭМИ СШП измерений взято подтверждение наличия частотной дисперсии диэлектрической проницаемости у влажного грунта на прибрежных участках р. Невы, отличающихся большой влажностью грунтов и обилием в грунте валунов. Совершено 4 полёта [314, 315]. Проявляющаяся в отражённом сигнале низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости подстилающей среды визуализирована с помощью программного обеспечения (ПО) Matlab Version 7.9.0.529 (использовано 9 градаций яркости) и представлена Фурье - спектром на рис. 6.14. Наличие такой дисперсии подтверждено лабораторными измерениями [311,312].



На рис. 6.12 представлен вид карьера, предназначенного для добычи песка и гравия. Полёты горизонтальные. Скорость записи на компьютер 5.9 изм./сек. Высота полёта 50 м. Скорость самолёта 90 км/ч. Все приведенные выше

измерения относятся к дальней зоне ( $R > 2D^2 / \lambda$ ,  $R$  – расстояние,  $D$  – раскрыв антенны,  $\lambda$  – длина волны).

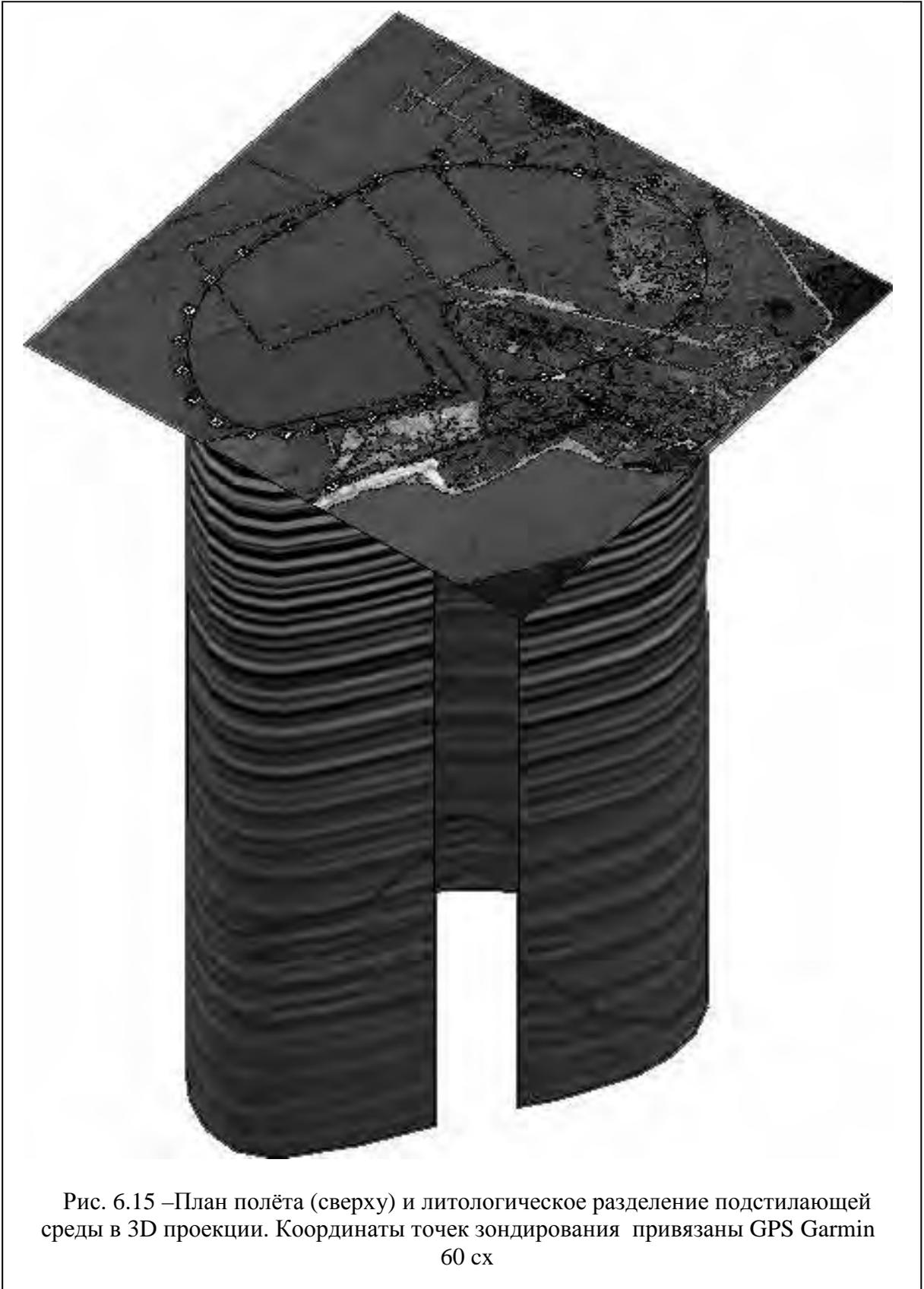


Рис. 6.15 – План полёта (сверху) и литологическое разделение подстилающей среды в 3D проекции. Координаты точек зондирования привязаны GPS Garmin 60 сх

Предложенный самолётный вариант комплекса ЭМИ СШП зондирования открывает широкие возможности по площадной съёмке инженерно – геологического строения подстилающей среды.

## **6.2 Подводный вариант комплекса**

В последнее время серьёзным аспектом территориального градостроительства являются намывные территории. Лидеры в этом направлении - Япония, Нидерланды, ОАЭ. Самыми известными в наши дни являются проекты по намыву острова Пальма Джумейра в Дубаи и островов в Японском море. Японские острова Юмэносима и Огисима были намыты с использованием технологии переработанного мусора.

Сегодня в Петербурге реализуется проект "Морской фасад" на площади 466 га и проект намывных территорий на площади 470 га планируется под Сестрорецком. На намывной территории Васильевского острова планируется построить 4 млн. кв. м недвижимости, в Сестрорецке предполагается возведение 3,5 млн. кв.м недвижимости, из них 2 млн. кв.м жилья.

Вопросы по инженерным изысканиям в море, как правило, решаются с помощью разведочного бурения.

В Финском заливе железо-марганцевые конкреции обнаружены на глубине 25-30 м. Большие скопления железо-марганцевых конкреций специалисты ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского обнаружили в восточной части Финского залива. Запасы железомарганцевых конкреций в Финском заливе ~ 6÷7 млн т.

Для изучения электрофизических свойств морского и речного дна на базе комплекса ЭМИ СШП зондирования создан его подводный вариант [527].

### **6.2.1 Отладка (юстировка) аппаратуры подводного варианта комплекса**

Поскольку трасса распространения ЭМИ СШП сигнала меняется по отношению к трассе, характерной для комплекса наземного базирования, а именно: вода → глинисто – илистая суспензия → граница суспензия/дно →

подстилающая среда → границы в среде - граница дно/ суспензия → вода, принципиальным моментом является получение сравнительных характеристик сигналов, принимаемых разнесёнными приёмной и передающей антеннами.

Для решения этой задачи передающее устройство на базе ДДРВ генератора с передающей антенной разместили на одном борту бассейна (рис. 6.16), приёмная часть комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования - приёмник (стробоскопический осциллограф) с приёмными антеннами м-, дм- диапазонов длин волн размещены на другом борту. Передающая и приёмные антенны направлены друг на друга. Факт появления сигнала в воде является характерным моментом, подтверждающим функционирование аппаратуры (рис. 6.19).



Рис.6.16 - Испытания генератора и антенны в бассейне. Крепящие антенну металлические тяги электрически развязаны с передающими поверхностями антенны

Сигнал с выхода АЦП приёмника непрерывно пишется в компьютер в относительных единицах. В отсутствии сигнала пишется шумовая дорожка (рис. 6.18).



Рис.6.17 – Вид записываемого сигнала м-, дм- диапазонов длин волн на экране приёмника. Испытания комплекса в бассейне



Рис.6.18 - Испытания комплекса в бассейне. Справа приёмник м-, дм- диапазонов длин волн, слева – компьютер с записью сигнала

Внешний вид приёмо – передающей части комплекса после работ по гидроизоляции представлен на рис. 6.19, на переднем плане приёмная антенна дм-диапазона, далее генераторная антенна с ДДРВ генератором (сверху, квадратная коробка), на заднем плане - приёмная антенна м-диапазона. Приёмные антенны относятся к разряду монопольных [144], передающая – к микрополосковым [419].



Рис.6.19 – Вид приёмо – передающей части комплекса после работ по гидроизоляции. На переднем плане приёмная антенна дм-диапазона, далее генераторная антенна с ДДРВ генератором (сверху), на заднем плане - приёмная антенна м-диапазона

На рис.6.20 представлен внешний вид приёмника и РК-кабель на заданную глубину (~24м).



Рис.6.20 – Приёмная часть подводного комплекса. Испытания на глубине 3 м

### 6.2.2 Подводные работы

На рис. 6.21 представлен вид приемо – передающей части комплекса сверху при погружении на глубину ~ 1.5 м. Борта комплекса уравниваются грузами весом 0.5 кг каждый, обеспечивающими погружение без переворачивания.

На рис.6.22 показаны координаты выполняемых работ, место является одним из самых глубоководных на Финском заливе (глубина 24÷32 м) и отличается наличием разведанной железомарганцевой конкреции.

На рис.6.25 представлены результаты измерений. Данные измерения принято относить к сверхточным: амплитуда сигнала лежит в пределах  $\pm 3$  В; число измеренных значений в каждом канале  $\geq 5000$ ; шаг по времени (глубине)  $\tau = 0.2 \cdot 10^{-9}$  с; число осреднений для каждого значения амплитуды сигнала  $N = 512$ .

На рис. 6.24 представлены результаты их обработки [422] — МСКО Йовица – Джексона для I и II вариационных задач.



Рис.6.21 – Вид приёмо – передающей части комплекса на глубине 1.5 м. На переднем плане ДДРВ генератор (сверху)

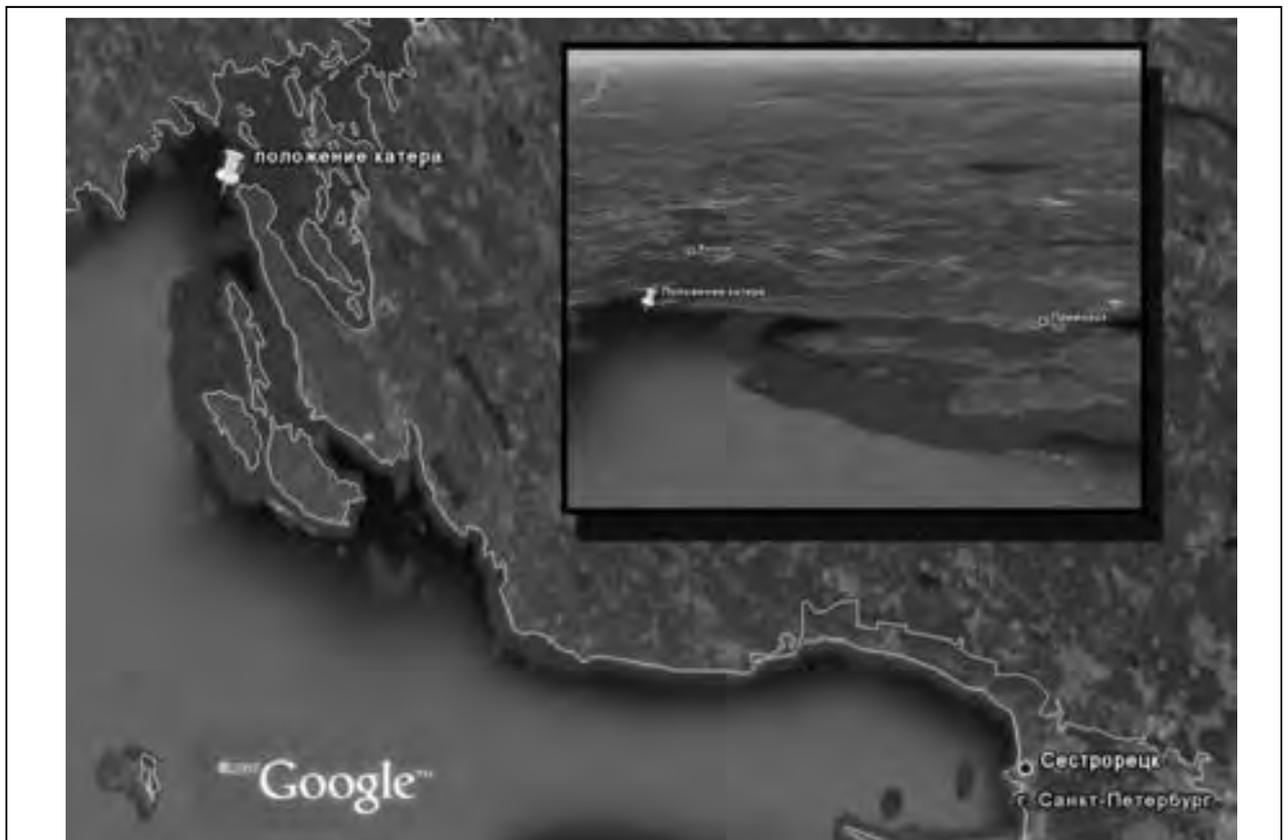


Рис.6.22 – Координаты выполняемых работ (30 км по заливу от г. Приозёрск)

Амплитуда, В

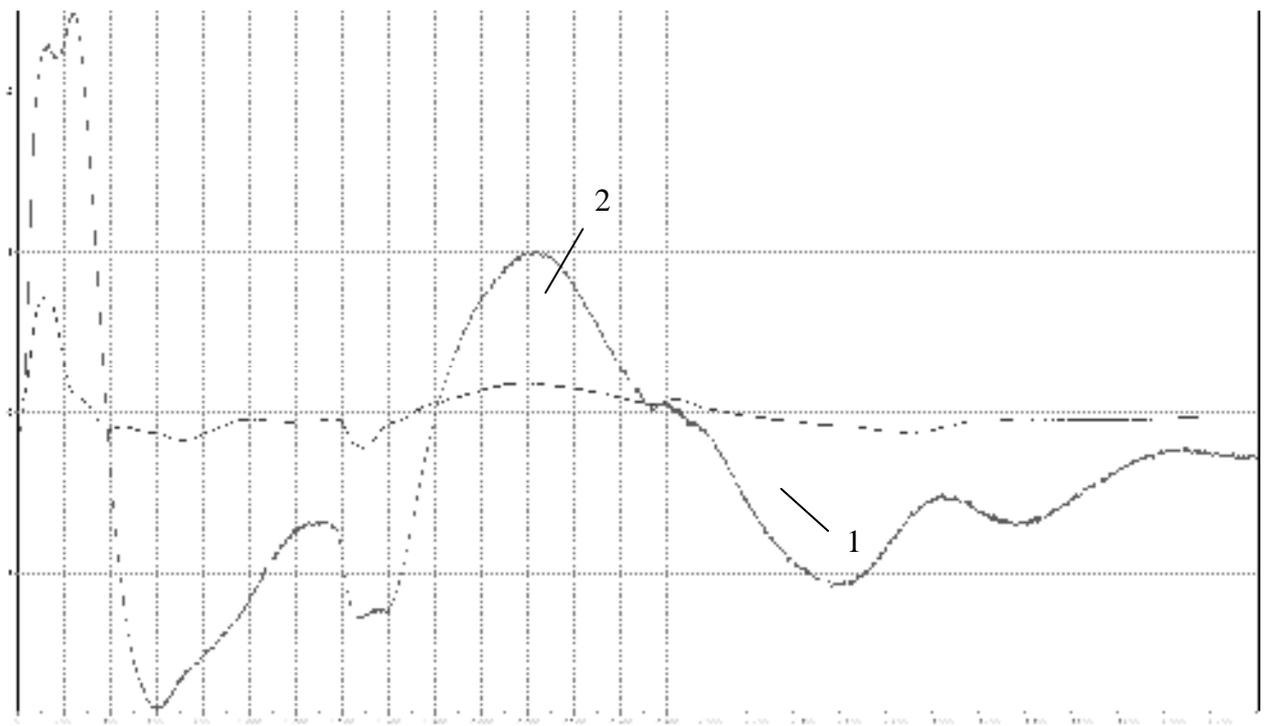


Рис.6.23 – Вид сигнала с глубины 24 м, кривая 1 – сигнал дм- диапазона, кривая 2 – м- диапазона

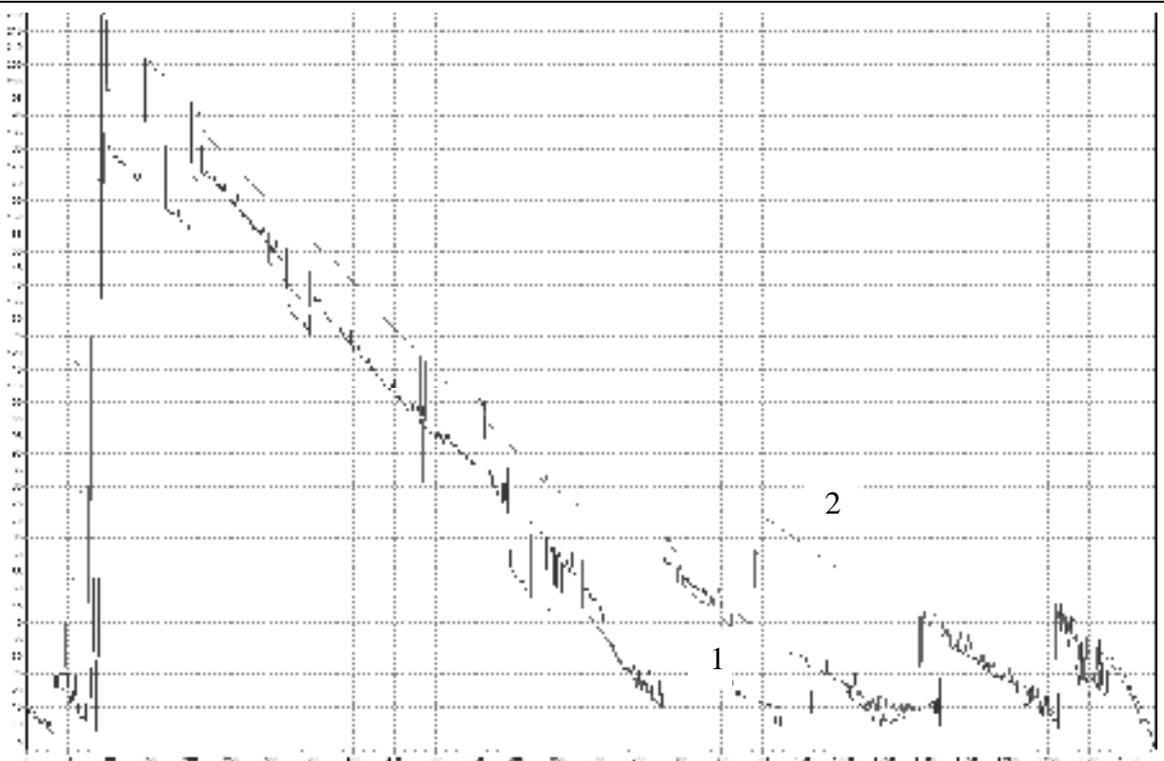


Рис.6.24 – Литологическая колонка дна Финского залива. Кривая 1 –МСКО Йовица – Джексона для I вариационной задачи, кривая II – для второй. Глубина 24 м

### 6.2.3 Построение профиля подводных работ

Для построения профиля по результатам подводных работ приёмо – передающая часть комплекса отрывалась от дна и на небольшой высоте отрыва перемещалась катером в заданном направлении. Вид изменения сигнала на железомарганцевой конкреции в 3 D представлен на рис. 6.25.

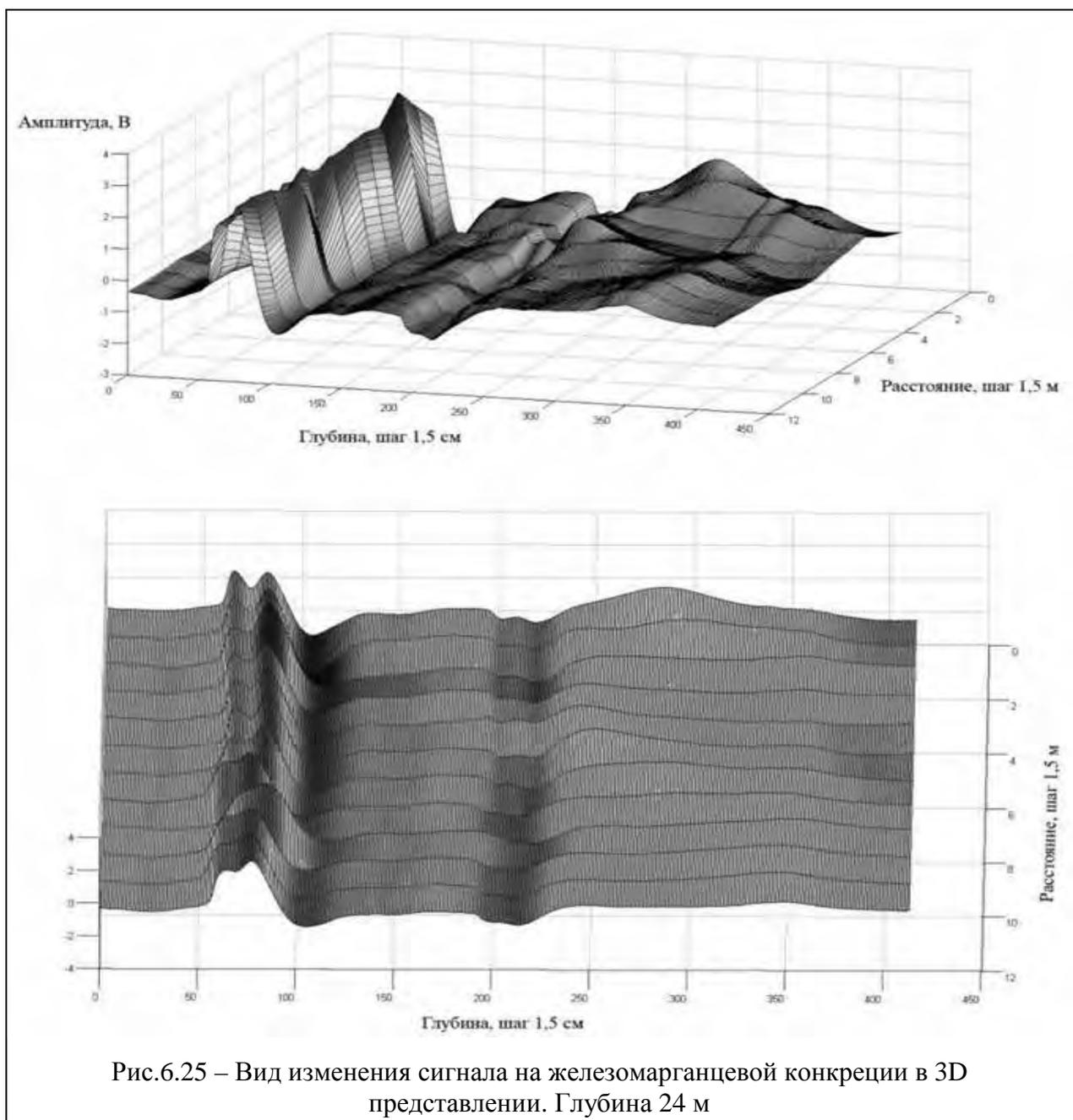


Рис.6.25 – Вид изменения сигнала на железомарганцевой конкреции в 3D представлении. Глубина 24 м

## ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты лётно-конструкторских испытаний (ЛКИ) самолётного варианта комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования. Самолётный вариант комплекса отличается от наземного новой геометрией антенн и записью сигнала на компьютер.

2. На примере конкретного полёта показано, что большая глубина распространения сигнала обусловлена использованием ДДРВ генератора как источника излучаемого сигнала и проявляющейся в отражённом сигнале сильной низкочастотной дисперсией диэлектрической проницаемости среды. В ходе ЛКИ совершен пролёт по трассе, на которой были проведены наземные измерения. Путём сравнения спектров установлено принципиальное соответствие между наземными и воздушными ЭМИ СШП измерениями.

3. Эффективность применения самолётных ЭМИ СШП измерений подтверждена выявлением наличия низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости влажных грунтов, полученных в ходе облёта дельты р. Невы.

4. Представлены результаты натуральных испытаний подводного варианта комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования: в бассейне; на малой воде (~3м); на большой воде (~24м). Применение данного варианта комплекса исключает необходимость в водолазных работах.

5. Подводный вариант комплекса отличается от наземного новой геометрией антенн, наличием гидроизоляции и записью сигнала на компьютер. На примере конкретного измерения показано, что большая глубина распространения сигнала обусловлена использованием ДДРВ генератора как источника излучаемого сигнала и проявляющейся в отражённом сигнале сильной низкочастотной дисперсией диэлектрической проницаемости среды.

7. Эффективность применения подводных ЭМИ СШП измерений подтверждена высокоточными измерениями в среде с сильной низкочастотной дисперсией диэлектрической проницаемости придонных грунтов акватории Финского залива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведены исследования и разработка аппаратно—программного комплекса электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды, предназначенного для решения инженерно — геологических задач по неразрушающему контролю геодинамики массива горных пород, грунтов, почв и процессов, вызванных техногенной деятельностью.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Создан аппаратно-программный комплекс ЭМИ СШП зондирования для обследования и контроля подстилающей среды мощными наносекундными импульсами.
2. Линейка генераторов на базе дрейфовых диодов с резким восстановлением, разработанная по сформулированным техническим условиям, обеспечивает глубины контроля структуры подстилающей среды до 130 м. Сформирована схема измерения параметров импульсов линейки ДДРВ генератора с амплитудой и асимметрией ( $U_{\text{имп}} \sim 1.64$  кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 3.5$  нс ÷  $U_{\text{имп}} \sim 9.87$  кВ,  $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$  нс,  $\tau_{\text{имп}} \sim 10$  нс) в полосе частот  $10^{-4}$  ÷ 17.44 ГГц.
3. Под линейку генераторов разработаны три типа широкополосных антенн подповерхностного зондирования – неоднородные микрополосковые, монополюсные и тонкопроволочные (струнные), которые согласованы с подстилающей средой в полосе от 1 МГц до 500 МГц при коэффициенте стоячей волны по напряжению менее 1.85.
4. За счет реализации в приемнике режима накопления информационно – измерительной система обладает повышенной помехоустойчивостью благодаря отказу от использования сигнала синхронизации, формируемого в генераторе излучаемых импульсов и подверженного воздействию синхрпомехи, и переходу в аппаратном комплексе к синхронизации от времени прихода максимального сигнала из подстилающей среды.
5. Разработаны преобразования временных сигналов, основанные на информационно – энтропийных критериях, позволяющие литологически

разделять подстилающую среду по результатам измерений в каждой отдельной пространственной точке.

6. Разработанный подход по зондированию в одной точке позволяет расширить возможности контроля подземного пространства вперед забоя при горной проходке, контроля качества инъекционного закрепления подземного массива, контроля состояния массива в режиме «заморозка — оттайка» и т.д.

7. Полученные технические результаты по наземному комплексу распространены на перспективные: аэровоздушный (самолётный) и подводный.

8. Разработанный комплекс, методики контроля и идентификации подповерхностных структур нашли своё применение в ходе обеспечения безопасности горнопроходческих работ, контроля инъекционных работ при проходке Северомуйского (БАМ, 1999 ÷ 2001 гг.), Сочинских тоннелей (олимпийские объекты, 2007 ÷ 2012 гг.), строящегося двухпутного тоннеля между станциями «Южная» и «Проспект Славы» линии 5 Метрополитена г. Санкт-Петербурга, непрерывного мониторинга инъекционного закрепления на ул. Карбышева (г. Санкт-Петербург), зона «Размыва».

10. Введение в состав комплекса измерителя параметров четырёхполюсника ОБЗОР-103, обеспечивающего проверку антенн на КСВН в одной из точек зондирования, делает согласование антенн со средой контролируемым.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельруд Г.А. Растворение твёрдых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов – М.: Химия, 1977. - 272 с.
2. Александрова Л.Н. Органо-минеральные производные гумусовых веществ в почве / Л.Н. Александрова, Э.М. Дорфман, О.В.Юрлова // Гумусовые вещества почвы. Зап. Ленингр. с/х ин-та. – Л.: 1970. – Т. 142. – С. 53-76.
3. Александрова Л.Н. О природе органо – минеральных коллоидов и методах их изучения / Л.Н. Александрова, М. Надь // Почвоведение. – 1958. – № 10. – С. 21-27.
4. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. – М.: Высшая школа, 1975. – 568 с.
5. Бензарь В.К. Определение влажности капиллярно-пористых материалов по поглощению электромагнитных волн СВЧ // Инженерно-физический журнал. – 1970. – №18. – С. 1131-1136.
6. Березин П.Н. О механизме формирования естественных электрических полей и их влияния на почвенные процессы / П.Н.Березин, В.М.Кипнис // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. – 1978. – № 2. - С. 15-19.
7. Вадюнина А.Ф. Электрокинетический потенциал некоторых степных почв / А.Ф.Вадюнина, С.Т. Арсенова // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. – 1979. – №3. - С. 44-46.
8. Вадюнина А.Ф. Влияние постоянного электрического тока на агрегатное состояние почв / А.Ф. Вадюнина, П.Н. Березин // Вестник МГУ. Сер. Биология и почвоведение. – 1968. – № 4. -С. 92-98.
9. Вадюнина А.Ф. Действие тока высокой частоты на свойства солонцов (при промывке) / А.Ф. Вадюнина, С.Ф. Захаров, Н.Ф. Киселёв // Почвоведение. – 1974. – №4. - С. 128-135 .

10. Вадюнина А.Ф. Мелиоративное действие постоянного электрического тока на солончаковые гипсоносные почвы Голодной степи / А.Ф. Вадюнина, У.Я. Молчанова // Почвоведение. – 1973. – № 1. – С. 108-117.
11. Вадюнина А.Ф. Особенности электрических свойств почв в области прочносвязанной влаги / А.Ф. Вадюнина, Ю.Г. Ткаченко, А.Д. Воронин // Почвоведение. – 1982. – № 12. – С. 42-103.
12. Вензарь В.К. Лабораторная установка для определения влажности капиллярнопористых материалов методом СВЧ поглощения / В.К. Вензарь, И.М. Римкевич // ИФЖ. Т. XXII. – 1972. – С.1141.
13. Витязев В.Г. Влияние состава поглощённых катионов на удельную поверхность почв / В.Г. Витязев, И.С. Кауричев, А. Рабий // Почвоведение. – 1980. – № 9. – С. 31-41.
14. Воронин А.Д. Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв // Научные доклады Высшей школы. Биологические науки. – 1975. – № 12. – С. 7-15.
15. Гамаюнов Н.И. Изучение свойств сорбированной воды диэлектрическим методом / Н.И. Гамаюнов, Н.И. Лыч, П.Н. Давидовский, А.М. Лыч // ИФЖ. – 1972. – 22, № 5. – С. 795-800.
16. Гедройц К.К. Почвенный поглощающий комплекс, растение и удобрение. – М.-Л.: Сельхозгиз, 1935. – 343 с.
17. Гедройц К.К. Избранные научные труды. – М. : Наука, 1975. – С. 260-354.
18. Глазовская М.А. Общее почвоведение и география почв. – Изд-во: Высшая школа, 1981. – 400 с.
19. Глобус А.М. Комплексное исследование тепло- и электрофизических свойств пористых сред / А.М. Глобус, А.В. Арефьев // Почвоведение. – 1975. – № 5. – С. 58-61.
20. Горбунов Н.И. Минералогия и коллоидная химия почв. – М.: Наука, 1974. – 315 с.

21. Горбунов Н.И. Связь между минералогическим составом и физико-химическими свойствами почв / Н.И. Горбунов, Б.П. Градусов // Почвоведение. – 1979. – №3. – С. 110-118.
22. Горбунова Р.Г. Электрометрический метод анализа водных вытяжек и грунтовых вод // Почвоведение. – 1970. – № 5. – С.132-138.
23. Горшенин К.П. Почвы южной части Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 591 с.
24. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. – Изд-во: Высшая Школа, 1971. – 274с.
25. Долгов С.И. Исследование подвижности почвенной влаги и её доступности для растений. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. – 205 с.
26. Дюшофур Ф. Основы почвоведения. Эволюция почв. – М.: Прогресс, 1970. – 617 с.
27. Зимовец Б.А. Экологические требования к орошению почв России / Б.А. Зимовец, Н.Б. Хитров [и др.]. / под общ. ред. Б.А. Зимовца и Н.Б. Хитрова // М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. – 72 с.
28. Кипнис В.М. Электрокинетический потенциал некоторых почв Нижнего Поволжья / В.М. Кипнис, В.Н. Максютя, Т.В. Азовцев // Почвоведение. – 1977. – № 11. – С. 62-68.
29. Ковда В.А. Основы учения о почвах. – М.: Изд-во Наука, 1973. – 447 с.
30. Кононова М.М. Органические вещества почвы. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 314 с.
31. Кононова М.М. Гумус главных типов почв СССР, его природа и пути образования. // Почвоведение. – 1956. – № 3. – С. 18-30.
32. Кульчинский Л.И. Особенности кристаллохимии поверхности глинистых минералов и их поверхностная диссоциация в водной среде // Коллоидный журнал. – 1970. – № 4. – С. 344-349.
33. Курбатов А.И. Определение электрокинетического потенциала почв // Изв. Тимирязев. с/х. академ. – 1970. – № 5. – С. 225-228.

34. Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. – М.: Изд-во МГУ, 1991. – 277 с.
35. Лебедев Т.С. Электрические свойства пород повышенной проводимости в глубинных термобарических условиях / Т.С. Лебедев, С.И. Шепель // Геофизический журнал. –1980. – Т.2. – № 6. – С. 54-68.
36. Лещанский Ю.И. Исследование поглощения дм и см волн в грунте / Ю.И. Лещанский, Р.Н. Лебедева // Изв. высш. уч. завед. Радиофизика. – Т. 11. – № 2. – 1968. – С. 205-208.
37. Лещанский Ю.И. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн / Ю.И. Лещанский, Р.Н.Лебедева, В.Д. Шумилин // Изв. высш. уч. завед. Радиофизика. – 1971. – Т.14. – Вып. 4. – С. 562-569.
38. Мецик М.С. Диэлектрическая постоянная водных плёнок / М.С. Мецик, В.Д. Перевертаев, А.Ю. Любавин // Поверхностные силы в тонких плёнках и дисперсных системах. – М.: Наука, 1972.- С. 200-201.
39. Михайличенко В.Н. Галогенез и осолонцевание почв равнин Северного Казахстана. – Алма-Ата: Изд-во Наука Каз. ССР, 1979. – 170 с.
40. Окорочков В.В. Электрокинетические свойства некоторых типов почв / В.В. Окорочков, А.И. Курбатов, С.Н. Алешин // Известия ТСХА. – 1974. – № 6. – С. 121-127.
41. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: МГУ, 1985.-376 с.
42. Орлов Д.С. Размеры и форма частиц гумусовых кислот из чернозёмов и дерново – подзолистых почв / Д.С. Орлов, Е.И. Горшкова // Научные доклады высшей школы. Биол. Науки. – 1965. – № 1. – С. 34-37.
43. Орлов Д.С. Молекулярные веса, размеры и конфигурация частиц гумусных кислот / Д.С. Орлов, Д.М. Амосова, Г.И. Глебова, Е.И. Горшкова [и др.] // Почвоведение. – 1971. – № 11. – С. 43-57.
44. Перфильева В.Д. Природа релаксационных максимумов поглощения почвой электромагнитной энергии // Тезисы докладов VI делегатского

- съезда Всесоюзного общества почвоведов, сб. Кн. I. – Тбилиси. – 1981. – С. 32.
45. Пономарева В.В. Гумус и почвообразование / В.В. Пономарева, Т.А. Плотникова – Л.: Изд-во Наука, 1980. - 220 с.
46. Раисов О.Ж. Зависимость удельного сопротивления лугового – серозёмного солончака от температуры // Вестник МГУ. Сер. Биология и почвоведение. – № 3. – 1973. – С. 118-121.
47. Серебровская М.В. Закономерности коагуляции лиофобных дисперсных систем на далеком расстоянии при произвольных потенциалах поверхности / М.В. Серебровская, О.Г. Усъяров // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. – М.: Наука, 1972. – С.52-59.
48. Степанов Л.Н. Диэлектрическая проницаемость почвы. // Сб. тр. по агроном. физике. – 1970. – Вып. 22. – С. 28-30.
49. Танзыбаев М.Г. Исследование электрофизических параметров почв в частотном диапазоне 20 Гц - $10^{10}$  Гц / М.Г. Танзыбаев, В.Д. Перфильева // Тезисы докладов V делегатского съезда Всесоюзного общества почвоведов. Сб.: кн. I. – Минск, 1977. – С.137-138.
50. Танзыбаев М.Г. Зависимость электрофизических параметров некоторых почв от влажности и температуры в диапазоне частот 20 Гц– $10^{10}$  Гц / М.Г. Танзыбаев, В.Д. Перфильева, В.М. Нестеров // Вопросы почвоведения Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 1979. – С. 59-67.
51. Тареев Б. М. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова. – М.: Высшая школа, 1978. – 728 с.
52. Ткаченко Ю.Г. Особенности электрических свойств почв в области прочносвязанной влаги / Ю.Г. Ткаченко, А.Ф. Вадюнина, А.Д. Воронин // Почвоведение. – 1982. – № 12. – С. 42-51.
53. Трубецкой О.А. Электрокинетические свойства лугово-черноземного солонца-солончака и краснозема // Вестник МГУ. Сер. 17. Почвоведение. – 1979. – №1. – С. 31-35.

54. Тюрин И.В. Вопросы генетики и плодородия почв. – М.: Наука, 1966. – 288 с.
55. Тюрин И.В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. – М.: Наука, 1965. – 320 с.
56. Уэрт Ч. Физика твердого тела / Ч. Уэрт, Р. Томсон. – М.: Мир, 1969. – 280 с.
57. Фатьянов А.С. О перегнойных кислотах, выделенных из природных почвенных растворов // Почвоведение. – 1953. – №1. – С. 15-25.
58. Шилов В.Н. Поляризация диффузного двойного слоя палочкообразных частиц и гигантская низкочастотная диэлектрическая проницаемость полиэлектролитов / В.Н. Шилов, Ю.Я. Розен // Поверхностные силы в тонких плёнках и дисперсных системах. – М.: Наука, 1972. – С. 102-114.
59. Экологические требования к орошению почв России / под общ. ред. Б.А. Зимовца, Н.Б. Хитрова. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. – 72 с.
60. Электрофизические свойства почв / В.Д. Перфильева, М.Г. Танзыбаев. – Томск: Изд-во ЦНТИ, 1998. – 186 с.
61. Chaussidon I. Dielectric properties of montmorillonite at various water contents. – Techn. Repts. Ser. Intern. Atomic Energy Agency. – 1966. – № 65. – P. 19-30.
62. Chaussidon I. Application of the Gouy theory to divalent cations: saturated clay suspensions. - Soil Sci. – 1963. – V. 95. – № 2. – P. 131-133.
63. Lisanti L.E. Nährstoffpotentiale und Enthalpien in Salzboden, mit besonderer Berücksichtigung der Kalium – Versorgung. Z. Pflanzenernagr., Dung., Bodenkunde. – 1962. – V. 97. – № 2. – P. 132-138.
64. Arcone S. F., Delaney A.J. Radio wave pulse refraction and ground wave propagation through permafrost and The active layer. Proc. Of 8 Intern. Conf. on Permafrost Zurich, Switzerland. Permafrost. -2003. -V.1. -P. 21-25.

65. Беляева Т.А. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0.1-20 ГГц / Т.А. Беляева, А.П. Бобров, П. П. Бобров, О. В. Галеев, В. Н. Мандрыгина // Исследование Земли из космоса. 2003. №5. – С. 1-7.
66. De Silva J.A., Joth S.J. Cation – exchange reactions electro kinetic and viscometric behavior of clay – organic complexes // Soil. Sci. – 1964. – V. 97. – № 1. – P. 63-73.
67. Гуров В.В. Методика и некоторые результаты экспериментального исследования переохлаждения поровой влаги при объёмном замерзании дисперсных грунтов // Материалы III конф. геокриологов России. Т. 1. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – С. 38-45.
68. Заборовский А.И. Электрические свойства горных пород в переменных электрических полях / А.И. Заборовский, А.Д. Фролов // Вестн. МГУ. Сер. Геол. – 1968. – №3. – С. 38-53.
69. Заборовский А.И. К природе частотной дисперсии электрических свойств влажных осадочных пород / А.И. Заборовский, С.Г. Семёнова, А.Д. Фролов // Вестн. МГУ. Сер. Геол. – 1968. – №4. – С. 29-38.
70. Кормильцев В.В. Электрокинетические явления в пористых горных породах. - Екатеринбург: ИГ РАН, .1995. - 48 с.
71. Федюкин И.В. Влияние засоленности на электрические свойства мёрзлых грунтов / И.В. Федюкин, А.Д. Фролов, Б.В. Гусев // Изв. АН СССР. – Т. 244. – №4. – 1979. – С. 941-944.
72. Фролов А.Д. Диэлектрические свойства мёрзлых песков / А.Д. Фролов, Б.В. Гусев // Труды ПНИИИС Госстроя СССР. – Т. VI.-М.: 1971. – С. 154-164.
73. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства криогенных пород. – М.: Недра, 1976. - 254 с.

74. Araki S.A. Measurements of dielectric properties of frozen soils / S.A. Araki, A.J. Delaney // *L. T.S., ser A. Phys. Sci.* – 1989. – N 48. – P. 27-40.
75. Frolov A.D. Caracteristicques de la Congelation de Sols Salins / A.D. Frolov, M.K. Seguin // *Permafrost and Proresses.* – 1993. – V.4.– P. 311-325.
76. Olhoeft G.R. Electrical properties of natural clay permafrost // *Cnad.J. Earth Sci.* – 1977. – V. 14. – P. 16-21.
77. Olhoeft G.R. Low frequency electrical properties // *Geophysics.* – 1985. – V. 50. – N 12. – P. 2492-2503.
78. Перфильева В.Д. Исследование процессов поглощения почвой энергии переменного электромагнитного поля [Электронный ресурс]: дис. на соиск. степ. канд. биолог. наук / В.Д. Перфильева. – Томск, 1984. – 206 с.
79. Фролов А.Д. Особенности засоленных мерзлых грунтов и их электрические и упругие свойства // *Криосфера Земли. Т. I. № 1.* Новосибирск: РАН. – 1997. – С. 69-77.
80. Осипов В.И. Микроструктура глинистых пород / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А.Румянцева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
81. Delaney A.J. Laboratory measurements of soil electric properties between 0,1 and 5 GHz / A.J. Delaney, S.A. Arcone // *USA CRREL. Rep. 82-10.* – 1982. – 8 p.
82. Loon W.K.P. van. Heat and mass transfer in frozen porous media // *Ph. D. Theis, AUW. Netherlands.* – 1991. – 200 p.
83. Oliphant J.L. A model for dielectric constants of frozen soils. Freezing and Thawing of soil – water system // *Amer. Soc. of Civil. Eng. N.Y.* – 1985. – P. 45-56.
84. Доржиев В.С. Исследование сезонных изменений электрических свойств подстилающей среды в диапазоне 10-1000 кГц / В.С. Доржиев, В.Р. Адвокатов, Ч.Ц.Цыдыпов // *Радиотехника и электроника.* – 1977. – Т. 22. – № 9. – С.1890-1894.

85. Фролов А.Д. Горная порода как сложная макросистема / II Всесоюзн. конф. Системный подход в геологии. Сб. рефератов. Ч. I. М., 1986. -С. 189—190.
86. Цыдыпов Ч.Ц. Исследование электрических свойств подстилающей среды / Ч.Ц. Цыдыпов, В.Д. Цыденов, Ю.Б. Башкуев // Новосибирск: Наука, 1979. – 170 с.
87. Белый В.А. Некоторые особенности инженерно-геологических свойств четвертичных глин аридной зоны / В.А. Белый, З.В. Куликова, В.Д. Пометун // Инж. Геология, 1983. – № 1. – С. 49-58.
88. Злочевская Р.И. Состояние воды в глинистых породах / Р.И. Злочевская [и др.] // Вестник МГУ. – Сер. Геология. – № 6. – 1986. – С. 39-53.
89. Сергеев Е.М. Типы микроструктур глинистых пород / Е.М. Сергеев [и др.] // Инженерная геология. – 1979. – № 2. – С. 48-58.
90. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн [и др.] – М.: Мир, 1984. – 303 с.
91. Соколов В.Н. Микроструктурные изменения в глинах при плоскостном сдвиге / В.Н. Соколов, В.И. Осипов // Инженерная геология. – 1983. – № 6. – С. 9-21.
92. Ананьев И.В. Уплотнение лёссовых грунтов / И.В. Ананьев, Н.В. Воляник. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1989. – 124 с.
93. Арефьев В.С. Просадочность лёссовых пород Верхнего Приобья, закономерности её изменения и прогнозирование // Гидрогеологические и инженерно-геологические процессы на мелиоративных системах степной зоны Сибири. Вып. 10. Красноярск. –1978. – С. 27-40.
94. Арефьев В.С. Влажность лёссовых пород района г. Барнаула / В.С. Арефьев, Т.А. Горбунова // Водные ресурсы Алтайского края и их комплексное использование: Тез. науч. конф. Барнаул, 1971. – С. 19-24.
95. Арефьев В.С. Деформации сооружений на просадочных грунтах и меры по их предотвращению / В.С. Арефьев, Г.И. Швецов // Проектирование и

- строительство инженерных сооружений на макропористых лёссовых грунтах: Материалы научн.-техн. совещ. Барнаул, 1972. – С. 145-152.
96. Ведерников В.В. Структурные изменения лёссовых грунтов при увлажнении под нагрузкой / В.В. Ведерников, В.Н. Соколов // Геоэкология. – 1994. – №2. – С. 104-111.
97. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. – Изд-во: Научный мир, 2006. – 400 с.
98. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.
99. Кулагин В.В. Моноимпульсная локация объектов с использованием мощных импульсов наносекундной длительности / В.В.Кулагин, А.В. Соколов, В.А. Черепенин / под ред. А.В. Соколова // Вопросы перспективной радиолокации. – М.: Радиотехника, 2003. – С. 188-205.
100. Кулагин В.В. Адаптация спектра сверхширокополосного зондирующего импульса при моноимпульсной локации / В.В. Кулагин, В.А. Черепенин / под ред. А.В. Соколова // Вопросы перспективной радиолокации. – М.: Радиотехника, 2003. –С. 206-225.
101. Злочевская Р.И., Королев В.А. Электроповерхностные явления в глинистых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 177 с.
102. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 9. – С. 79-85.
103. Потапов А.А. Диэлектрические свойства воды и протонно-активационный механизм поляризации // Ж. общей химии. – Т. 63. – Вып.7. – 1993. – С. 1461-1471.
104. L. Ulander [and oth.]. CARABAS-II SAR change detection performance on groundtargets concealed in foliage, Proceedings of EUSAR 2004. 5th European 24. Conference on Synthetic Aperture Radar, Ulm, GE (25-27 May 2004). – P. 297–300.

105. Васильев И.А. Многочастотный СВЧ-датчик для обнаружения мин / И.А.Васильев, Е.Г. Геннадиева, С.И. Ивашов [и др.]. – М.: Радиотехника, 1999. – № 2. – С.49-52.
106. Ender, J.H.G. Multi channel SAR/MTI system development at FGAN: From AER to PAMIR / J.H.G.Ender, P.Berens, A.R.Brenner, L.Roßing, U.Skupin, // Proc. IGARSS'02. –Toronto. – 2002. – P. 1697-1701.
107. Belcher, D.P. High resolution processing of hybrid strip-map / spotlight mode SAR. / D.P.Belcher, C.J. Baker // IEE Proc., Radar Sonar Navig., 1996. – 143. – (6). – P. 366-374.
108. Brenner, A.R. Distributed SAR processing in the time domain // Proc. EUSAR 2002, Cologne. – 2002. – P. 573-576.
109. Brenner, A.R. Airborne SAR imaging with subdecimeter resolution. / A.R. Brenner, J.H.G. Ender // Proc. EUSAR 2004, Ulm. – 2004. – P. 267-270.
110. Soergel, U. New opportunities and challenges for analysis of urban areas in high resolution SAR data. / U.Soergel, U.Thoennessen, U.Stilla, A.R. Brenner // Proc. EUSAR 2004, Ulm. – 2004. – P. 415-418.
111. Soergel, U. Event-driven SAR data acquisition in urban areas using GIS, GeoBIT / U.Soergel, K.Schulz, U.Thoennessen, U. Stilla // GIS J. Spat. Inf. Decis. Mak. – 2003. № 16(12). – P. 32-37.
112. Chan, Y.K. An introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR) / Y.K.Chan, V.C. Koo // Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 2. – P. 27-60.
113. Chan, Y. K. Synthetic Aperture Radar (SAR) signalgeneration / Y.K.Chan, S.Y. Lim // Progress In Electromagnetics Research B. – 2008. – Vol. 1. – P.269-290.
114. Wilden, H. [and oth.]. Design and realisation of the PAMIR antenna frontend. // Proc. EUSAR 2004. – Ulm. – 2004. – P. 493-496.

115. Cerutti-Maori, D. First experimental Scan-MTI results achieved with the multi-channel SAR system PAMIR / D.Cerutti-Maori, U.Skupin // Proc. EUSAR 2004. – Ulm. – 2004. – P. 521-524.
116. Ender, J.H.G. PAMIR-a wideband phased array SAR/MTI system, Radar, Sonar and Navigation / J.H.G.Ender, A.R. Brenner // IEE Proceedings. – 2003. – Vol. 150. – №. 3. – P. 165-172.
117. Brenner, A.R. First experimental results achieved with the new very wideband SAR system PAMIR / A.R.Brenner, J.H.G.Ender // Processing of EUSAR. VDE. – Germany. – 2002. – P.81–86.
118. Cantalloube, H. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution: Technical challenge and preliminary results. Radar, Sonar and Navigation / H.Cantalloube, P. Dubois-Fernandez // IEE Proceedings. – 2006. – Vol. 153. – P. 163-176.
119. Balz, T. SAR-based 3D-reconstruction of complex urban environments / T. Balz, N. Haala // Proc. IAPRS. – 2003. – Vol. 34, (3W13). – P. 181–185.
120. Homer, J. High resolution 3-D SAR via multi-baseline interferometry / J. Homer, I. D. Longstaff, G. Callaghan // Proc. 1996 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. – 1996. – P. 796-798.
121. Нейман П.И. Особенности характеристик и применения авиационных РСА // Геоматика. – 2011. – №3(11). – С.30-33.
122. Пат. № 2168186 РФ. Авиационная радиолокационная система обзора Земли; заявитель и патентообладатель Мусинянц Т.Г. [и др.] от 27.05.2001.
123. Moser G. SAR amplitude probability density function estimation based on a generalized Gaussian model / G. Moser, J. Zerubia, S.B. Serpico // IEEE Trans. Image Process. – 2006. –Vol. 15. – №. 6. – P. 1429-1442.
124. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М.: Советское Радио, 1970. - 520 с.

125. Леонтович М.А. О приближенных граничных условиях для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел // Исследования по распространению радиоволн. Сборник второй. –М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. -С. 5-12.
126. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 870 с.
127. Введенский Б.А. Основы теории распространения радиоволн. Распространение в однородной атмосфере. – М.-Л.: Гос.техн.-теорет.изд-во, 1934. – 227 с.
128. Лавров Г.А. Приземные и подземные антенны / Г.А.Лавров, А.С. Князев – М.: Советское радио, 1965. – 472 с.
129. Моделирование в прикладной электродинамике и электронике // Сб. науч. тр. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. – Вып. 9. – 96 с.
130. Пименов Ю.В. Сведение некоторых осесимметричных задач дифракции к плоским задачам // Радиотехника и электроника, 1967. – Т. 12. – № 12. – С. 2214-2216.
131. Электродинамические методы анализа проволочных антенн / А.Л. Бузов, Ю.М. Сподобаев, Д.В. Филиппов, В.В. Юдин / под ред. В.В. Юдина. - М.: Радио и связь, 2000. – 153 с.
132. Cinar G. Diffraction of a normally incident plane wave by three parallel half-planes with different face impedances / G.Cinar, A. Buyukaksoy // IEEE Trans, on Ant. and Prop. – 2004. – V. 52. – № 2. – P. 478-486.
133. Song J.M. Fast Illinois solver code (FISC) solves problems of unprecedented size at the Center for Computational Electromagnetics / J.M. Song, C.C. Lu, W.C. Chew, S.W. Lee // IEEE Trans, on Ant. and Prop. – 1998. – V. 40. – № 4. – P. 27-34.
134. Габриэльян Д.Д. Решение задачи дифракции на телах сложной формы больших электрических размеров методом интегральных

- уравнений / Д.Д. Габриэльян, М.Ю.Звездина // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38 – № 4. – С. 636-641.
135. Боровиков В.А. Геометрическая теория дифракции / В.А. Боровиков, Б. Е. Кинбер – М.: Связь, 1978. – 248 с.
136. Итеративные методы расчета дифракционных оптических элементов / Л. Л. Досколович, В. В. Котляр, В. А. Сойфер // Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2000. – 688 с.
137. Марков Г.Т. Математические методы прикладной электродинамики. / Г.Т.Марков, Е.Н.Васильев. – М.: Сов. радио, 1970. – 120 с.
138. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В.Никольский, Т.И.Никольская – М.: Наука, 1989. – 544 с.
139. Стрижков В.А. Особенности численной реализации метода моментов при решении интегральных уравнений проволочных систем // Радиотехника и электроника. – 1989. – № 5. – С. 961-964.
140. Фок В.А. Дифракция на выпуклом теле // ЖЭТФ. – 1945. – Т. 15. – № 12. – С.693-698.
141. А. Вайсфлор. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах // пер. с нем. М.А. Силаева. - М.: Сов.радио, 1961. – 424 с.
142. Дамаскин Б.Б. Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – М.: Химия, 2001. – 623 с.
143. Demko S. Decay rates for inverses of band matrices / S. Demko, W. Moss, P. Smith // Math. Comput. 1984. – № 43. – P. 491- 499.
144. Болтинцев В.Б. Оценка наличия связанной воды в горной выработке по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Жилищное строительство. – 2013. – № 4. – С.54-58.
145. Эминов С.И. Теория интегро-дифференциальных уравнений вибраторов и вибраторных решеток // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1997. – Т.V. – Вып. 2 (18). – С. 48-58.

146. Эминов С.И. Обоснование метода моментов в теории дифракции // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29. – Вып. 16. – С.80-88.
147. Эминов С.И. Теория интегрального уравнения тонкого вибратора // Радиотехника и электроника. – Т.38. – 1993. – Вып.12. – С.2160-2168.
148. Яцкевич В.А. Устойчивость процесса сходимости численного решения в электродинамике / В.А. Яцкевич, Ф. Каршакевич // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 1981. – Т. XXIV. – № 2. – С.66-72.
149. Казанский Л.С. Принципы создания согласующих и фазирующих устройств ВЧ - диапазона в современных технологических условиях / Л.С. Казанский, Ю.И.Кольчугин // Антенны. – 2006. – № 10 (113). – С. 26-31.
150. Казанский Л.С. Способ расчета проволочных антенн произвольной конфигурации с помощью обобщенной эквивалентной цепи // Радиотехника и электроника. – 1999. – № 6. – С.705-709.
151. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Л. Н. Захарьев, А.А. Леманский, В.И. Турчин [и др.]/ под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985. -368 с.
152. Бахрах Л. Д. , Курочкин А.П. Голография в микроволновой технике. – М.: Сов.радио, 1979. -320 с.
153. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин / под ред. Г.З.Айзенберга. В 2-х ч. – Ч.1 – М.: Связь. – 1977. – 384 с.
154. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин / под ред. Г.З. Айзенберга. В 2-х ч. -Ч.2 – М.: Связь, 1977. – 288 с.
155. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения. - М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
156. Пименов Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.

157. Юдин В.В. Анализ проволочных антенн на основе интегрального уравнения Харрингтона методом моментов с использованием различных весовых функций // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1996. – Т.4. – № 4. – С.116-124.
158. Hallen E. Theoretical investigation into the transmitting and receiving qualities of antennas // Nova Acta Soc. Sci. Upsal. – 1938. – V. 1. – №4. – P. 1-44.
159. Harrington R.F. Field computation by moment method. – New York: Macmillan, 1968. – 240 p.
160. Junker G. P. A novel delta-gap source model for centre fed cylindrical dipoles / G. P.Junker, A.A. Kishk, A.W. Glisson // IEEE Trans, on Ant. and Prop. – 1995. – V. 43. – №5. – P. 537-540.
161. Kang T.W. Basis function considerations for the method of moments using the fictitious current model / T.W. Kang, H.T. Kim // IEEE Trans, on Ant. and Prop. – 1999. – V. 47. – №6. – P. 1118-1120.
162. King R.W.P. The theory of linear antennas. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1956. – 384 p.
163. Н.Е. Поклингтон. Electric oscillation in wires // Camb. Phil. Soc. Proc., 1897. – Vol. 9. – P. 334-332.
164. С.Н. Tang. Input impedance of arc antennas and short helical radiators // IEEE Trans. AP, 1964. – 12. P. 2-9.
165. Бахрах Л. Д. О решении интегрального уравнения линейной антенны // ДАН СССР, 1954. – Т. 92. – № 4. – С. 755.
166. Коротковолновые антенны / Г. З. Айзенберг, С. П. Белоусов, Э. М. Журбенко [и др.] / под ред. Г. З. Айзенберга. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.
167. Марков Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн. 2-е изд., перераб. и доп. / Г.Т. Марков, А.Ф.Чаплин– М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.

168. Jakobus U. Improved PO-MM hybrid formulation for scattering from three-dimensional perfectly conducting bodies of arbitrary shape / U. Jakobus, F.M. Landstorfer // IEEE Trans. on Ant. and Prop. – 1995. – V. 43. – № 2. – P. 162-169.
169. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / С.Е. Банков, А. А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК». – 2008. – 246 с.
170. Давыдов А.Г. Программный комплекс EDEM3D для исследования электродинамических характеристик идеально проводящих трехмерных объектов / А.Г. Давыдов, Ю.В. Пименов // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1999. – Т. VII – № 2 (23). - С. 24-26.
171. Davydov A.G. On the capabilities of the new version of the EDEM software package / A.G. Davydov, Y.V. Pimenov // Theses of reports and brief informations of the I International science and technology conference «Physics and engineering applications of wave processes». – Samara, 10-16 September 2001. – V.1. – P. 21-26.
172. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я.Арсенин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 288 с.
173. Бузова М.А. Метод электродинамического анализа сложных металлических объектов на основе уравнений Фредгольма 1-го и 2-го рода и векторного интегрального уравнения с поверхностным интегралом // Антенны. – 2007. – № 10 (125) .- С. 4-8.
174. Антенно-фидерные устройства: технологическое оборудование и экологическая безопасность / А.Л. Бузов, Л.С. Казанский, В.В. Юдин [и др.] / под ред. А.Л. Бузова. –М.: Радио и связь, 1998. - 221 с.
175. Бузов А.Л. УКВ антенны для радиосвязи с подвижными объектами, радиовещания и телевидения. – М.: Радио и связь, 1997. – 293 с.
176. Артемьев В.В. Решение интегро-дифференциальных уравнений вибраторов вблизи Земли // Вестник Новгород. гос. ун-та. – 1998. – № 10. – С. 43-45.

177. Артемьев В.В. Исследование вибраторных антенн вблизи земли / В.В. Артемьев, С.И. Эминов // Наука - производству. – 2000. – № 8. – С. 44-46.
178. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Миттры. Пер. с англ. / под ред. Э.Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1977. – 487 с.
179. Вайсфлор А. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах.– М.: Советское радио, 1961. – 424 с.
180. Макаров Г.И. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью / Г.И. Макаров, В.В. Новиков, С.Т. Рыбачек. – М.: Наука, 1991. – 123 с.
181. Марков Г. Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская – М.: Сов. радио, 1979. – 376 с.
182. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 870 с.
183. Дандаров В.А. Модифицированный метод решения интегрального уравнения Фредгольма в задаче о распространении радиоволн вдоль неоднородной земной поверхности // Радиотехн. и электрон. – 2000. – Т. 45. – № 10. – С. 1187-1193.
184. Челидзе Е.Л., Дервяненко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. –Киев: Наукова думка, 1977. 231 с.
185. Катин С. В. Влияние проводящих земных сред на излучение элементарного электрического диполя в СВ-диапазоне длин волн / С.В.Катин, Е.А. Шорохова, А.В.Кашин // Антенны. – 2005. – Вып. 6 (97). – С. 54-60.
186. Кубанов В.П. Базовая модель для исследования направленных свойств некоторых типов антенн ВЧ-диапазона с учетом изломов подстилающей поверхности конечной проводимости // Антенны. – 2003. – № 1. – С.48-51.

187. Кубанов В.П. Влияние нерегулярности рельефа антенного поля на параметры синфазных коротковолновых антенн / В.П. Кубанов, Е.Ю. Шередько // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 1976. – № 11. – С. 107-108.
188. Кинг Р. Антенны в материальных средах. В 2-х кн. / Р. Кинг, Г.Смит. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 824 с.
189. King, R. W. P. New formulas for the electromagnetic field of a vertical electric dipole in a dielectric or conducting half-space near its horizontal interface. // J. Appl. Phys. – Dec. 1982. – V.53. – P.8476-8482.
190. Давидович М.В. Численный метод для задач дифракции на полубесконечных структурах // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX. – № 3. – С. 235 - 245.
191. Кравцов В.В. Интегральные уравнения в задачах дифракции // Вычислительные методы и программирование. – М.: Изд. МГУ. – 1966. – Вып. 5. – С. 260-293.
192. Колечицкий Е.С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
193. Верлань А.Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А.Ф.Верлань, В.С. Сизиков. – Справочник. – Киев: Наук. думка, 1986. – 544 с.
194. Болтинцев В.Б. Сверхширокополосная георадиолокация: успехи и проблемы / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Записки Горного института. – 2011. – Т.194. – С.132-137.
195. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринева. – М.: Изд-во: Радиотехника, 2005. – 416 с.
196. Морозов С.С. Современное состояние технической мелиорации грунтов и стоящие перед ней задачи. // Тр. совещ. по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. 1960 г. – М.: Изд-во МГУ, 1961. - С. 29-40.

197. Попов И. В. Основы инженерно-геологического грунтоведения/ методич. пособ. — М.-Л., Госгеолиздат, 1941.- 223 с.
198. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Л. Химия, 1974. -351 с.
199. Неганов В.А. Оценка погрешности решения краевых задач о собственных волнах полосковых и щелевых структур методом сингулярных интегральных уравнений // Радиотехника и электроника. — 1988. — Т. 33. — №5. — С. 1076-1077.
200. Неганов В. А. Оценка точности приближённых решений сингулярных интегральных уравнений для собственных волн полосково-щелевых структур / В.А.Неганов, Е.И.Нефёдов // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 1988. — Т. 28. — № 11. — С. 1735-1740.
201. Неганов В.А. Электродинамическая теория полосковых и щелевых структур СВЧ. [Электр. ресурс]: Дисс.на соис.степ. докт.физ.-мат. наук. — Харьков, 1989. — 201 с.
202. Неганов В.А. Электродинамическая теория полосково-щелевых структур СВЧ. — Самара: Изд-во Саратовского ун-та. Самарский филиал, 1991. — 238 с.
203. Неганов В.Л. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне высоких частот / В. Л. Неганов, Е. И. Нефёдов, Г. П. Яровой. — М.: Наука. Физматлит, 1996. — 304 с.
204. Неганов В.А. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайне высоких частот / В.А. Неганов, Е.И. Нефёдов, Г.Н. Яровой. — М.: Педагогика-Пресс, 1998. — 328 с.
205. Неганов В.А. Линейная макроскопическая электродинамика. Т. 1 / В. А. Неганов, С. Б. Раевский, Г. П. Яровой / под ред. В.А. Неганова. — М.: Радио и связь, 2000. — 509 с.
206. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / В.В. Никольский, В.П.Орлов, В.Г. Феоктистов [и др.] / под ред. В.В.

- Никольского. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.
207. Левин Л. Теория волноводов. Методы решения волноводных задач / пер. с англ./ под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 312 с.
208. Заргано Г.Ф. Линии передачи сложных сечений. / Г. Ф. Заргано, Лерер А. М., Ляпин В. П., Синявский Г. П. – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1983. – 320 с.
209. Микроэлектронные устройства СВЧ / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алёхин [и др.] / под ред. Г.И. Веселова. – М.: Высшая школа, 1988. – 280 с.
210. Арефьев А.С. Метод частичного обращения интегрального оператора в задачах о собственных волнах полосковых и щелевых линий передачи. [Электронный ресурс]: Дисс. на соис.степ. докт. физ.-мат.наук – Самара, 2002. – 336 с.
211. Goell J.E. A circular-harmonic computer analysis of rectangular dielectric waveguides // Bell Syst. Techn. J. – 1969. – V. 48. – № 7. – P. 2133-2160.
212. Marcatili E.A. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics // Bell Syst. Tech. J. – 1969. – Vol. 48. – P. 2071-2102
213. Schlosser W. Der rechteckige dielectrische draht // AEU. – 1964. – Bt. 18. – № 7. – P. 403-410.
214. Веселов Г.И. К расчёту открытого диэлектрического волновода прямоугольного сечения / Г.И. Веселов, Г.Г. Воронина // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1971. – Т. 14. – № 12. – С. 1891-1901.
215. Горобец А.П. К анализу прямоугольного диэлектрического волновода / А.П. Горобец, Л.Н. Дерюгин, В.Е. Сотин // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20. – № 1. – С. 86-94.
216. Введение в интегральную оптику / под ред. М. Барноски. Пер с англ./ под ред. Т.А. Шмаонова. – М.: Мир, 1977. – 356 с.
217. Клеев А.И. Расчёт диэлектрических волноводов методом коллокации / А.И. Клеев, А. Б. Маненков // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1988. – Т.

31. – №1. – С. 93-102.
218. Кузнецов В.А. Дисперсионные характеристики прямоугольного диэлектрического волновода / В.А. Кузнецов, А.М. Лерер // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27. – №4. – С. 651-657.
219. Бейтмен Г. Высшие трансцендентные функции. / Г. Бейтмен, А. Эрдейи. Пер. с англ. Н. Я. Виленкина. – М.: Наука, 1965. -296 с.
220. Кузнецов В.А. Дисперсионные характеристики диэлектрических волноводов на подложках. / В.А. Кузнецов, А.М. Лерер // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29. – №9. – С. 1705-1712.
221. Давидович М.В. Импедансные характеристики микрополоскового вибратора. // Радиотехника. – 1990. – № 6. – С. 68-71.
222. Давидович М.В. Электродинамическое моделирование неоднородных линий с потерями / М.В. Давидович, В.П. Мещанов, А.С. Никулина, Н.Ф. Попова // Электронная промышленность. – 2000. – № 1. – С. 73-83.
223. Давидович М.В. Оптимизация коаксиальных сверхширокополосных нагрузок на основе интегрального уравнения неоднородной линии передачи / М.В. Давидович, В.П. Мещанов, Н.Ф.Попова, В.Г. Носов // Антенны. – 1999. – Вып. 2(43). – С. 73-78.
224. Васин А.В. Задача о нахождении эквивалентного радиуса при тонкопроволочном моделировании диэлектрических структур в рамках электродинамического анализа методом интегрального уравнения // Антенны. – 2006. – № 10 (113). – С. 44 - 47 .
225. Стрижков В.А. Математическое моделирование электродинамических процессов в проволочных антенных системах // Математическое моделирование. – 1989. – Т. 1 . – № 8 . – С . 127-141.
226. Бузова М.А. Проектирование проволочных антенн на основе интегральных уравнений: учебное пособие для ВУЗов / М.А. Бузова, В.В. Юдин. – М.: Радио и связь, 2005. – 172 с.

227. Блатов И.А. Применение сплайновых вейвлет-функций к численному моделированию тонкопроволочных антенн / И.А. Блатов, А. Пименов, В.В. Юдин // Инфо-телекоммуникационные технологии. – 2003. – Т. 1. – № 4. – С. 29 - 32.
228. Бузов А.Л. Современные методы электродинамического моделирования антенн и антенных систем диапазонов ВЧ, ОВЧ и УВЧ / А.Л. Бузов, Л.С. Казанский, В.В.Юдин [и др.] // Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. – 2001. – №3 (31). – С. 5-17.
229. Бузов А.Л. Об особенности аттестации «безэховых» камер. / А.Л. Бузов, Ю.И.Кольчугин, А.Н. Никифоров, В.А. Романов // Метрология и измерительная техника в связи. –1998. – №3. – С. 26.
230. Яцкевич В.А. Устойчивость процесса сходимости численного решения в электродинамике / В.А. Яцкевич, С.Ф. Каршакевич // Изв. Вуз. – Радиоэлектроника. – 1981. – Т. XXIV. –№2. – С. 66-72.
231. Ковалёв И.П. Анализ процессов излучения и приёма импульсных сигналов во временной области / И.П. Ковалёв, Д.М. Пономарёв. – М.: Рикел. Радио и связь, 1996. – 112 с.
232. Бузова М.А. О возможности и целесообразности модификации метода физической оптики путем замены функции распределения тока на функцию распределения заряда // Труды НИИР. – 2010. – №4. – С.14–17.
233. Дахнов В.Н. Интерпретация каротажных диаграмм. – М.-Л., 1941. – 496 с.
234. Sierra, O. Fundamentals of Well-Log Interpretation - 2. The Interpretation of Logging Data. – Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 1986.
235. Добрынин В.М. Петрофизика / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
236. Barlai Z. Some principal questions of the well logging evaluation of hydrocarbon-bearing sandstones with a high silt and clay content experience

- acquired by the field application of a new method // *The Log Analyst*. – 1971. – Vol. XII. – № 3. – P. 7-31.
237. Mironov V.L. Soil dielectric spectroscopic parameters dependence on humus content / V.L.Mironov, P.P. Bobrov // *Proc. of. IGARSS'03. Toulouse. France*. – 2003. – Vol. 2. – P. 1106-1108.
238. Mironov V.L. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils / V.L.Mironov, M.C. Dobson, V.H. Kaupp [et al.] // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2004. – Vol. 42. – №. 4. – P. 773-785.
239. Бобров П.П. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели / П. П. Бобров, В. Л. Миронов, О. А. Ивченко, В. Н. Красноухова // *Исслед. Земли из космоса*. – 2008. – № 1. – С. 15–23.
240. Mironov V. L. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils / V.L.Mironov, L. G. Kosolapova, S. V. Fomin // *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*. – 2009. – V.47. – №7. – P.2059-2070.
241. Комаров С.А. Микроволновое зондирование почв / С.А. Комаров, Миронов В.Л. – Новосибирск: Наука, 2000. – 350 с.
242. Hallikainen M.T. Dielectric behavior of wet soils between 1.4 GHz and 18 GHz / M.T.Hallikainen, F.T.Ulaby, M.C. Dobson, N.A. El-Rayes // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* – 1985. –V. GE-23. – N.1. – P.35-41.
243. Dobson M.C. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II: Dielectric mixing models / M.C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 1985. – V. GE-23. –№ 1. – P. 35–45.
244. Беляева Т.А. Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0.1–20 ГГц / Т.А. Беляева, А.П.Бобров, П.П.Бобров [и др.] // *Исслед. Земли из космоса*. – 2003. – № 5. – С. 28-34.

245. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. – Л.: Химия, 1979. – 608 с.
246. Ельцов И.Н. Обобщение формулы Арчи и типы радиального распределения УЭС в прискважинной зоне / И.Н. Ельцов, А.А. Кашеваров, М.И. Эпов // Геофизический вестник. – 2004. – № 7. – С. 9-14.
247. Archie A.G. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics / Trans / AIME 146. – 1942. – P. 54-61.
248. Addison J.R. IMPURITY CONCENTRATIONS IN SEA ICE / J. R. Addison, J. Glaciology. – 1977. – Vol. 18. – № 78. – P. 117-127.
249. Паундер Э. Физика льда. – М: Изд-во Мир, 1967. – 189 с.
250. Болтинцев В.Б. Применение метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования на стадии разведки месторождения горючих сланцев в Иордании / В.Б. Болтинцев, В.Н. Ильяхин, Р. М.Салихов // Записки Горного института. – 2011. – Т. 194. – С.138-145.
251. Глазовская М.А. География почв с основами почвоведения / М.А. Глазовская, А.Н. Геннадиев – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 325 с.
252. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев. – М.: Радио и связь, 1989. – 192 с.
253. Резников А.Е. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения. / А. Е. Резников, В. В. Копейкин, П. А. Морозов, А. Ю. Щекотов. – М. УФН. – 2000. – Т.170. – № 5. – С.565-568.
254. Ахманов С.А. Физическая оптика / С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин. – М.: Наука, 2004. - 656 с.
255. Галимов Г. К. Апланаты. Том 3. Апланатические телескопы и антенны. – М.: Адвансед солюшнз, 2011. - 436 с.

256. Белодедов М.В. Точность аппроксимации сигналов по алгоритму Прони / М.В. Белодедов, В.К. Игнатъев, А.В. Никитин // Электронное моделирование. - 1992. - Т. 14. - №5. - С.43-48.
257. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении / Нью – Джерси / пер. с англ. под ред. Ю.Н. Бакаева, М.В. Капранова. – М.: Сов. радио, 1978. – 600 с.
258. Ершов А. А. Стабильные методы оценивания параметров // Автоматика и телемеханика. – 1978. – №8. – С.66 -100.
259. Слюсар В. И. 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. -№7. -С. 10-19.
260. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. -900 с.
261. S. Evans. Radio techniques for the measurement of ice thickness. Polar Res. – 1963. – 11. – P. 406-410.
262. Ландау Л.А. Электродинамика сплошных сред / Л.А. Ландау, Е.М. Лифшиц – М.: Наука, 1982. – 620 с.
263. Старовойтов В.А. Интерпретация георадиолокационных данных / Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2008. –192 с.
264. Арманд Н.А. Исследования природной среды радиофизическими методами / Н.А. Арманд, А.Е. Башаринов, А.М. Шутко // Изв. Вузов. Сер. Радиофизика. – 1977. – № 6. – С. 809-839.
265. Ржевский В.В. Рудничная радиоинтроскопия и радиосвязь / В.В. Ржевский, Е.Б.Коренберг – М.: Наука, 1979. – 270 с.
266. Безродный К.П. О новых геофизических методах исследования горного массива / К.П. Безродный, С.Я. Нагорный, В.Б. Болтинцев, В. М. Ефанов, В.Н. Ильяхин // Труды Юбилейной научно-практической конференции «Подземное строительство на рубеже XXI века». – М.: 2000. – С. 159-164.

267. Грехов И.В. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов / И.В. Грехов, Г.А. Месяц // УФН. – июль 2005. – Т. 175. – № 4. – С. 735-744.
268. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны / Б.А. Панченко, Нефёдов Е.И. – М.: Радио и связь, 1986. – 145 с.
269. Lectures on Cauchy's problem. // Cours d'analyse. – N.Y. – 1923. – Т. 1-2. – P. 1927-1930.
270. Еникеев Б.Н. Моделирование в петрофизике (решения, проблемы, перспективы) – 4 // Геологические, геофизические исследования и аппаратура. – 2010. – № 1; bne@rangea.ru .
271. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
272. Сараев Д.В. Метод диэлектрической спектроскопии в исследовании диэлектрической дисперсии нефтяных масел / Д.В. Сараев, И.В. Лунёв, Л. И. Гафарова, Т.Н. Юсупова [и др.] // Структура и динамика молекулярных систем, 2003г., Вып. X, Ч. 2. -С. 135-138. <http://www.yalchik.ksu.ru/yalchik%202003/pdf2003/v2p135.pdf>
273. Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение (геокриология) / В.А. Кудрявцев, Б.Н.Достовалов, Н.Н. Романовский, К.А. Кондратьева [и др.]. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
274. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.
275. Справочник по элементам волноводной техники. / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.И. Смирнов. – М.: Сов. радио, 1967. – 552 с.
276. Безродный К.П. Мониторинг подземного пространства вперед забоя методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования на примере строящихся тоннелей в г. Сочи / К.П. Безродный, В.Б. Болтинцев, В.Н. Ильяхин [и др.] // Жилищное строительство. – 2010. – №12. – С.40-44.

277. Грехов И.В. Мощный полупроводниковый генератор наносекундных импульсов / И.В.Грехов, В.М. Ефанов, А.Ф. Кардо-Сысоев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – №1. – С.93-94.
278. Пат. № 2144682. Российская Федерация 7 G 01 S 13/02. Способ радиолокационного зондирования геологического разреза / Болтинцев В.Б.; заявитель и патентообладатель Болтинцев В.Б. - №99104111/09; заявл. 01.03.1999; опубл. 20.01.00, Бюл.№ 2. – М.: 2000.- 12 с.
279. Свидетельство на полезную модель № 28289. Российская Федерация 7 Н 01 Q 7/00. Антенна для подповерхностного зондирования / Болтинцев В.Б.; заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ Геодизонд. № 2002126446/20; заявл. 07.10.02; опубл. 10.03.03, Бюл.№7. - М.: 2003.- 4с.
280. Болтинцев В.Б. Применение вариационных задач для компенсации динамической погрешности информационно-измерительного комплекса / В.Б. Болтинцев, И. Ю. Лютынский, А. А. Чапчай // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1990. – № 6(36). – С.36-40.
281. Разработка технологии радиолокационного обследования бетонных и железобетонных конструкций с целью обнаружения скрытых нарушений сплошности бетона (трещин и трещинных зон, разуплотненных участков), создание автоматизированного измерительного комплекса / К.П. Безродный, П.Н. Беспалов, В.Б. Болтинцев // Деп. в ВНИИЦ 26.01.2004, № 01.200 315448 (Каталог НИОКР РФ 2010, приборостроение). – СПб. – 2004. – 72с.
282. Губанов В.П. Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения / В.П. Губанов, С.Д. Коровин, И.В. Пегель [и др.] // Письма в Журн. техн. физики. – 1994. – Т. 20. – Вып. 14. – С. 89-93.
283. Черемисин А.А. Особенности широкополосной георадиолокации / А.А.Черемисин, В.Б. Болтинцев // Известия высших учебных заведений. – Физика. –2012. – т. 55. – № 8/2. – С.12-19.

284. Бункин Б.В. Радиолокатор на основе СВЧ-генератора с релятивистским электронным пучком / Б.В. Бункин, А.В. Гапонов-Грехов, А.С. Ельчанинов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18.– №9. – С.61-64.
285. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Сов. радио, 1974. – 255 с.
286. Балдыгин В.А. Высоковольтные генераторы нано- и субнаносекундных импульсов / В.А. Балдыгин, А.А. Белошапко, И.Н. Григорьев [и др.] // Прикладная физика. – 2001. – № 4. – С.11-15.
287. Hideroni Matsuzawa. Design charts for Tesla-transformer-type relativistic electron beams generators / Hideroni Matsuzawa, Shinji Suganomata // Rev. Sci. Instrum.. 1982. – 53. – 5. – P. 694-696.
288. Вассерман С.Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. – Новосибирск, 1977. – 43 с.
289. Коровин С.Д. Трансформатор Тесла в сильноточных импульсно-периодических ускорителях. – Томск, 1988. – 38 с.
290. Boltintsev, V. B. Method of electromagnetic pulse ultra wideband probing of the underlying medium / V. B. Boltintsev, V. N. Pyakhin, K. P. Bezrodnyi. – DOI: 10.1615 / JRadioElectr.v1.i2.50. <http://www.begellhouse.com/journals/49791ac230bedeec>
291. Красюк Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн / Н.П. Красюк, Н.Д. Дымович – М.: Высш. школа, 1974. – 536 с.
292. Семихина Л. П. Диэлектрические и магнитные свойства воды в водных растворах и биообъектах в слабых электромагнитных полях. – Тюмень. Изд-во ТюмГУ. 2005. – 173 с.
293. Павловский А.И. Линейные индукционные ускорители для СВЧ-генераторов / А.И.Павловский, В.С. Босамыкин, В.Д. Селемир [и др.] // Сб. науч. тр. Релятивистская высокочастотная электроника. – Горький. – 1992. – Вып. 7. – С. 81-103.

294. Козлов В.А. Волновой ударно-ионизационный пробой дрейфовых диодов с резким восстановлением / В.А. Козлов, А.Ф. Кардо-Сысоев, В.И. Брылевский // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. – Вып. 5. – С. 629-632.
295. Evans, S. Radio techniques for measurements of ice thickness // Polar Record. – 1963. –11(73). – P. 406 - 410.
296. Frohlich Н. Theory of dielectrics. – Oxford Univ. Press., 1986. – 192 p.
297. Справочник химика / Б.П. Никольский, О. Н. Григорьев, М. Е. Позин [и др.] // гл. ред. Б.П. Никольский. Изд. 2. – М.: Л. Химия, 1966. Том I, — 1072 с.
298. Salikhov R. Forming New Market Niches: Strategy For Improving The Competitiveness of Oil Shale Products / R. Salikhov, M. Petrov, E. Golmshtok, V. Boltintsev [and oth.] [Электронный ресурс]: [http://www.oil-shale.ru/data/uploads/Salikhov\\_Ruslan\\_Atomenergoproekt\\_JIOSS\\_2012.pdf](http://www.oil-shale.ru/data/uploads/Salikhov_Ruslan_Atomenergoproekt_JIOSS_2012.pdf)
299. Болтинцев В. Б. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №1; [Электронный ресурс]: <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.pdf>
300. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 336 с.
301. Дебай П. Избранные труды. – Л.: Наука, 1987. – С. 264-316.
302. Заборовский А.И. К природе частотной дисперсии электрических свойств влажных осадочных пород / А.И. Заборовский, С.Г. Семёнова, А.Д. Фролов // Вестн. МГУ. Сер. Геол. – 1968. – №4. – С. 29-38.
303. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 412 с.
304. Тонконогов М.П. Диэлектрическая релаксация в водных растворах и суспензиях / М.П.Тонконогов, В.А. Векслер, К.Ж. Биржанов // Изд. вузов. Физика. – 1975. – №2. –С. 81-84.

305. Семихина Л.П. Возможности диэлектрического метода для анализа состояния водных систем после физических воздействий // Вестник ТюмГУ. – 2000. – № 2. – С. 39–43.
306. Лилеев А.С. Диэлектрическая релаксация и молекулярно-кинетическое состояние воды в растворах. [Электронный ресурс]: Диссерт. на соиск. степ. докт. хим. наук. – М.: 2004. – 276 с.
307. Фабелинский И. Л. О макроскопической и молекулярной сдвиговой вязкости // УФН, т.167, №7. – С. 721
308. Потапов А.А. Диэлектрические свойства воды и протонно-активационный механизм поляризации // Ж. общей химии. – 1993. – Т. 63. – В.7. – С. 1461-1471.
309. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский, Г. А. Голодовская, Ю. К. Васильчук, Р. С. Зиангиров / под ред. В. Т. Трофимова. Изд.6, перер. и доп. –М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
310. Болтинцев В.Б. Расширение возможностей мониторинга подземного пространства методом ЭМИ СШП зондирования // Жилищное строительство. – 2012. – № 9. – С.54-58.
311. Болтинцев В.Б. Определение диэлектрических свойств сложных грунтов при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №11. – С.25 - 28.
312. Безродный К. П. Оценка обводненности горной выработки по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / К.П.Безродный, В.Б. Болтинцев, В.Н. Ильяхин // Жилищное строительство. – 2011. – №9. – С.34-37.
313. Вахрушин Ю. П. Линейные индукционные ускорители / Ю.П. Вахрушин, А.И.Анацкий – М.: Атомиздат, 1978. – 387 с.
314. Болтинцев В.Б. Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного

- сверхширокополосного зондирования // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 9; [Электронный ресурс]: <http://jre.cplire.ru/jre/sep12/5/text.pdf>
315. Болтинцев В.Б. Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Доклады VI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: 2012. – С.13-21.
316. Беличенко В.П. Использование особенностей формирования поля ближней зоны комбинированной антенны для улучшения её характеристик широкополосности / В.П. Беличенко, В.П. Якубов, А.С. Запасной // Труды III Всероссийской конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, акустике и связи» – М.: 2010. – С. 247-251.
317. Proceedings of the Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics, 5. – New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2002. – 751 p.
318. Schantz H. The Art and Science of Ultra-Wideband Antennas. – Boston, London: Artech House, 2005. – 331 p.
319. Федянович В.И. О предельной широкополосности излучателей // Антенны. – 2008. – Вып. 1 (128). – С. 3-17.
320. Tefiku F. Coupling between elements of electrically small compound antennas / F.Tefiku, C.A. Grimes // Microwave and Optical Technology Letters. – 1999. – V. 22. – №1. – P. 16-21.
321. da Costa K.Q. Combination of electric and magnetic dipoles with single element feeding for broadband application / K.Q. da Costa, V. Dmitriev // MOTL. – 2006. – V. 48. – № 1. – P. 8-11.
322. Неганов В.А. Функционал входного сопротивления тонкого электрического вибратора / В.А. Неганов, Д.С. Ключев, С.В. Медведев // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т.27. – Вып. 21. – С. 29-34.

323. Rana I.E. Current distribution and input impedance printed dipoles / I.E. Rana, N.G.Alexopoulos // IEEE Trans. – 1981. – V. AP 29. – № 1. – P. 99-105.
324. Microstrip Antennas / edited by Nasimuddin Nasimuddin // Electrical and Electronic Engineering. – 2011.– 540 p. ISBN 978-953-307-247-0
325. Carlin H.J. A simplified circuit model for microstrip. // IEEE Trans. on MTT. – 1973. – V. MTT-21. – № 9. – P. 589-591.
326. Кац Б.М. Оптимальный синтез устройств СВЧ с Т-волнами. / Б.М. Кац, В.П. Мещанов, А.Л. Фельдштейн – М.: Радио и связь, 1984. – 228 с.
327. Иммореев И.Я. Излучение сверхширокополосных сигналов. / И.Я. Иммореев, А.Н.Синявин // Антенны. – 2001. – № 1 (47). – С. 8-16.
328. Ильинский А.С. Применение метода Галёркина для расчета и исследования токов основного и высших типов нормальных волн несимметричной полосковой линии. / А.С. Ильинский, В.В. Зарубанов // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т.25. – №9. – С.1844-1850.
329. Вайнштейн Л.А. Симметричные электрические колебания идеально проводящего полого цилиндра конечной длины // ЖТФ. – 1967. – Т.37. – С.1181-1195.
330. Getsinger W.J. Dispersion of parallel-coupled microstrip // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1973. – Vol. MTT-21. – P. 144-145.
331. Васильченко А. Качественная оценка вычислительных методов электродинамики на примере программных продуктов для высокочастотного моделирования микрополосковых антенн / А. Васильченко, И. Скольц [и др.] // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – № 3. – С. 52-56.
332. Лерер А.М. К расчету щелевого моста и критических частот симметричной полосковой линии методом интегральных преобразований. / А.М. Лерер, В.С.Михалевский // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т.17. – №5. – С.913-918.

333. Неганов В.А. Новое интегральное уравнение для расчёта тонкого электрического вибратора / В.А. Неганов, М.Г. Корнев, И.В. Матвеев // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27. – Вып. 4. – С. 62-73.
334. Панченко Б.А. Электродинамический расчет характеристик излучения полосковых антенн / Б.А. Панченко, С.Т. Князев, Ю.Б. Нечаев [и др.] – М.: Радио и связь, 2002. – 256 с.
335. Чебышев В.В. Интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода для тока узкого полоскового вибратора и численный метод его решения // Машинное проектирование устройств и систем СВЧ. – М.: 1979. – С. 204-215.
336. Нефёдов Е.И. Микрополосковые излучающие и резонансные устройства / Е.И. Нефёдов, В.В. Козловский, А.В. Згурский – Киев: Техника, 1990. – 158 с.
337. Jansen R.H. Accurate results on the end effect of single and coupled lines for use in microwave circuit design / R.H. Jansen, N.H.L. Koster // AEU. – 1980. – Bd. 34. – № 11. – P. 453-459.
338. Maeda M. Analysis of gap in microstrip transmission lines // IEEE Trans. – 1972. – Vol. MTT-20. – № 6. – P. 390-396.
339. Juckson R.W. Full-wave finite element analysis of irregular microstrip discontinuities // IEEE Trans. – 1989. – Vol. MTT-37. – № 1. – P. 81-89.
340. Juckson R.W. Full wave analysis of microstrip openend and gap discontinuities / R.W. Juckson, D.M. Pozar // IEEE Trans. – 1985. – Vol. MTT-33. – № 10. – P. 1036- 1042.
341. Koster R.H.L. The microstrip step discontinuity: a revised description / R.H.L. Koster, R.H. Jansen // IEEE Trans. – 1986. – Vol. MTT-34. – № 2. – P. 213- 223.
342. Dunleavy L.P. A general method for analyzing shielded thin microstrip discontinuities / L.P. Dunleavy, P.B. Katechi // IEEE Trans. – 1988. – Vol. MTT-36. – № 12. – P. 1758-1766.

343. Uzunoglu N.K. Frequency-dependent analysis of a shielded microstrip step discontinuity using an efficient mode-matching technique / N.K. Uzunoglu, C.N. Capsalis, C.P. Chronopoulos // *IEEE Trans.* – 1988. – Vol. MTT-36. – № 6. – P. 976-984.
344. Railton C.J. The rigorous analysis of cascaded step discontinuities in microstrip / C.J. Railton, T. Rozzi // *IEEE Trans.* – 1988. – Vol. MTT-36. – № 7. – P. 1177-1185.
345. Worm S.B. Hybrid-mode analysis of arbitrarily shaped planar microwave structures by the method of lines / S.B. Worm, R. Pregla // *IEEE Trans.* – 1984. – Vol. MTT- 32. – № 2. – P. 191-196.
346. Yang H.Y.Y., Microstrip open-end discontinuities in a substrate-superstrate structure / H.Y.Y. Yang, N.G. Alexopoulos, R. Jackson // *IEEE Trans.* – 1989. – Vol. MTT- 37. – № 10. – P. 1542-1546.
347. Коваленко А.Н. Проекционный метод построения электродинамических моделей полосковых линий и элементов интегральных схем СВЧ : дисс. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – М.: 2003. – 242 с.
348. Егоров Е.Н. Экспериментальные исследования микрополосковых неоднородностей СВЧ ГИС / Е.Н. Егоров, А.П. Крохин, Ю.И. Хренов // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.* – 1981. – Вып. 6. – С. 10-14.
349. Van Bladel J. *Singular Electromagnetic fields and Sources.* – London: Oxford Univ. Press, 1991. – 252 p.
350. Yosefi M. Dielectric resonator-microstrip interactive circuit analysis and design using integral equation techniques / S.K. Chaudhuri // *IEEE Trans.* – 1995. – Vol. MTT- 43. – № 7. – P. 1446-1452.
351. Misig J.R. *Integral equation technique/Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures.* T. Itoh , Ed. – New York: Willey, 1989. – P. 133-213.

352. Farina M. Efficient full-wave analysis of stratified planar structures and unbiased TW-FET's / M. Farina, G. Guerini, T. Rozzi // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT- 43. – № 6. – P. 1322-1329.
353. Hanson G.W. Integral equation formulation for inhomogeneous anisotropic media Green's dyad with application to microstrip transmission line propagation and leakage // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT-43. – № 6 – P. 1359-1363.
354. Xu Y. An effective approach for study of multiple discontinuities of transmission lines / Y. Xu, R.G. Bossio // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT-43. – № 10. – P. 2585-2589.
355. Schmidt R. Modeling of cascaded coplanar waveguide discontinuities by the mode-matching approach / R. Schmidt, P. Russel // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT- 43. – № 12. – P. 2910-2919.
356. Nallo C.D. Full-wave modal analysis of arbitrarily shaped dielectric waveguide through an efficient boundary-element method formulation / C.D. Nallo, F. Frezza, F. Galli // IEEE Trans. –1995. – Vol. MTT- 43. – № 12. – P. 2982-2990.
357. Ureel J. New method for obtaining the shape sensitive of planar microstrip structures by a full-wave analysis / J. Ureel, P.P. Zutter // IEEE Trans. – 1996. – Vol. MTT- 44. – № 6. – P. 249-260.
358. Eleftheriades G.V. On the network characterization of planar passive circuits using the method of moments / G.V. Eleftheriades, J.R. Mosig // IEEE Trans. – 1996. – Vol. MTT- 46. – № 3. – P. 438-445.
359. Dural G. Closed-form Green's function for General sources and stratified media / G.Dural, M.I. Aksun // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT- 43. – № 7. – P. 1545-1556.
360. Alan L. Analytical Evaluation of the MoM Matrix Elements / L. Alan, M.I. Aksun, K.Mahadevan // IEEE Trans. – 1995. – Vol. MTT- 44. – № 4. – P. 519-525.

361. Daz N.K. A spectral-domain Green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines / N.K. Daz, D.M. Pozar // IEEE Trans. – 1987. – Vol. MTT- 35. – № 3. – P. 326-335.
362. Michalski K.A. On the scalar potential of a point charge associated with a time-harmonic dipole in a layered medium // IEEE Trans. – 1987. – Vol. AP-35. – № 6. – P. 1299-1301.
363. Aksun M.I. Robust approach for the derivation of closed-form Green's function // IEEE Trans. – 1996. – Vol. MTT- 44. – № 5. – P. 651-658.
364. Simons R.N. Modeling coplanar-stripline discontinuities / R.N. Simons, N.I. Dib, L. P. B. Katechi // IEEE Trans. – 1996. – Vol. MTT- 44. – № 5. – P. 711-716.
365. Coen G. Automatic derivation of equivalent circuits for general microstrip interconnection discontinuities / G. Coen, D.D. Zutter, N. Fache // IEEE Trans. – 1996. – Vol. MTT- 44. – № 7. – P. 1010-1016.
366. Чебышев В.В. Антенны и устройства СВЧ. Микрополосковые излучатели и решетки в слоистой среде. – М.: Радиотехника, 2003. – 102 с.
367. Alexopoulos N.G. On the solution to Pochngtones equation for antennas printed on grounded substrates / N.G. Alexopoulos, I.E. Rana // Int. Symp. Dig. Antennas and Propag. – Seattle, Mash, 1979. – V.1. – P.171 -174.
368. Абденов А.Ж. Оценка погрешности методов расчёта индуктивности элементов в микрополосковом исполнении / А.Ж. Абденов, А.С. Мальцев, М.Г. Рубинович // Вестник АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – 2006. – № 2. – С. 162 -168.
369. Капралов Г.Н. Сверхширокополосная согласованная нагрузка / Г.Н. Капралов, М.И. Бичурин, О.Г. Фомин, А.С. Татаренко // Вестник Новгородского государственного университета. – 1999. – №13. –С.10-13.
370. Глухова О.Е. Шлейфовые трансформаторы сопротивлений на канонических нерегулярных линиях передачи / О.Е. Глухова, А.П.

- Креницкий, В.П. Мещанов, И.Н.Салий // Вопросы прикладной физики. – 2006. – Вып. 13. – С. 66-69.
371. Нефёдов Е.И. Полосковые линии передачи. Теория и расчёт типичных неоднородностей / Е.И. Нефёдов, А.Т. Фиалковский – М.: Наука, 1974. – 128 с.
372. Зайцев С.В. Краевые эффекты в полосковых структурах при произвольном угле скольжения волны / С.В. Зайцев, А.Т. Фиалковский – Изд. Вузов: Радиофизика. – 1981. – Т. 24. – № 9. – С. 1152-1158.
373. Гвоздев В. И. Объёмные интегральные схемы СВЧ / В.И. Гвоздев, Е.И. Нефёдов – М.: Наука, 1985. – 247 с.
374. Кочержевский Г. Н. и др. Антенно-фидерные устройства: Учебник для вузов / Г. Н. Кочержевский, Г.А. Ерохин, Н.Д. Козырев.– М.: Радио и связь, 1989. – 352 с.
375. Denlinger E.J. Losses of microstrip lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Jun 1980. – Vol. MTT-28. – № 6. – P. 513-522.
376. Itoh T. Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines / T. Itoh, R. Mittra // IEEE Trans. MMT. – 1973. – V. 21. – № 7. – P. 496 -499.
377. Van de Capelle A.R. A computer analysis of the discrete mode spectrum open microstrip transmission lines / A.R. Van de Capelle, P.J. Luypaert, K.U. Lenken // IEEE Int. Microwave Symp. – 1978. – P. 413-415.
378. Kuester E.f. Some recent theoretical studies on open microstrip / E.f. Kuester, D.C.Chang // IEEE Int. Microwave Symp. – 1979. – P. 325-328.
379. Yamashita E. An Approximate Dispersion Formula of Microstrip Lines for Computer Aided Design of Microwave Integrated Circuits / E. Yamashita, K. Atsuki, T. Ueda // IEEE Trans Microwave Theory and Techniques. – Vol. 27. – P. 1036-1039

380. Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И.Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ, Н.М. Мамонова [и др.] / под ред. В.И.Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
381. Getsinger W.J. Dispersion of parallel-coupled microstrip // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1973. – Vol. MTT-21. – P. 144-145.
382. Kirschning M. Accurate Wide-range Design Equations for The Frequency-Dependent Characteristic of Parallel Coupled Microstrip Lines. / M. Kirschning, R.H.Jansen // IEEE Trans. On micro wave theory and techn. – 1984. – V. MTT-32. – № 1. – P. 83-90.
383. Марков Г.Т. Антенны / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
384. Черноусов В.С. Нестационарное излучение антенных систем // Радиотехника и электроника. – 1965. – № 8. – С. 87-94.
385. Балакирев В.А. Формирование электромагнитных импульсов апертурными антеннами / В.А. Балакирев, В.С. Гладков, Г.Л. Синельников // Электромагнитные явления. – 1998. – Т.1. – №4. – С. 522-537.
386. Ковалев И.П. Анализ процессов излучения и приёма импульсных сигналов во временной области / И.П. Ковалев, Д.М. Пономарёв – М.: Рикел, Радио и связь, 1996. – 112 с.
387. Малютин Н.Д. Многосвязанные полосковые структуры и устройства на их основе. – Томск: Из-во Том. ун-та, 1990. – 164 с.
388. Schelkunoff S.A. A conversation of Maxwell's equations into generalized telegraphist's equations // BSJ. – 1955. – V. 34. – № 5. – P.995-1043.
389. Chang Fung-Yuel. Transient analysis of lossless coupled microstrip arrays in an inhomogeneous dielectric medium // IEEE Trans. in MTT, – 1970. – V. MTT-18. – № 9. – P. 616-626.
390. Rizzoli V. The calculation of scattering parameters of coupled microstrip arrays of any cross section // Alta Freq. – 1973. – V. 49. – № 4. – P. 191-199.

391. Кравченко С.И. Расчёт матрицы рассеяния многопроводных полосковых линий и устройств на их основе / С.И. Кравченко, С.И. Бахарев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. – 1978. – Вып. 8. – С. 45-53.
392. Arndt F. Anwendung der Ähnlichkeitstransformation bei Microstrip-Leitungen // NTZ. – 1973. – № 3. – P. 46-49.
393. Карпуков Л.М. Анализ элементов и устройств СВЧ на многопроводных связанных микрополосковых линиях // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. – 1981. – № 3. – С.60-63.
394. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов – М.: Энергия, 1975. – 750 с.
395. Лерер А.М. Учет особенности на ребре при расчете критических частот и полей прямоугольного волновода с Т-выступом // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1974. – Т.27. – №9. – С.90-93.
396. Веселов Г.И. Об учете особенностей электромагнитных полей в методе частичных областей / Г.И. Веселов, Н.И. Платонов, Е.С. Слесарев // Радиотехника, 1980. – Т.35. – №5. – С.27-34.
397. Веселов Г.И. Об электромагнитном поле вблизи ребра проводящей полуплоскости / Г.И. Веселов, Н.И. Платонов, В.Е. Агеев // Радиотехника. – 1979. – Т.34. – №7. – С.66-69.
398. Мариносян Г.И. Поля и волны в П-волноводе // Известия АН.Арм. ССР. Сер. Физика. – 1974. – Т.9. – № 96. – С. 463-470.
399. Нефёдов И.С. Исследование характеристик периодической микрополосковой линии / И.С. Нефёдов, Р.А. Силин // Электронная техника. Сер. I. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып.7. – С.14-18.
400. Фихманас Р.Ф. Использование аналитических свойств преобразования Фурье при численной реализации вариационных принципов / Р.Ф. Фихманас, П.Ш. Фридберг // Радиотехника и электроника. – 1978. – Т.23. – №7. – С. 1465-1476.

401. Дубровка Ф.Ф. Электродинамические характеристики коаксиала с диафрагмами на проводниках / Ф.Ф. Дубровка, В.И. Найденко // Изв. Вузов. Радиоэлектроника. –1975. – Т. 18. – № 10. – С.42-46.
402. Гипсман А.И. Характеристики основной волны в экранированной щелевой линии / А.И. Гипсман, А.М. Нетук, Р.А. Силин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып.12. – С.3-6.
403. Hofmann H. Pin-line dispersion // Electron Lett.. – 1976. – V.12. –№ 17. – P. 428-429.
404. Hofmann H. Dispersion of planar waveguides for millimeter-wave application // Arch. Elek. Ubertragung. – 1977. – V.31. – P.40-44.
405. Meier P.J. Integrated fin-line // A versatile and proven millimeter transmission line. Microwave J. – 1976. – № 11. – P.24-25.
406. Шварцбург А.Б. Дисперсия электромагнитных волн в слоистых и нестационарных средах (точно решаемые модели) // Успехи физических наук.-2000. -Т. 170.- №12. – С. 1297 -1324.
407. Schmidt L.-P. Characteristics of a generalized fin-line for millimeter-wave integrated circuits / L.-P. Schmidt, T. Itoh // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1981. – V.2. – N 3. – P.427-435.
408. Jansen R.H. Unified user- oriented computation of shielded, covered, open planar microwave and millimeter-wave transmission-line characteristics // Microwaves, Optics, Acoustics. – 1979. – V.3. – N.1. – P. 14-22.
409. Meier P.J. Integrated fin-line millimeter components // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – 1974. – P. 195-196.
410. Перич М.Т. Анализ полосковой линии передачи, расположенной вертикально между двумя параллельными заземляющими пластинами с использованием гибридного метода граничных элементов / М.Т. Перич, С.С. Ильич, С.Р. Алексич, Н.В. Райцевич [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1 (ч.1), – С. 185-190.

411. Самохин Г.С. Высшие типы волн в несимметричной полосковой линии / Г.С.Самохин, А.И. Гипсман, Р.А. Силин // Электронная техника. Электроника СВЧ. –1977. – Вып.2. – С.3-13.
412. Захаров Е.В. Интегральные уравнения с ядрами Адамара в задачах дифракции / Е.В. Захаров, А.Г. Давыдов, И.В. Халеева // Актуальные вопросы прикладной математики. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – С.118-127.
413. Неганов В.А. Современная теория и практические применения антенн / В.А.Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.
414. Калантаров П.Л. Расчёт индуктивностей. Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин – Л.: Энергоатомидат, 1986. – 488 с.
415. Cassidy E. S. Back Scattering Cross Sections of Cylindrical Wires of Finite Conductivity / E.S. Cassidy, J. Fainberg // IRE Trans. Antennas Propag. – 1960. – Vol. AP-8. – №1. – P. 1-7.
416. Ключев С.Б. Несимметричная двойная щелевая линия / С.Б. Ключев, Е.И. Нефедов, У. Цзи // Физика волновых процессов и радиотехнических систем. – 2009. – Т. 12. – №4. – С.44-51.
417. Федюкин И.В. Зависимость диэлектрических параметров влагосодержащего песка от гранулометрического состава // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1977. – № 8. – С. 124-127.
418. Болтинцев В.Б. Геофизическое обследование инъекционного закрепления заобделочного пространства методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / В.Б. Болтинцев, К.П. Безродный, В.Н.Ильяхин, [и др.] // Жилищное строительство. – 2010. – №5 – С.39-44.
419. Болтинцев В.Б. Оценка реализации свойства сверхширокополосности Т- волн для антенн подповерхностного зондирования с параметрической оптимизацией размеров поперечных сечений токоведущих линий //

- Журнал радиоэлектроники. – 2012. – №3; [Электронный ресурс]: <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/13/text.pdf>
420. Болтинцев В.Б. Оценка реализации свойства сверхширокополосности Т-волн для антенн подповерхностного зондирования с параметрической оптимизацией поперечных сечений токоведущих линий // Доклады V Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: 2011. – С.8-16.
421. Болтинцев В.Б. Обработка сигналов м-, дм- диапазонов длин волн при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Доклады VI Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: 2012. – С. 21-27.
422. Болтинцев В.Б. Обработка сигналов м-, дм- диапазонов длин волн при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 3; [Электронный ресурс]: <http://jre.cplire.ru/jre/mar13/1/text.pdf>
423. Семихина Л.П. Низкочастотная диэлькометрия жидкостей в слабых вихревых электрических полях. Дисс.на соиск. степ.докт.физ.-мат.наук – Тюмень, 2007. – 230 с.
424. Кульбак С. Теория информации и статистика. – М.: Наука, 1967. – 408 с.
425. Буйнявичус В.-А.В., Карпицкайте В - З. Ф., Пятрикис С - Р. С. Статистические методы в радиоизмерениях. – М.: Радио и связь, 1985. – 240 с.
426. Хинчин А.Я. Понятие энтропии в теории вероятности // Успехи математических наук. – 1953. – Т.8. – №3. – С. 3-20.
427. Highfield, R.A. Calculation of Maximum Entropy Distributions and Approximation of Marginal Posterior Distributions / R.A. Highfield, A. Zellner // Journal of Econometrics. – 1988. – 37. – P. 195-209.
428. Мостеллер Ф. Анализ данных и регрессия / Ф. Мостеллер, Дж. Тьюки

– М.: Финансы и статистика, 1982. – 239 с.

429. Дрокин Н.А. Измерения диэлектрических свойств жидких кристаллов на высоких частотах / Н.А. Дрокин, В.А. Тимашов // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – № 9. – С. 78–81.
430. Балханов В. К. Электрические свойства подстилающей среды с учетом фрактального распределения проводимости / В.К. Балханов, Ю.Б. Башкуев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2004. – № 7. – С. 34 -38.
431. Коломенский Е.Н. Об информационно-энтропийном анализе структурообразования глинистых грунтов. / Е.Н. Коломенский, В.А. Королёв // Инженерная геология. – 1982. – № 5. – С. 34-45.
432. Джейнс Э.Т. О логическом обосновании метода максимальной энтропии // ТИИЭР. – 1982. – Т.70. – № 9. – С. 33-51.
433. Болтинцев В.Б. Обработка результатов измерений на основе информационного подхода к выбору гипотезы о виде их закона распределения / В.Б. Болтинцев, И.Ю.Лютынский, А.А. Чапчай // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1990. – № 3(33). – С.67-68.
434. Болтинцев В.Б. Геофизические методы для оценки инженерно-геологических условий и устойчивости пород впереди забоя во время сооружения тоннелей / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный, С. Я. Нагорный, К. А. Крикленко, А. П. Скакун // Труды Международной конференции "Тоннельное строительство России и СНГ в начале века". – М.: 2002. - С. 441-444.
435. Шварцбург А.Б. Видеоимпульсы и непериодические волны в диспергирующих средах (точно решаемые модели) // Успехи физических наук.-1998. -Т. 168.- №1. – С. 85 -103.
436. Третьяков О.А. Метод модового базиса // Радиотехника и электроника. – 1986. – Т. 31. – № 6. – С. 1071-1082.

437. Салий И. Н. Новые решения для матричных параметров нерегулярных линий передач / И. Н. Салий, С. А. Салий, Г. И. Перельмутер // Радиотехника и электроника.- 1985. -Т. 3.- № 8. – С.1505 – 1512.
438. Nicolson A.M. The measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques / A.M. Nicolson, G.F. Ross // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1970. – Vol. 9. – P. 377-382.
439. Grossman A. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape / A. Grossman, J. Morlet // SIAM J. Math. – 1984.– P.723-736.
440. Sun E. Time-domain physical-optics / E. Sun, W. Rusch // IEEE Trans. Ant. Propag. – 1994. – V. 42. – №. 1. – P. 9-15.
441. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высш. Школа, 1985. – 351 с.
442. Свешников А.Г. К обоснованию метода расчета нерегулярных волноводов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1963. – Т.3. № 1. – С. 170-179.
443. Электрические свойства бетона / А. Ф. Бернацкий, Ю. В. Целебровский, В. А. Чунчин / под ред. Ю. Н. Вершинина. – М.: Энергия. – 289 с.
444. Morgenrother K. On the Instability of Resonances in Parallelplane Waveguides / K.Morgenrother, P. Werner // Mathematical Methods in the Applied Sciences. – 1989. – V.11. – P. 279-315.
445. Галамбош Я. Асимптотическая теория экстремальных порядковых статистик. – М.: Наука, 1984. – 304 с.
446. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
447. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол / пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 408 с.
448. Венецкий И.Г. Основные математико-статистические понятия и формулы / И.Г.Венецкий, В.И. Венецкая – М.: Статистика. 1979. – 447с.

449. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Сов. радио. 1976. – 576 с.
450. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. – М: Изд. иностр. лит., 1956. – 664 с.
451. Справочник по теории вероятности и математической статистике / под ред. В. С. Королук. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
452. Риордан Дж. Введение в комбинаторный анализ. – М.: Физ.-мат. лит., 1963. – 380 с.
453. Мудров В.И. Методы обработки измерений: квазиправдоподобные оценки / В.И.Мудров, В.Л. Кушко – М.: Сов. Радио, 1976. – 192 с.
454. Edwin T. Jaynes On The Rationale of Maximum – Entropy Methods // IEE. September 1982. – V. 70. – № 9. - P. 939-952.
455. Dewar R. Information Theory Explanation of the Fluctuation Theorem, Maximum Entropy Production and Self-Organized Criticality in Non-Equilibrium Stationary States. // J.Phys.A: Math. Gen. – 2003. – V.36. – № 3. – P.631-641.
456. Зорич В.А. Математический анализ задач естествознания. – М.: МЦНМО, 2008. – 136 с.
457. Kullback S. On information and sufficiency / S. Kullback, R.A. Leibler // The Annals of Mathematical Statistics. – 1951. – V.22. – №1. – P. 79-86.
458. Санов И.Н. О вероятностях больших отклонений случайных величин. // Матем. сб. – 1957. – Т. 42. – Вып. 1. – С. 11-44.
459. Аджиев С.З. Временные средние и экстремали Больцмана для марковских цепей, дискретного уравнения Лиувилля и круговой модели Каца / С.З. Аджиев, В.В.Веденяпин // [Журнал вычислительной математики и математической физики](#). – Ноябрь 2011. – Том 51. – № 11. – С. 2063-2074.
460. Elements of Information Theory. Second Edition / Thomas M. Cover, Joy A. Thomas – July 2006. – Hardcover. – 776 p. ISBN: 0-471-24195-4

461. Tagliani A. Note on Proximity of Distributions in Terms of Coinciding Moments // *Applied Mathematics and Computation*. – 2003. – 145. – P. 195-203.
462. Jordan M.I. On convergence properties of EM algorithm for Gaussian mixtures / M.I.Jordan, L. Xu // *Neural Computation*. – 1996. – Vol. 8. – P. 129-151.
463. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований. – М.: Сов. Радио, 1978. – 376 с.
464. Гасников А.В. О возможной динамике в модели расчёта матрицы корреспонденций (А. Дж. Вильсона) / А.В. Гасников, Е.В. Гасникова // ТРУДЫ МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 4. – С. 45-54.
465. Вильсон А.Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 248 с.
466. Titterington D.M. Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions / D.M.Titterington, A.F. Smith, U.E. Makov. – Chichester-New York-Brisbane Toronto-Singapore: John Wiley and Sons, 1985. – 243 p.
467. Хармут Х. Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи / пер. с англ. 1985. – 370 с.
468. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
469. Янке Е. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш – М.: Наука, 1977. – 344 с.
470. Королёв В.Ю. EM-алгоритм, его модификации и их применение к задаче разделения смесей вероятностных распределений. – М.: Изд-во ИПИ РАН, 2007. – 94 с.
471. Teicher H. Identifiability of finite mixtures // *The Annals of Statistics*. – 1963. – V. 34. – No. 4. – P. 1265-1269.
472. Teicher H. On mixture of distributions // *The Annals of Math. Statistics*. – 1960. – V. 30. – P. 55-73.

473. Teicher H. Identifiability of mixtures // *The Annals of Math. Statistics.* – 1961. – V. 32. – P. 244–248.
474. Исаенко О.К. Разделение смесей распределений вероятностей на их составляющие / О.К. Исаенко, В.Ю. Урбах // *Итоги науки и техники. Теория вероятностей, мат. статистика и теор. кибернетика.* – М.: Изд. ВИНТИ. – 1976. – С. 37-58.
475. Круглов В.М. Смесии распределений вероятностей // *Вестник МГУ. Серия 15. ВМК.* – 1991. – №2. – С. 3-15.
476. Prakasa Rao B.L.S. *Identifiability in Stochastic Models.* – Boston-San Diego-New York-London Sydney-Tokyo-Toronto: Academic Press, 1992. – 253 p.
477. Закс Л.М. Обобщённые дисперсионные гамма – распределения как предельные для случайных сумм / Л.М. Закс, В.Ю. Королёв // *Информатика и её применение.* – 2013. – Т. 7. – Вып. 1. – С. 105-115.
478. Дуб Дж. Л. *Вероятностные процессы.* – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 605 с.
479. Бартлетт М. С. *Введение в теорию случайных процессов.* – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. – 384 с.
480. Андерсон Т. *Статистический анализ временных рядов,* М.: Мир, 1976. – 756 с.
481. Яглом А.М. *Корреляционная теория стационарных случайных процессов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 280 с.
482. ГОСТ 16465-70. *Сигналы радиотехнические. Термины и определения.*
483. Гихман И.И. *Введение в теорию случайных процессов / И.И. Гихман, А.В.Скорород* – М.: Наука, 1977. – 568 с.
484. В.В. Mandelbrot. *The variation of some other speculative prices // J. Business.* – 1967. – V. 40. – P. 393-413.
485. Fama E. *The behavior of stock market prices // J. Business.* – 1965. – V. 38. – P. 34- 105.

486. Прудников А.П. Интегралы и ряды. Том 3. Специальные функции. Дополнительные главы. - 2-е изд. / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
487. Bownik M. Meyer Type Wavelet Bases in  $R^2$  / M. Bownik, D. Speegle // J. of Approx. Theory. –2002. – V. 116. – P. 49-75.
488. Королёв В.Ю. Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. – 512 с.
489. Yovits M.C. Linear filter optimization with game theory considerations / M.C. Yovits, J.L. Jackson // IRE National Convention Record. – 1955. – Pt.4. – P. 193-199,
490. Харкевич А.А. Спектры и анализ. Изд.5 –М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.
491. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. – М.: Радиотехника, 2003. – 510 с.
492. Королёв В.Ю. Статистическое разложение волатильности: новый метод анализа хаотических стохастических процессов, основанный на представлении смесью соответствующих конечномерных распределений // XXXV международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2008 г. - 2 с.
493. Lobo M. Boundary homogenization of certain elliptic problems for cylindrical bodies / M.Lobo, E. Perez // Bull. Soc. Math. Ser. 2. – 1992. – V. 116. – P. 399-426.
494. Чечкин Г. А. Усреднение краевых задач с сингулярным возмущением граничных условий. // Математический сборник. – 1993. – Т. 79. – № 6. – С. 99-150.
495. Борисов Д.И. Асимптотика и оценки скорости сходимости в трехмерной краевой задаче с частой сменой граничных условий //

Сибирский математический журнал. – Март-апрель 2004. – Т. 45. – № 2. – С. 275-294.

496. Ваксман В.М. Об условии Мейкснера на ребре // Теория функций, функциональный анализ и их приложения: Респ. науч. сб. / Харьковский государственный университет им. А.М. Горького.– Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1969. – Вып. 9. – С. 50 – 57.
497. J. Meixner. Die Kantenbedingung in der Theorie der Beugung elektromagnetischer Wellen an vollkommen leitenden ebenen Schirmen. Ann. Physik (6), 6:2–9, 1949.
498. Oliner A. A. Microwave Field and Network Techniques // Polinechnic Institute of Brooklin. 1963. - P. 32.
499. Курушин Е. П., Нефёдов Е. И. Электродинамика анизотропных волноводных структур. –М.: Наука, 1982. - 232 с.
500. Потапов А.А. Виральная теория деформационной поляризации, Электронный журнал «Исследовано в России», 186/031101. С. 2228 - 2241.
501. Osipov A.V., Norris A.N. The Malyuzhinets theory for scattering from wedge boundaries: a review. Wave motion. – 29. 1999. - P. 313- 340.
502. Norris A.N., Osipov A.V. Far-field analysis of the Malyuzhinets solution for plane and surfase waves diffraction by an imedance wedge. Wave motion, 30. 2000. -P. 69-89.
503. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / П.Я. Уфимцев/ пер. с англ. А. В. Капцова. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 366 с.
504. Нефёдов Е.И., Сивов А.Н. К задаче дифракции на бесконечном однородном диэлектрическом клине. Препринт ИРЭ АН СССР №80, М., 1971. - 13 с.
505. Нефёдов Е.И., Сивов А.Н. Геометрооптическое решение задачи о диэлектрическом клине. / РиЭ, 1974. -Т.19. - №4. - С. 824-827.

506. Нефёдов Е.И. Дифракция электромагнитных волн на диэлектрических структурах. М.: Наука, 1979. - 272 с.
507. Малюжинец Г. Д. Возбуждение, отражение и излучение поверхностных волн на клине с заданными импедансами граней // Докл. АН СССР. 1958. -Т. 121. -№ 3. - С. 436-439.
508. Лялинов М. А. Дифракция плоской электромагнитной волны, падающей наклонно на ребро импедансного клина: единственность классического решения// Математические вопросы теории распространения волн. 29, Зап. научн. сем. ПОМИ, СПб. – 2000. -С. 189–196.
509. Зоммерфельд А. Электродинамика / пер с нем. Изд-во: Иност. Лит., 1958. - 505 с.
510. Itoh T., Mittra R. Spectral-domain approach for calculating the dispersion characteristics of microstrip lines/ /IEEE Trans. MMT, 1973. -V. 21.- № 7. -P. 496 -499.
511. Van de Capelle A.R., Luypaert P.J., Lenken K.U. A computer analysis of the discrete mode spectrum open microstrip transmission lines. – In: Proc. IEEE Int. Microwave Symp.. - 1978. -P. 413 -415.
512. Kuester E. F., Chang D. C. Some recent theoretical studies on open microstrip. - In: Proc. IEEE Int. Microwave Symp.. – 1979. -P. 325 -328.
513. Заргано Г.Ф., Лерер А.М., Ляпин А.М., Синявский Г.П. Линии передачи сложных сечений. - Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1983. - 320 с.
514. E. Yamashita, K. Atsuki and T. Ueda, “An Approximate Dispersion Formula of Microstrip Lines for Computer Aided Design of Microwave Integrated Circuits”, IEEE Trans Microwave Theory and Techniques.-Vol. 27, 1979. -P. 1036-1039,
515. Getsinger W. J. Dispersion of parallel-coupled microstrip.- IEEE Trans. Microwave Theory Tech. -Vol. MTT-21. – 1973. -P. 144 - 145.

516. Kirschning M., Jansen R. H. Accurate Wide-range Design Equations for The Frequency-Dependent Characteristic of Parallel Coupled Microstrip Lines. - IEEE Trans. On micro wave theory and techn. 1984. -V. MTT-32. - № 1. - P. 83 -90.
517. Щукин А.Н. Распространение радиоволн. - М.: Связьиздат, 1940. -399 с.
518. Бузова М.А. Некоторые свойства ядер уравнения Фредгольма второго рода / Вестн. Сам. гос. Тех ун-та . Сер. Физ. – мат. науки, 2011, выпуск 1(22).-С.28-33.
519. Свешников А.Г. Теория функций комплексных переменных / А. Г. Свешников, А. Н. Тихонов // Курс высшей математики и математической физики. – 1974. – 320 с.
520. Токарский П.Л., Панченко Ю. А. Математическая модель системы проволочных излучателей, расположенных над границей раздела двух сред // Радиотехника. 2008, Харьков. нац. универ. РЭ, Вып. 155. - С. 311-319.
521. Бондаренко Н.Ф. Физика движения подземных вод.-Л: Гидрометеиздат, 1973. – 217 с.
522. Власов В.М. Применение метода сверхширокополосного зондирования при обследовании инженерных сооружений / В. М. Власов, В. Н. Ильяхин, В. Б. Болтинцев, П. В. Кондратенко // Научно - технич. и произв. сб. статей «Безопасность энергетических сооружений», вып. 14. – М.: 2004. - С.129-138.
523. Болтинцев В.Б. Применение метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно-геологических изысканиях/ В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный, С. Я. Нагорный, А. А.Черемисин // Инженерная геология.- 2006. - № 2. - С. 72-76.

524. Черемисин А.А. Применение петрофизических моделей при мониторинге подземного пространства вперёд забоя методом ЭМИ СШП зондирования на примере строящихся тоннелей в г. Сочи / А. А. Черемисин, В. Б. Болтинцев, С. В. Андрианов // Труды VII Международной конференции «Инженерная геофизика». –М.: -2011. -С. 104-106.
525. Andrianov S. EMI UWB SOUNDING FOR OIL SHALE PROSPECTING/ S. Andrianov, V. Boltintsev, B. Ilyakhin, R. Salikhov // <http://www.iirpresentations.com/AY2021/pdf/D1-Seymon-Andrianov.pdf>
526. Безродный К.П. Опережающее забой тоннеля изучение инженерно – геологических и гидрогеологических условий / К. П. Безродный, Ю. С. Исаев, А. Д. Басов, К. В. Романевич, В. Б. Болтинцев, В.Н. Ильяхин, С.В.Андрианов // Инженер и промышленник сегодня. – 2012. -№ 3 (13), октябрь. -С. 32 - 37.
527. Болтинцев В.Б. Подводный вариант комплекса электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Инженерные изыскания. -2013, № 12. – С.8-12.
528. Кумулянтная обработка сигналов сверхширокополосной радиолокации. Баев А.Б., Кузнецов Ю.В., Александров А.В. 4-я Международная Конференция DSPA-2002, «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Proceedings of the 4th International Conference “Digital signal processing and its applications”.
529. Cook, A.C. and N.R. Sherwood, 1981, Classification of Oil Shale, Centres de recherches Exploration-Production Elf-AlfAquitane, 5. -P.353-381.
530. Zellner A., Highfield A. R. Calculation of Maximum Entropy Distributions and Approximation of Marginal Posterior Distributions. Journal of Econometrics, 37, 1988. -P.195-209
531. Болтинцев В. Б. Восстановление поля в дальней зоне антенны подповерхностного зондирования (импульсная амплифазометрия) // П

Всероссийская Микроволновой конференция: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2014. –Т. I. - С.509-513.

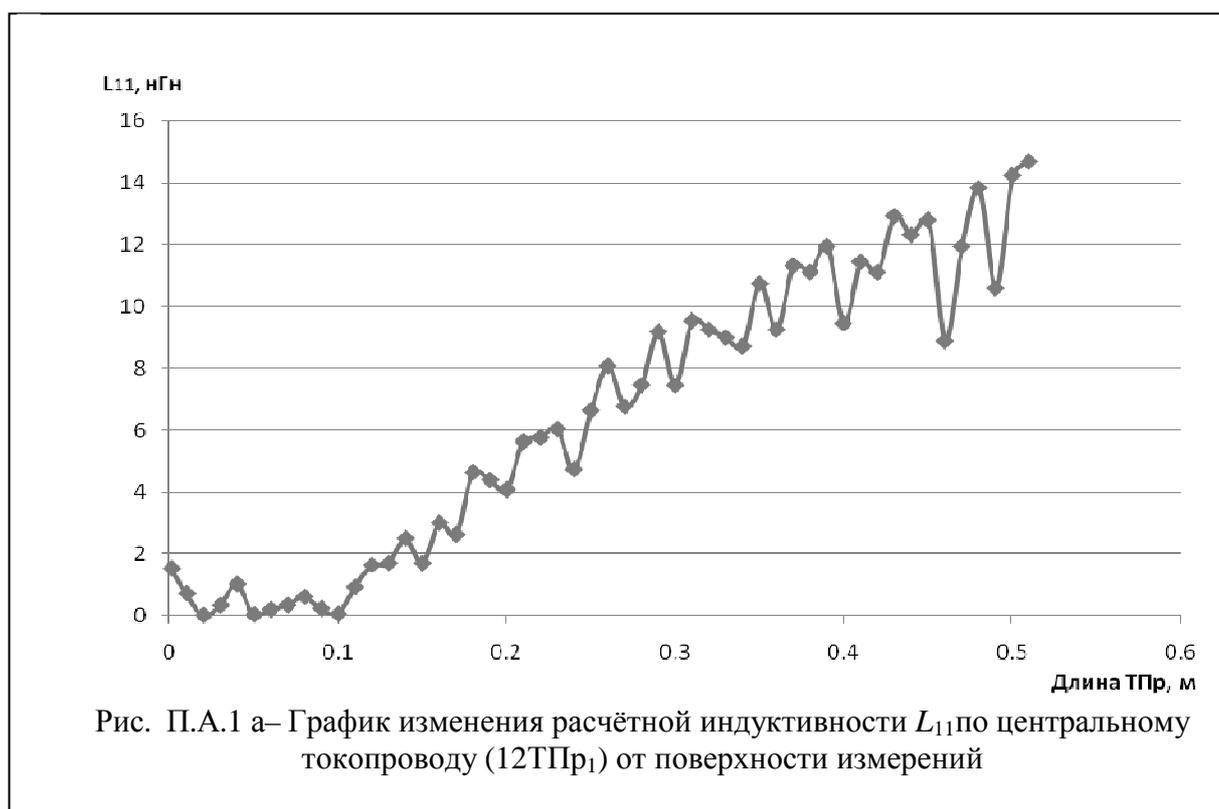
## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

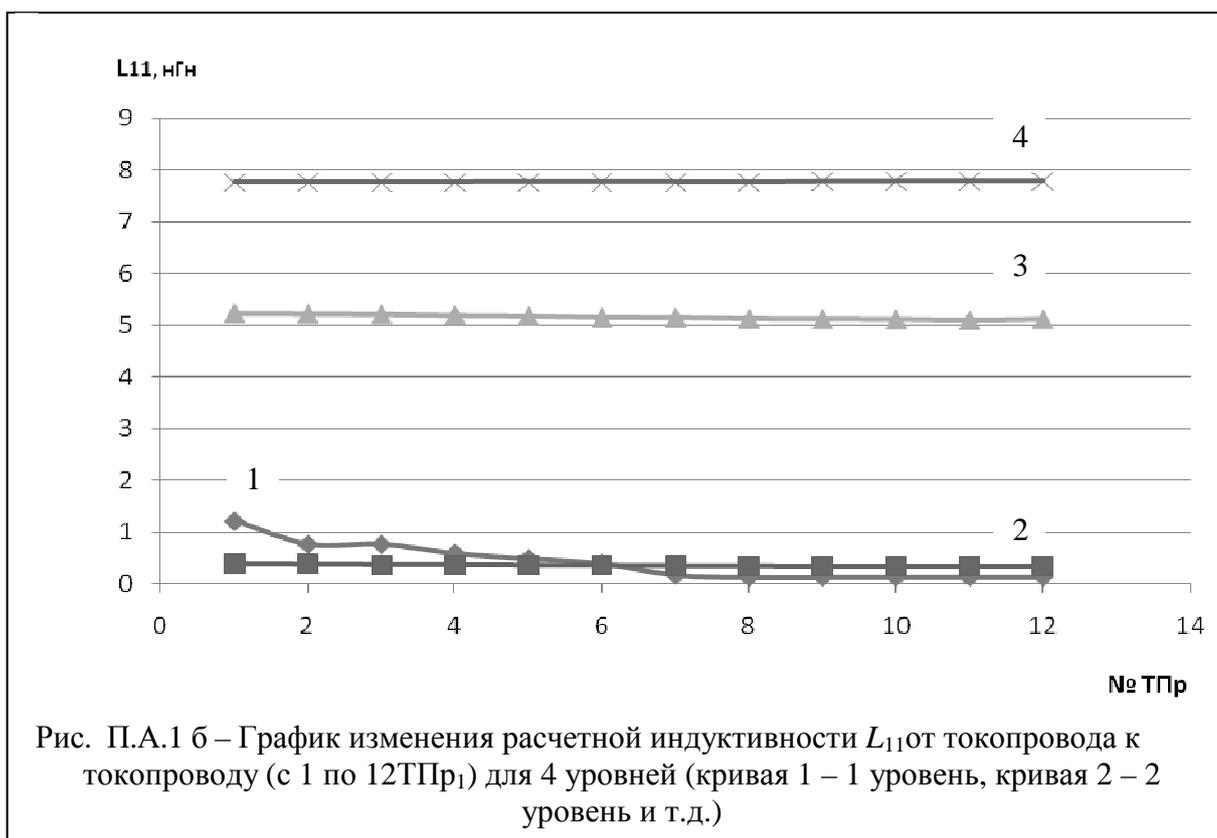
#### Порядок расчёта взаимной индуктивности несимметричной МПА

В случае с реальной антенной (рис. 3.5, 3.6):

1. Для нахождения собственной индуктивности на одном из двух симметричных лепестков ( $L_{11} = L_{22}$ ) проведены измерения ширины токопроводов и щелей на определенных высотах, а также расстояний между крыльями (высоты от токопровода к токопроводу изменялись в зависимости от удаленности линии от центральной оси). Затем проведены измерения и расчет индуктивности для лепестковой антенны по длине центрального токопровода ( $12ТПр_1$ ) от поверхности измерений до оголовка антенны с шагом 0.01 м. С полученными данными выполнены расчеты по формуле (3.12) и получен график  $L_{11}$  (рис. П.А.1 а).

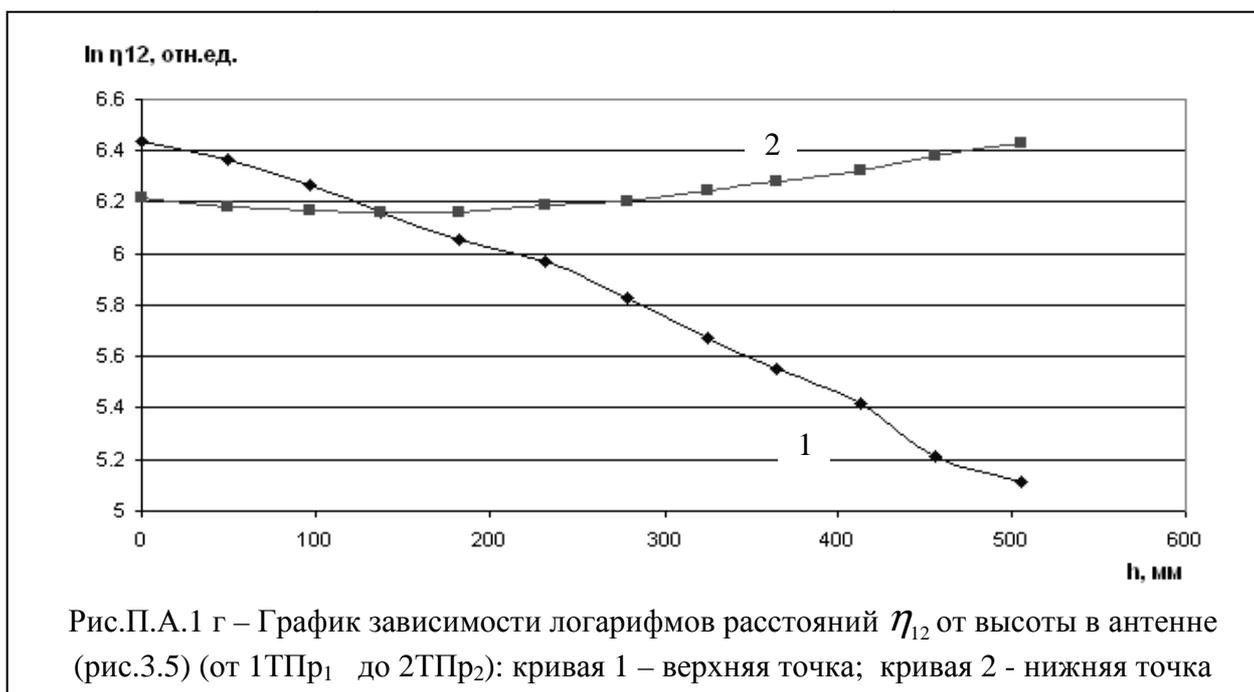
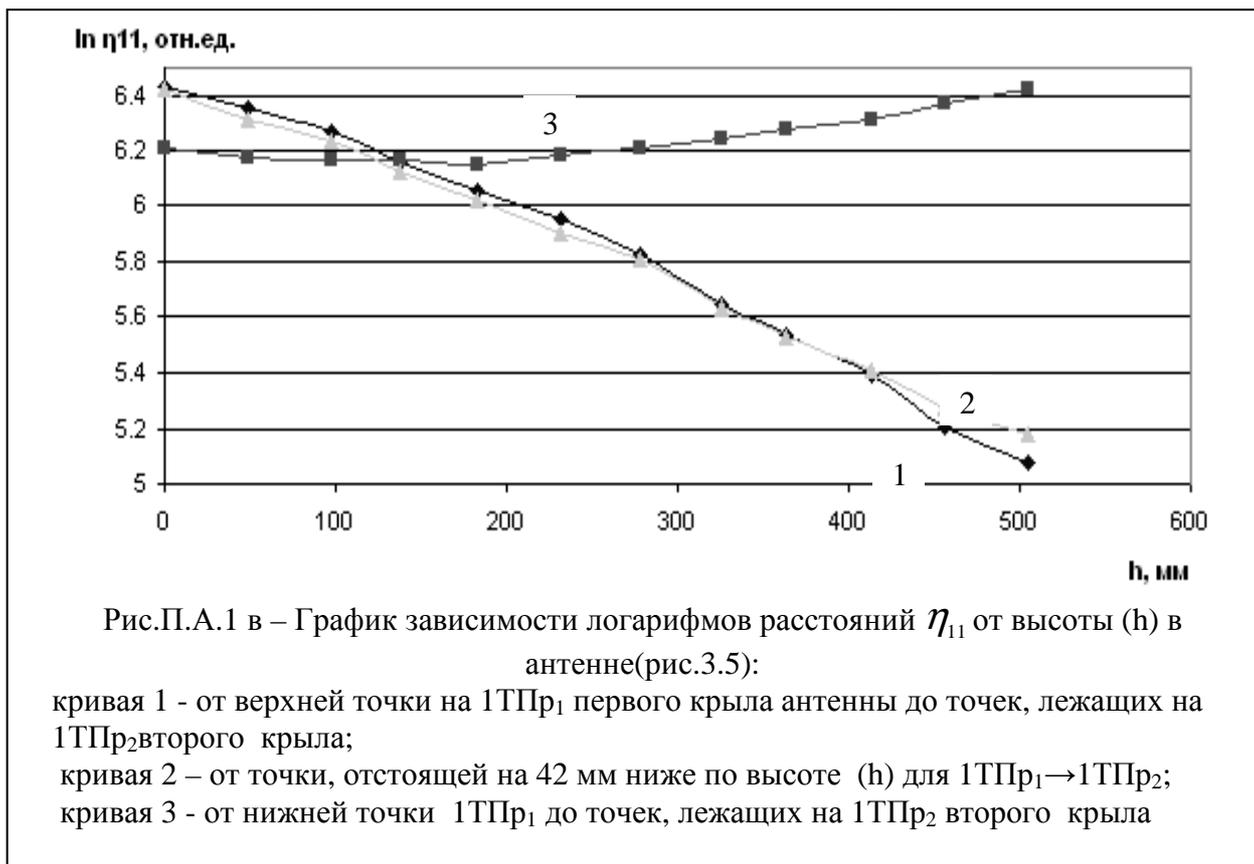


Изменение индуктивности  $L_{11}$  от токопровода к токопроводу на 4 уровнях (высоты уровней:  $h_1=0.001$  м,  $h_2=0.086$  м,  $h_3=0.182$  м,  $h_4=0.267$  м) приведены на рис. П.А.1 б.



2. Для нахождения взаимной индуктивности  $L_{12}$  по формуле (3.11) (изменение  $L_{12}$  вдоль крыла антенны, т.е. вклад каждого из токопроводов, учитывается при расчете полной индуктивности) проведены прямые измерения расстояний между токопроводами (ТПр):  $\eta_{(11)}$  – расстояние от первого токопровода первого крыла 1ТПр<sub>1</sub> до первого токопровода второго крыла 1ТПр<sub>2</sub>,  $\eta_{(12)}$  – расстояние от первого токопровода первого крыла 1ТПр<sub>1</sub> до второго токопровода второго крыла 2ТПр<sub>2</sub>, и т.д.

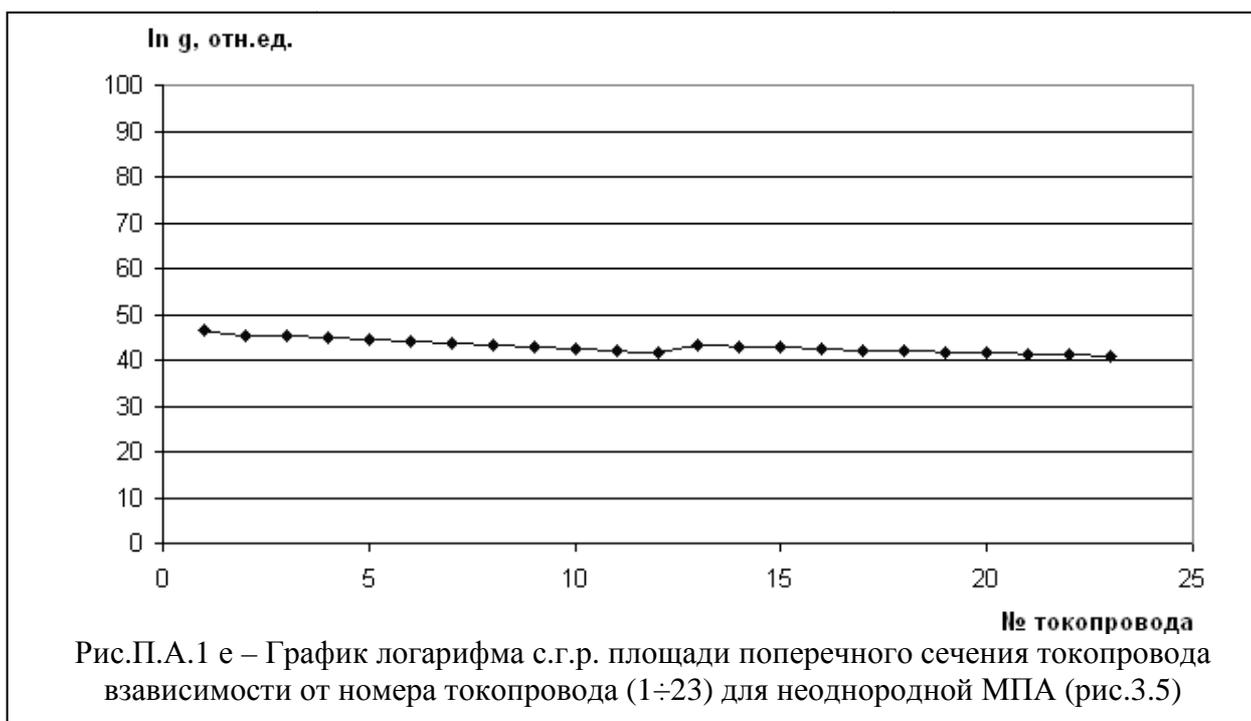
Нарис. П.А.1в приведен график  $\ln$  расстояний  $\eta_{(11)}$  от точек на первом токопроводе (1ТПр<sub>1</sub>) первого крыла антенны до точек, лежащих на 1ТПр<sub>2</sub> второго крыла, нарис. П.А.1г – зависимость  $\ln \eta_{(12)}$  от высоты в антенне между точками первого токопровода первого крыла (1ТПр<sub>1</sub>) и точками второго токопровода второго крыла (2ТПр<sub>2</sub>).



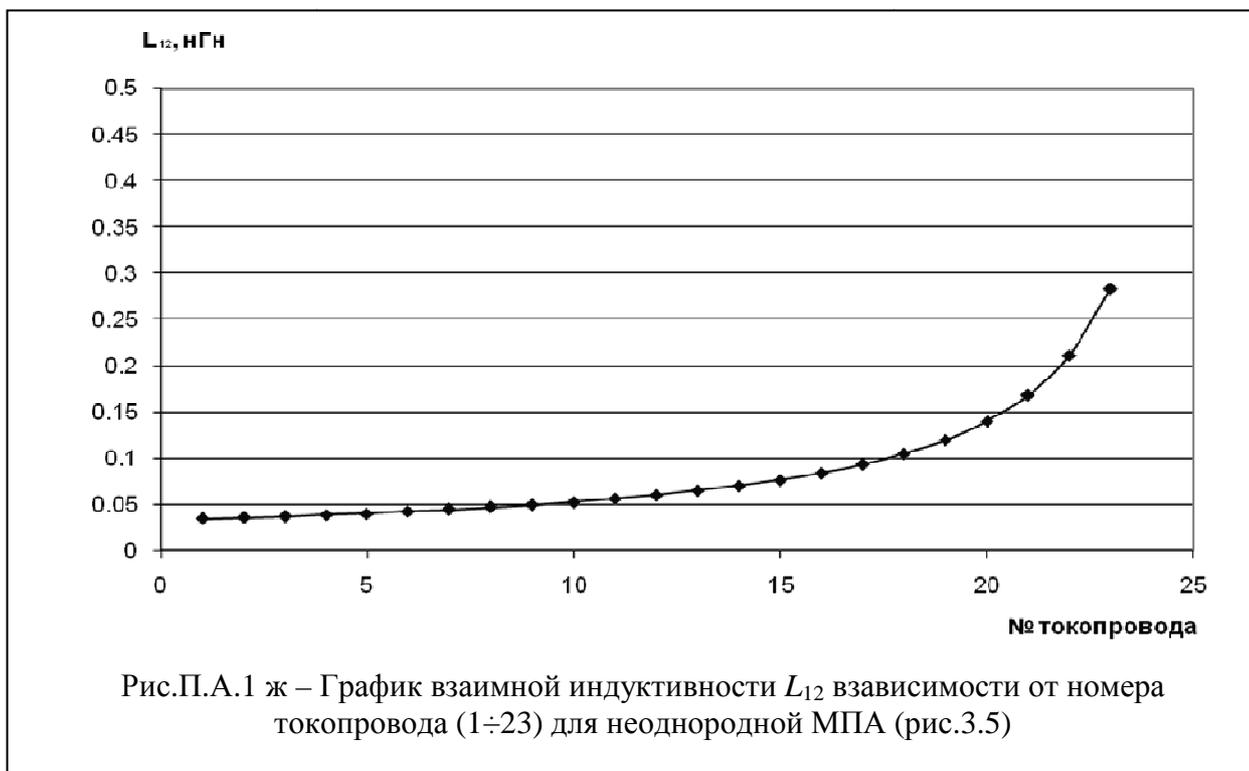
Очевидно, что интеграл между кривой 1 и кривой 3 (рис. П.А.1в) и между кривой 1 и кривой 2 (рис. П.А.1г) есть интеграл по площади  $S_2$  из формулы (3.11), который вычислялся методом трапеции (рис. П.А.1д).



После интегрирования по площади  $S_1$  построен график логарифма с.г.р. площади поперечного сечения токопровода, приведенный на рис.П.А.1 д, а затем – график взаимной индуктивности  $L_{12}$  в зависимости от номера токопровода (рис.П.А.1е).

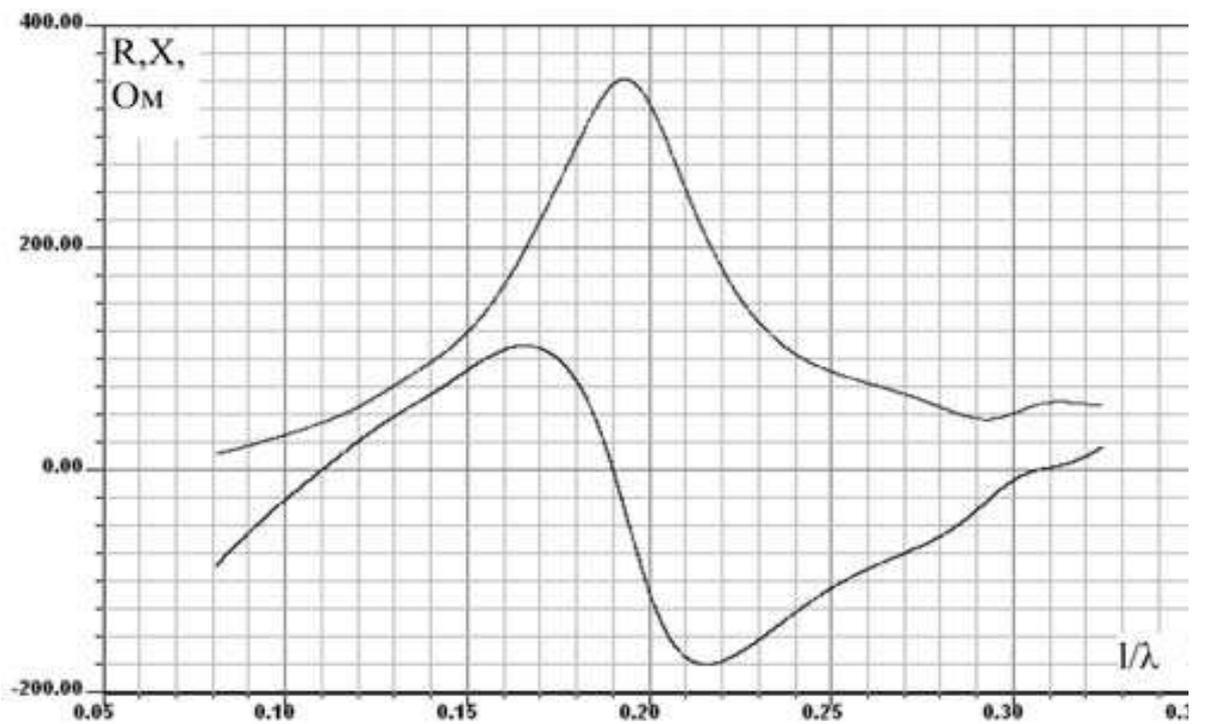
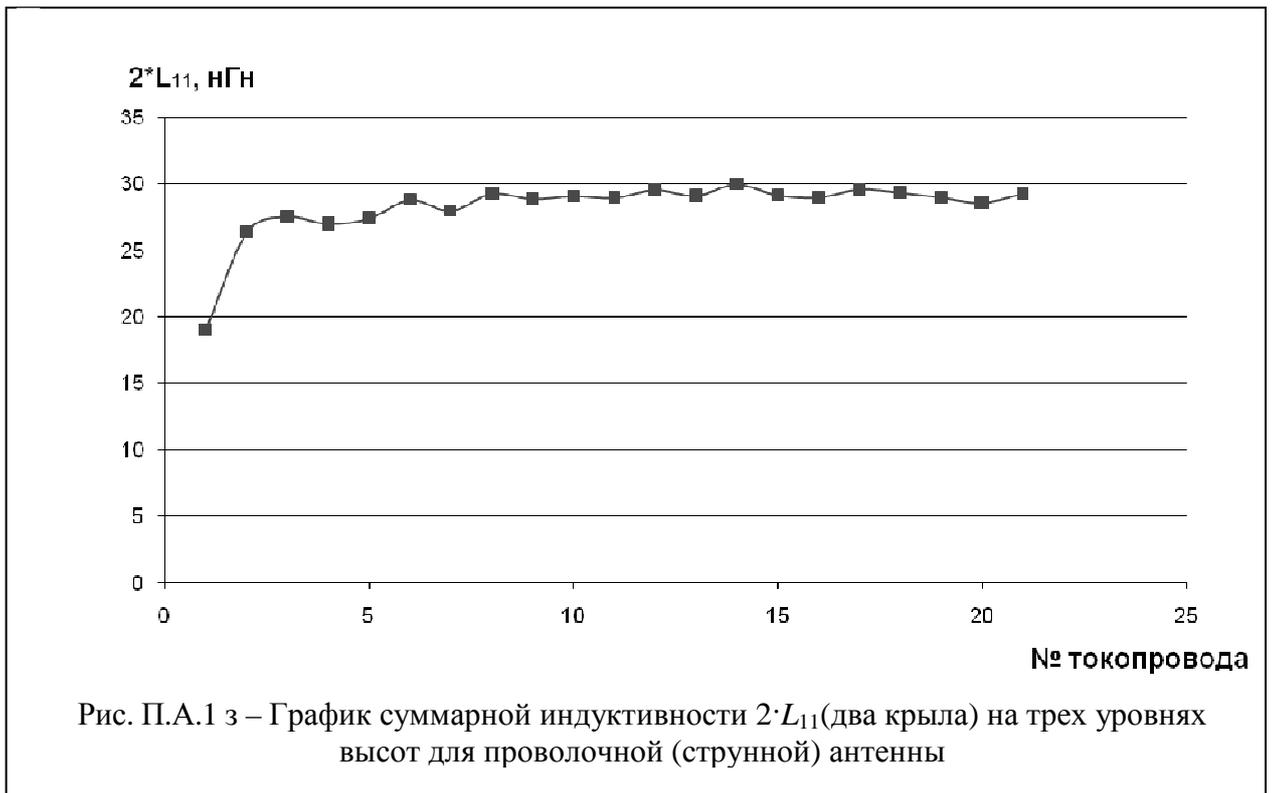


Интегрированное по длине неоднородной МПА значение взаимной индуктивности для лепестковой антенны  $L_{12} \sim 0.98 \text{ нГн}$ , график приведен на рис. П.А.1 ж.



3. Далее была рассчитана полная индуктивность двухлепестковой антенны:  $L_{\text{расч}} = 2 \cdot L_{11} + L_{12}$ . Суммарная индуктивность, рассчитанная по реальной антенне, получилась равной  $L_{\text{расч}} = 14.94 \text{ нГн}$ , в то время как измеренная с помощью прибора ОБЗОР-103 индуктивность той же антенны, установленной на песке,  $L_{\text{изм}} = 16.65 \text{ нГн}$ . Погрешность составляет 5.4 %, что находится в пределах допустимой погрешности измерений (8 %).

4. График суммарной индуктивности на трех уровнях высот для проволочной (струнной) антенны приведен на рис. П.А.1 з.



## Приложение В

### Электродинамическое приближение

Основное отличие несимметричной полосковой линии от симметричной полосковой линии состоит в том, что распространяющаяся в ней основная волна (Т-волна) обладает «волноводным характером», т.е. имеет достаточно заметную дисперсию. Это обстоятельство особенно сказывается при проектировании и реализации разнообразных резонансных структур типа, например, полосовых фильтров [373]. Продольное волновое число  $k$  обладает спектром собственных значений, состоящим из двух множеств:

а) конечное множество дискретных собственных значений, соответствующих конечному числу волн различных типов, включающее основной тип волны («дискретный» спектр). В нашем случае – 23 (по числу полосок) для антенны типа « $\chi \rightarrow \min$ »; 9 - для антенны типа «меандр» ( $\rho = \Delta$ ); в монографии «Daniels, D. J. GroundPenetrationRadar» их число - 41;

б) последовательность собственных значений, соответствующих полю излучения («непрерывный» спектр излучаемого импульса).

Дискретные волны не являются чисто волнами Е- и Н-типов, а представляют собой гибридные волны. Поэтому для их определения необходимо решать уравнение Гельмгольца для продольных составляющих поля:

$$\nabla^2 \begin{Bmatrix} E_z \\ H_z \end{Bmatrix} + k^2 \begin{Bmatrix} E_z \\ H_z \end{Bmatrix} = 0, \quad (\text{П.В1})$$

$$\text{где } k = \begin{cases} \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0, & y > d, \\ \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r, & y \in [0, d]. \end{cases}$$

В плоскости  $y=0$  продольные составляющие поля должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$E_z(x, y=0, z) = 0, \quad \partial H_z(x, y=0, z) / \partial y = 0. \quad (\text{П.В2})$$

На границе «подложка – пространство» тангенциально составляющие поля должны быть непрерывны:

$$\begin{aligned} E_{x1} &= E_{x2}, H_{z1} - H_{z2} = I_x, \\ E_{z1} &= E_{z2}, H_{x1} - H_{x2} = -I_z, \end{aligned} \quad (\text{П.В3})$$

где индекс 1 относится к области  $y > d$ , а индекс 2 – к области подложки, т. е.  $y \in [0, d]$ . Полосковый проводник заменяется неизвестным эквивалентным распределением тока, равным

$$I(x, y, z) = \begin{cases} [I_z(x) \cdot e_z + I_x(x) \cdot e_x] e^{-i \cdot k \cdot z}, & |x| \leq w/2, \\ 0, & |x| > w/2. \end{cases}$$

После применения комплексного преобразования Фурье к (П.1) и перехода от действительной переменной  $x$  к комплексному волновому числу  $k$ , необходимо удовлетворить условиям (П.В2) и (П.В3).

Для полоскового проводника граничные условия можно записать следующим образом ( $|x| \leq w/2$ ):

$$E_z(x, y=d, z) = 0, \partial H_z(x, y=d, z) / \partial y = 0.$$

Эти условия, применимые только для действительных значений переменной  $x$ , приводят к интегральному уравнению, связывающему распределение токов  $I_z(x)$  и  $I_x(x)$ , для каждого собственного значения продольного волнового числа  $k$ :

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} K_{1x} \cdot I_x(k) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x} \cdot dk - \int_{-\infty}^{\infty} K_{2z} \cdot I_z(k) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x} \cdot dk - \\ - \int_{-\infty}^{\infty} K_{2x} \cdot I_x(k) e^{-i \cdot k \cdot x} \cdot dk + \int_{-\infty}^{\infty} K_{1z} \cdot I_z(k) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x} \cdot dk = 0, \end{aligned} \quad (\text{П.В4})$$

где функции  $I_x(k)$  и  $I_z(k)$  есть комплексные преобразования Фурье неизвестных составляющих тока  $I_x(x)$  и  $I_z(x)$ . Полное решение этого уравнения даёт бесконечное число возможных дискретных типов волн, но на каждой данной частоте существует только конечное число волн различных типов.

Для решения (П.В4) существует несколько методов, выбор которых определяется необходимой точностью расчёта. Так, если необходимо рассмотреть только основной тип гибридной волны, то можно использовать метод спектрального разложения [510].

Расчёт, проведенный в [511] для четырёх высших типов волн, основывается на предположениях, что поперечная составляющая тока  $I_x(x)$  пренебрежимо мала и заряд в полосковом проводнике распределен согласно функции Максвелла [373]. Тогда применение комплексного преобразования Фурье приводит к тому, что функции распределения тока  $I_z(x)$ , соответствующие высшим типам волн, описываются функциями Бесселя первого рода.

Ещё более точное решение можно получить в случае, когда составляющие тока после применения комплексного преобразования Фурье представляются полиномами Лежандра либо Чебышева [512, 513].

Таким образом, поскольку в НЛП распространяется не чистая  $T$ -волна, то волновое сопротивление линии и эффективная диэлектрическая проницаемость подложки изменяются с изменением частоты. Существует несколько возможных путей учета дисперсии в НЛП. Например, в результате решения интегрального уравнения, связывающего распределение токов  $I_z(x)$  и  $I_x(x)$ , получено, что дисперсия приводит к изменению значения постоянной распространения основного типа волны по следующему закону [514]:

$$k/k_0 = (\sqrt{\varepsilon} - k_T/k_0) \cdot (1 + 4 \cdot F^{-3/2})^{-1} + k_T/k_0,$$

где

$$F = 4 \cdot (d/\lambda_0) \sqrt{\varepsilon - 1} \{0.5 + [1 + 2 \cdot \lg(1 + w/d)]^2\},$$

$k_T$  - постоянная распространения, полученная в  $T$ -приближении [515, 516] с погрешностью в определении эффективной диэлектрической проницаемости подложки  $\leq 0.7\%$  [516], изменение которой по частоте учитывает дисперсию в НЛП.

### Результаты голографического восстановления поля в дальней зоне для тонкопроволочной (струнной) антенны

На рис. П.С.1 представлен внешний вид излучающей «на просвет» тонкопроволочной (струнной) антенны. Антенна «нагружена» на бетонную поверхность.



Рис. П.С.1 – Излучающая «на просвет» антенна м-диапазона (струнная)

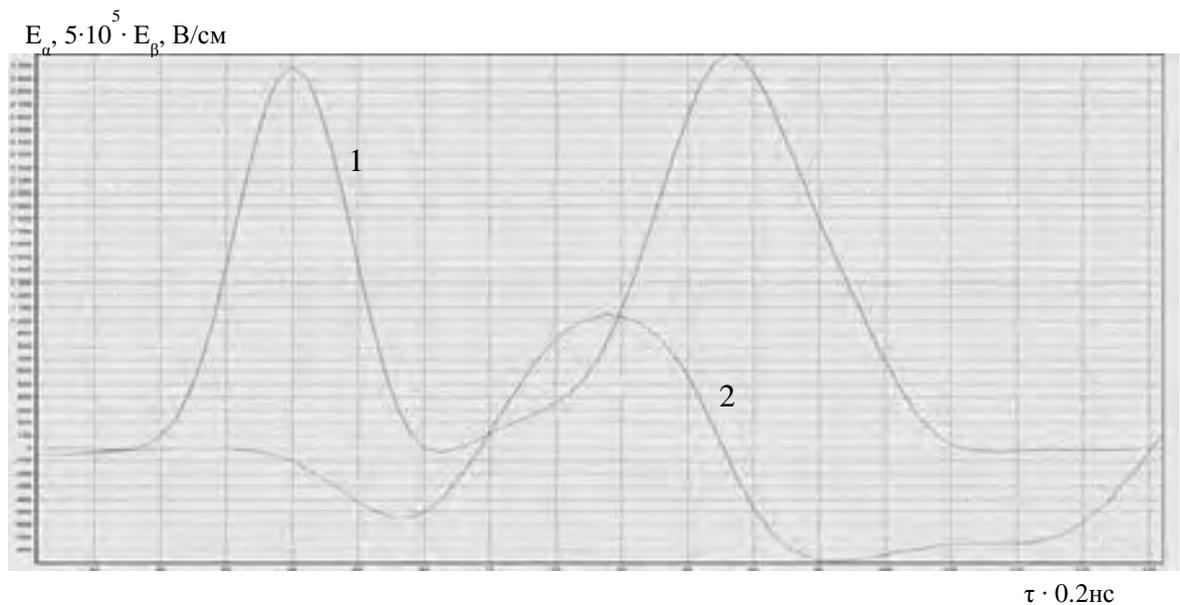


Рис. П.С.2 – Составляющие  $E_\alpha$  (кривая 1) и  $E_\beta$  (кривая 2) вектора электрического поля в дальней зоне. Измерения  $E_x$ ,  $E_y$  на бетоне (рис. П.С.1)

Результаты восстановления поля в дальней зоне по полю, измеренному на плоскости, представлены на рис. П.С.2. Здесь  $A=Const=1$ ,  $k=0.016 \text{ м}^{-1}$  (бетон). Площадь сканирования  $S$  больше площади раскрыва антенны.

## Приложение D

**Сингулярность данных ЭМИ СШП зондирования как связь  
многомодовости отражённого сигнала с его эмпирическим  
распределением**

Задача зондирования подстилающей среды во многом схожа с вопросом усреднения задач с частым чередованием граничных условий, которым посвящено достаточно много работ [494, 495]. Как правило, основным результатом является определение вида предельных (усреднённых) задач и, по возможности, получение оценок скорости сходимости.

В [495] предполагается трехмерная краевая задача с частой сменой типа граничных условий, решения которой сходятся к решениям задач с классическими краевыми условиями, чей тип определяется соотношением мер частей границы с различными условиями в исходной задаче.

Данная задача относится к сингулярно возмущенным краевым задачам на собственные значения оператора Лапласа в цилиндре с частой сменой типа граничного условия на боковой поверхности [495].

Смена граничных условий задается путем разбиения боковой поверхности на большое число узких полос, на которых поочередно задаются условия Дирихле и Неймана.

Поскольку уравнения электродинамики, описывающие ЭМИ СШП зондирование многослойной трехмерной среды, принадлежат уравнениям Пуассона, условия Дирихле и Неймана выполняются по определению (по типу используемого сигнала). Как худший из вариантов – цилиндр, расходящийся вниз<sup>1</sup>. Это решение справедливо для потенциала объемных масс, потенциала простого слоя и, самое главное, потенциала двойного слоя.

---

<sup>1</sup>Хотя задача Дирихле не всегда разрешима для пространственных областей, гомеоморфных шару (при наличии достаточно острого входящего в область острия границы - острие Лебега), т.е. существуют такие непрерывные функции  $\varphi^+(x)$ ,  $x \in dG$ , для которых задача Дирихле неразрешима никаким способом, Винер в рамках решения задачи Дирихле для уравнений Лапласа показал, что задача разрешима, поскольку ему удалось свести краевые задачи для эллиптических уравнений к ИУ.

Такое разложение стало возможным после исследований усреднения уравнения Пуассона с граничными условиями:

$$\frac{\partial \varphi_\varepsilon}{\partial \nu} = 0, \quad x \in \omega_\varepsilon \cup \Gamma_\varepsilon.$$

Здесь  $\nu$  – внешняя нормаль к границе  $\partial\Omega$ , а множество  $\Gamma_\varepsilon$  определяется как дополнение  $\bar{\gamma}_\varepsilon$  до боковой поверхности  $\Sigma$ . Установлено, что при выполнении равенства

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \log \eta(\varepsilon) = 0,$$

решение такой задачи сходится в норме  $H(\Omega)$  к решению того же уравнения Пуассона с прежними граничными условиями на основаниях и граничным условиям Дирихле на боковой поверхности<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Решение задачи через вычеты дано А. Г. Свешниковым.

### Заключение

на исследования, проведенные ЗАО НПФ «Геодизонд» на объекте «Капитальный ремонт основной нитки подводного перехода нефтепровода Ярославль-Кириши через р. Молога на 278км» в Новгородской области в мае 2002 года (заказчик ОАО «Гипротрубопровод»).

В соответствии с техническим заданием предусматривалось геофизическое обследование трассы подводного перехода нефтепровода через реку Молога методом сверхширокополосного (СШП) импульсного зондирования. Основные задачи: выявление локальных объектов (валуны размером 30-50см) в геологическом разрезе проектируемой трассы нефтепровода и уточнение положения геологических границ основных литологических разностей. Глубина зондирования 26-28м. Привязка к плану местности пунктов зондирования выполнялась с помощью рулетки посредством измерений расстояний до них от опорных пикетов профиля.

Компания «PLS Pipeline Services Ltd» проводила строительство перехода через реку Молога методом ННБ в июне-июле 2002 года.

Расширение скважины («от себя»). Осуществлялось с 27.06.02 до 16.07.02.

В интервале 90-100м отмечено снижение проходки в 3 раза, что связано с скоплением валунов – т. з. 127-132.

В интервале 95-105м (11 труба) потеря вращения (инструмент поджали от забоя на 8м и проработка этого интервала) – т. з. 130-132.

В интервале 105-135м, несмотря на постоянную проработку, отмечено снижение проходки и увеличение крутящего момента (до 42-44кНм), подъем расширителя с 135м и удаление обломков валунов с расширителя (у расширителя аварийное состояние) – т. з. 117-127.

В интервале 180-189м возросло давление на насосе подачи раствора (связано с «волочением») перед собой рыхлого валунно-галечникового материала перед собой – т. з. 51-60, 114-118), подъем колонны (на смачивающем переводнике оторваны режущие зубцы) – т. з. 48-51.

Повторное расширение («от себя»).

В интервале 90-100м отмечен крутящий момент 30-37кНм с подклинкой до 50кНм – т. з. 127-132.

В интервале 350-430м крутящий момент 33-43кНм с подклинкой до 50кНм, что связано также с скоплением валунов – т. з. 61-86.

При калибровке («на себя») ствола скважины (16.07.02-17.07.02) в некоторых интервалах (495-423м, 72-68м, 45-30м) наблюдалась подклинка инструмента, что связано с «волочением» перед собой рыхлого валунно-галечникового материала.

В результате анализа проведенных георадарных исследований в данных расширения ствола скважины выявлена высокая степень их сопоставимости.

Для наглядности приведем вышеперечисленное в таблице:

Точки зондирования (т. з.), отметившие скопления валунов и единичные валуны.	Интервалы бурения со скоплением валунов и единичными валунами (м).
127-132	90-100
130-132	95-105
117-127	105-135
48-51	180-189
61-86	350-430

## Выводы:

1. Достоверность вертикального расположения зафиксированных скоплений валунов и единичных валунов не вызывает сомнения. Однако на будущее следует иметь в виду, что проектные отметки поверхности земли могут значительно отличаться от фактических из-за разницы во времени проведения съемки и геофизических исследований. Поэтому при проведении геофизических исследований следует перепроверять высотные отметки.
2. Достоверность расположения скоплений валунов и единичных валунов в горизонтальной плоскости имеют некоторую погрешность (первые метры), что видимо, связано с недостаточной точностью переноса точек зондирования с поверхности земли (замер рулеткой от репера) на геологический разрез. Для увеличения точности несколько точек зондирования привязывать инструментально (контроль высотный и в плане).

Главный инженер Компании PLS

А.С. Кутепов

Главный технолог

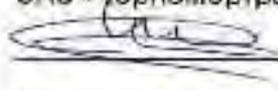
В.П. Нейфельд

Ведущий геолог

Н.Л. Небритов

Утверждаю:

Заместитель генерального директора  
по инвестиционным проектам  
ОАО «Черномортранснефть»

 Д.П. Чеплянский

" " 2013г.

**АКТ**

контрольного вскрытия обделки, заобделочного пространства  
на объекте «Необслуживаемый технологический тоннель «Грушовая-Шесхарис» с  
трубопроводами» ПНБ «Грушовая», Строительство».

г.Новороссийск

21 января 2013 г.

Мы, ниже подписавшиеся, комиссия в составе: ведущий инженер УИП ОАО «Черномортранснефть» Сингатулов В.Р., Генеральный директор ЗАО «НПФ «Геодизонд» Ильяхин В.Н., Заместитель генерального директора ЗАО «НПФ «Геодизонд» Болтинцев В.Б., Зам.начальника СМУ-4 ООО НПО «Мостовик» Лавриненко Д.А., выполнили контрольное бурение в двух точках кольца № 637 железобетонной обделки, правый полусвод, в зоне предполагаемой полости (бурение проводилось станком «Hilti», коронкой диаметром 50 мм).

В результате бурения первой скважины была выявлена каверна размером 5-6 см, состояние цементнопесчаной смеси полурыхлое (раздавливается рукой).

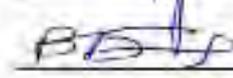
Вторая скважина пробурена со смещением 40 сантиметров влево относительно первой скважины; в результате осмотра каверн не обнаружено, цементно-песчаный раствор плотный.

Осмотр проводился прибором «Пучок МТ-11».

**Вывод:** выявленная каверна имеет предполагаемое развитие в левую верхнюю часть кольца относительно первой скважины.

**Принятые меры:** выявленная в процессе обследования полость устранена во время работы комиссии путём нагнетания 36 литров цементного раствора насосом НБ, в первую контрольную скважину.

Ведущий инженер УИП  
ОАО «Черномортранснефть»  
Генеральный директор  
ЗАО «НПФ «Геодизонд»  
Заместитель генерального директора  
ЗАО «НПФ «Геодизонд»  
Зам.начальника СМУ-4  
ООО «НПО «Мостовик»

 Сингатулов В.Р.  
 Ильяхин В.Н.  
 Болтинцев В.Б.  
 Лавриненко Д.А.



**Закрываемое Акционерное Общество  
«Управление-15 Метрострой»**  
12102, Санкт-Петербург, ул. Фучика, д.4, лит.К.  
телефон / факс 640-89-90  
[upr15@yandex.ru](mailto:upr15@yandex.ru)

**ИНН 7810165638, БИК 044030704,  
r/c 40702810913000002435  
k/c 30101810200000000704  
ОКОНХ 61124, ОКПО 50853280  
ОКАТО 40296561000 КПП 781601001  
Филиал ОПЕРУ ОАО Банк ВТБ  
в Санкт-Петербурге г. Санкт-Петербург  
от 18.12.2014 № 1459/18-14**

**Генеральному директору  
ЗАО «НПФ «Геодизонд»**

**Ильяхину Вячеславу Николаевичу**

**Уважаемый Вячеслав Николаевич!**

Выражаем благодарность специалистам ЗАО «НПФ «Геодизонд» за выполненные в 2014 г. работы по геофизическому прогнозу методом ЭМИ СШП зондирования геологических условий – выделение положения участков нарушенных и водонасыщенных пород - вперед забоя строящегося двухпутного тоннеля между станциями «Южная» и «Пр. Славы» линии 5 Санкт-Петербургского метрополитена.

Работы по геофизическому прогнозу выполнялись оперативно и качественно. Руководствуясь систематически получаемой от ЗАО «НПФ «Геодизонд» геологической информацией, в процесс горнопроходческих работ своевременно вносились и вносятся необходимые технологические изменения, что в целом способствует эффективной работе тоннелепроходческого механизированного комплекса при строительстве тоннеля.

С уважением,

Главный инженер  
ЗАО «Управление-15 Метрострой»



А.Н. Михайлов

**Эффективность применения надводного варианта комплекса ЭМИ СШП  
зондирования**

№ по п/п	Объект геофизического обследования	Заказчик работ	Год	Основные результаты
1	Русловая часть р. Оби на шлейфе переходов газо- и нефтепроводов в районе г. Нефтеюганска	ЗАО «ПИРС»	2000	На глубину 40-45 м от уровня дневной поверхности выделены геологические разности: ил, песок с включением щебня, песок, суглинки средней плотности, суглинки твердые и глины. В точках зондирования физико-механическая нарушенность пород отсутствует.
2	Проектируемый переход НП «Куйбышев – Тихорецк» через Волго – Донской судоходный канал. Задача: построение на акватории инженерно-геологического разреза. Бурение невозможно – тонкий лед. Процесс ННБ выполнен качественно.	ЗАО «ПИРС»	2000	В разрезе данного перехода до глубины 50 м от уровня дневной поверхности выделено семь основных геологических слоев. В процессе интерпретации геофизических материалов зондирования в двух точках зондирования (№ 2, № 6) в слое песков мелкозернистых (частично в песчано-алевритовых породах) на глубинах 31 – 36 м и 24 – 29 м соответственно отмечается более плотное сложение геологического материала. В точках зондирования №№ 1, 2, 3, 4, 7 преимущественно в позиции слоя песков мелкозернистых, залегающих на глубине измерения 22.0 – 35.0 м, выделены интервалы обводненности.
3	Река Ия, Тулунский район, Иркутская обл. Задача: построение на акватории инженерно-геологического разреза под ННБ. Процесс ННБ выполнен безаварийно.	ЗАО «Мостовик»	2000	Откорректирована глубина залегания кровли скальных пород, представленных базальтами. Выделению базальтов способствовала калибровка сигнала, проведенная на обнажении пород в траншее на правом берегу реки. Было установлено, что в прикровельной своей части геофизически толщи базальтов дифференцируются по степени их нарушенности. Были выделены типы сигналов, которые

				характеризовали следующие разности базальтов: перемятые, сильнотрещиноватые, слаботрещиноватые и массивные базальты. Помимо коренных пород в разрезе были выделены рыхлые осадочные отложения, суглинки с прослойками песка, песок и гравийно-галечный слой.
4	Переукладка нефтепровода «Сургут-Полоцк» через р. Ока методом микротоннелирования. Капитальный ремонт. Проектируемая трасса. Выполнен.	ЗАО «ПИРС»	2000	В инженерно – геологическом разрезе на переходе до глубины 50 м от дневной поверхности выделены и прослежены инженерно - геологические элементы. От поверхности до глубины зондирования 7 м (под руслом реки) – 22 м (на левом берегу) залегают пески средне-мелкозернистые, супеси, суглинки. Ниже отмечаются слои более плотных пород: гипсов, ангидритов, реже доломитов. Непрерывно протягивающимися слоями являются пески, гипсы, ангидриты; суглинки и подслои разрушенных (выветрелых) гипсов имеют прерывистый характер, супеси и доломиты отмечаются в точках зондирования фрагментами.
5	Переход магистрального нефтепровода «Уса-Ухта» (резервная нитка). Реконструкция с заменой трубы через р. Печора траншейным способом. Работы выполнены в штатном режиме.	ЗАО «ПИРС»	2001	На глубину 35-40м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: пески разнозернистые, суглинки, пески и суглинки с гравием и галькой, гравийно-галечниковый грунт с песчаным и суглинистым заполнителем, редко супеси и глины. В основании перечисленных грунтов, общая мощность которых колеблется от 14.2м до 19.2м, залегают скальные породы; в трех точках зондирования - №№ 11, 17 и 21 в скальных породах установлены интервалы (мощностью от 5.7м до 6.7м) интенсивной трещиноватости. В точке №11 в пределах песчаных отложений в интервале зондирования 7.3-12.8м отмечается высокая пористость грунта.
6	Основная нитка нефтепровода «Горький – Рязань» через р. Проня	ЗАО «ПИРС»	2001	В коре выветривания известняков выявлены зоны повышенной трещиноватости, мощность которых варьируется от 1.2м до 5.3м, а в

				<p>точках №1 и №б в интервалах глубин 9.8-11.0м и 8.2-8.8м, соответственно отмечается разрушенное состояние пород. В точке №б на правом берегу реки разуплотнение отмечается в слое суглинков (интервал глубин 4.2-8.2м). В точке зондирования №8 в известняках на глубине 19.8-20.2м наблюдаются признаки закарстованности. По сигналам точек СШП – зондирования кровля известняков на правом берегу реки располагается на 4-5м выше по разрезу, нежели в измерениях на левом берегу.</p>
7	<p>Участки магистрального нефтепровода через реки Кара-Ель, Тобысь и Ропча. Задача: построение инженерно-геологического разреза для ННБ. В процессе проходки к изысканиям замечаний не было.</p>	<p>ЗАО «ПИРС»</p>	2001	<p><b>р.Кара-ель</b> На глубину 30м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок, суглинок, глина, редко супесь, суглинок и глина с гравием и галькой, гравийно-галечниковый грунт с суглинистым заполнителем, редко суглинок с прослоями песка. В точках зондирования установлены интервалы разуплотненных пород мощностью от 1.1м до 8.3м.</p> <p>- <b>р.Тобысь</b> На глубину 30м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок разнотернистый, суглинок, глина, супесь, гравийный грунт с включением гальки, суглинок, реже песок и глина с включением гравия и гальки от 10% до 40%, суглинок плотный и плотные породы. В точках зондирования установлены интервалы разуплотненных пород мощностью от 0.8м до 1.8м; а также интервалы интенсивно разуплотненных пород мощностью 0.5м и 4.8м.</p> <p><b>р. Ропча</b> На глубину 30м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок, суглинок, глина, супесь, реже галечниково-щебнистый грунт с</p>

				<p>супесчаным заполнителем, супесь и глина с включением гравия и гальки до 40%.</p> <p>В точках зондирования установлены интервалы разуплотненных пород мощностью от 1.7 м до 2.6 м.</p>
8	<p>Участок магистрального нефтепровода через р. Иоссер.</p> <p>Задача: инженерно – геофизические изыскания под реконструкцию дюкера методом ННБ. В процессе проходки к изысканиям замечаний не было.</p>	<p>ЗАО «ПИРС»</p>	2001	<p>На глубину 30м от дневной поверхности выделены следующие основные геологические разности: песок, супесь, суглинок, глина, а также суглинки и глина с включениями песков и обломков карбонных пород до 20%;</p> <p>В точках зондирования установлены интервалы разуплотненных пород мощностью от 0.6м до 3.7м.</p>
9	<p>Участки перехода магистрального нефтепровода через Волго-Донской судоходный канал и пруд «Расширенный». В процессе проходки к изысканиям замечаний не было.</p>	<p>ЗАО «ПИРС»</p>	2001	<p><b><i>пруд "Расширенный"</i></b></p> <p>На глубину 30м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: суглинок, глина легкая, редко глина мягко-текучепластичная, глина тяжелая, глина полутвердая, глина полутвердая с включениями карбонатов и глина твердая. Выделенные геологические разности пород прослеживаются во всех точках зондирования с одного берега к другому и характеризуются выдержанными по простиранию мощностями.</p> <p><b><i>Волго-Донской судоходный канал</i></b></p> <p>На глубину до 30 м от уровня дневной поверхности выделены следующие геологические разности: глина, суглинок насыпной, глина твердая, глина полутвердая с линзами супеси, реже глина твердая, полутвердая с включениями карбонатов, суглинок и суглинок с прослойками и линзами песка, глина с прослойками супеси. Выделенные геологические разности пород прослеживаются в точках зондирования с одного берега канала к другому. Мощности пород по</p>

				простиранию изменяются.
10	Проектируемый прокол горнопроходческим щитом горы Кобыла в Краснодарском крае	ООО ПНКЦ «ИнжГео»	2001	В разрезах до глубины исследования 70 м была установлена граница между рыхлыми четвертичными и скальными коренными породами. Внутри скальных пород были выявлены тектонические нарушения и интервалы обводненных геологических разностей. Составлен инженерно – геологический разрез с указанием неблагоприятных условий для горнопроходческих работ.
11	Подводный переход нефтепровода «Усть-Балык – Омск» (реконструкция) через р. Иртыш (481-490км)». Задача: инженерно – геофизические изыскания под реконструкцию методом ННБ. К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2001	До глубины 25 м от уровня дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок, супесь, суглинок, глина, суглинок с прослоями супеси и песка, супесь с прослоями суглинка, глина с прослоями супеси, песок с включением гальки. В точках зондирования №7 в интервале 15.8-16.1м и №10 в интервале 16.8-17.9м в песках, залегающих на глинах, выявлены включения крупной гальки и отдельных валунов.
12	Подводный переход нефтепровода «Муханово – Куйбышев» через р. Самара методом ННБ (реконструкция). К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2001	На глубину 30-35 м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок пылеватый, песок мелкий, песок мелкий с включением гравия и гальки, песок средний с включением гравия и гальки, глина твердая, глина с прослоями мергеля, мергель и мергель с прослоями глин. В точках зондирования физико-механическая нарушенность пород отсутствует.
13	Участок подводного перехода нефтепровода «Жирновск – Волгоград» через Волго-Донской судоходный канал – реконструкция методом ННБ. К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2001	На глубину 34-35 м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: глина, глина твердая, глина с включением обломков до 20%, суглинок, суглинок с прослоями супеси и супесь. В двух точках зондирования - №№ 2 и 4 - в породах установлены интервалы (мощностью 13.8м и 5.2м) интенсивного разуплотнения. В точке №2 это проявляется в супеси и

				суглинке, а в точке №4 – только в супеси.
14	Капитальный ремонт газопровода на подводных переходах через р. Надым Надымского ЛПУ(201 – 209 км) методом ННБ. К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2002	На глубину 20м от уровня дневной поверхности выделены следующие геологические разности: пески мелко-среднезернистые, пески мелко-среднезернистые плотные, суглинки.
15	Переукладка подводного перехода магистрального нефтепровода «Усть-Балык – Омск» нитка «Б» через реку Иртыш (489 км) методом наклонно-направленного бурения (ННБ). К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2002	Проведена дифференциация геологического разреза в точках зондирования. До глубины 25 м от дневной поверхности выделены следующие геологические разности: песок, супесь, суглинок, глина, суглинок с прослоями супеси и песка, супесь с прослоями суглинка, глина с прослоями супеси, песок с включением гальки. В точках зондирования №7 в интервале 15.8-16.1м и №10 в интервале 16.8-17.9м в песках, залегающих на глинах, выявлены включения крупной гальки и отдельных валунов.
16	Переукладка подводного перехода магистрального нефтепровода Сургут – Полоцк через р. Ловать, 3096 км, Ду1020 мм методом ННБ. К изысканиям замечаний не было.	ОАО «Гипротру бопровод» г.Москва	2002	В разрезе профиля по трассе нефтепровода до глубины 25м от уровня дневной поверхности внутри литологических слоев определено местоположение валунов, имеющих размеры 30см и более.
17	Капитальный ремонт основной нитки подводного перехода нефтепровода Ярославль – Кириши через р. Мологу на 278 км. К изысканиям замечаний не было.	ОАО «Гипротру бопровод» г.Москва	2002	Представлена детальная картина, отражающая местоположение валунов с размерами 30 см и более, внутри литологических слоев.
18	Капитальный ремонт основной нитки подводного перехода нефтепровода Ярославль – Кириши через р. Улейму (78 км). К изысканиям	ОАО «Гипротру бопровод» г.Москва	2002	В разрезе профиля проектной трассы нефтепровода до глубины 28м от уровня дневной поверхности представлена детальная картина, отражающая местоположения валунов с размерами 30см и более внутри литологических слоев.

	замечаний не было.			
19	Трасса магистрального нефтепровода «Перевалочная база ОАО НТК «Ямалнефтегаздобыча» на реке М. Таз». К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2002	Определены глубинные отметки залегания кровли многолетнемерзлых пород – от 1,5 м до 13.0 м – на трех участках: на территории проектируемых причалов на реках Таз, Малый Таз и в русле протоки Ентасита. Уточнено положение и глубина залегания основных геологических разностей, слагающих участки до глубины 20.0 м от уровня дневной поверхности.
20	1. Нефтепродуктопровод «Андреевка-Альметьевск-Кстово». Участок «Субханкулово-Альметьевск». Подводный переход ННП через р.Ик. 2. Нефтепродуктопровод «Андреевка-Альметьевск-Кстово». Участок «Андреевка – Черкассы-Субханкулово». Подводный переход ННП через р.Белая. К изысканиям замечаний не было.	ЗАО «ПИРС»	2002	В пределах исследованной толщи пород (до 50 м) в известняках и доломитизированных известняках карстовые полости не обнаружены.
21	Подводный переход МН «УБНВ», основная и резервная нитки, р. Обь, 233 км. Переукладка методом ННБ	ЗАО «ПИРС»	2003	Уточнено положение и глубина залегания основных инженерно - геологических элементов, слагающих разрез до глубины 40.0 м от дневной поверхности.
22	Подводный переход нефтепровода «Сургут – Полоцк» через р. Волгу (2536 км)	ОАО «Гипротрубопровод», г.Москва	2003	По профилю по трассе нефтепровода между ПК 0+00 ÷ ПК 7+70 детально прослежены основные геологические элементы, а также определено местоположение валунов с размерами 30см и более внутри литологических слоев.
23	Реконструкция подводного перехода нефтепродуктопровода ЛПДС «Красный Бор», нефтебаза «Ручьи» через р. Нева	ЗАО «ПИРС»	2003	Уточнено положение и глубина залегания основных геологических разностей, слагающих участки до глубины 40.0 м от уровня дневной поверхности, а также положение валунов в инженерно-геологических разрезах.

24	<p>1. Ремонт подводных переходов (выборочный, с применением кессонных технологий). ППМН «Альметьевск – Горький-3», ДУ 1020 мм через реку Волгу, 241-245 км, резервная нитка</p> <p>2. Ремонт подводных переходов (выборочный, с применением кессонных технологий). ППМН Холмогоры – Клин ДУ 1220 мм через реку Волгу, 2100 км, резервная нитка</p>	ЗАО «ПИРС»	2003	Уточнено положение основных геологических разностей, слагающих участок работ на глубину до 10 м от дна реки.
25	Реконструкция с заменой нефтепровода «Дружба-2» ДУ 1020 мм, 144-155 км (основная нитка №5) на подводном переходе через реку Волгу	ЗАО «ПИРС»	2003	<p>Скальные породы представлены прослоями мергелей и известняков, подчиненное значение занимают прослои песчаника (мощностью 0,4-1,7м), залегающие в верхней части скального массива субгоризонтально. Среди рыхлых отложений наиболее широко развиты песчанистые разности пород – песок, супесь (в верхней части разреза). В меньшей степени распространены глинистые разности - суглинки и глины, залегающие в интервалах глубин 4-7м, 12-15м и ниже.</p> <p>Крупнообломочные отложения (гравийно-галечниковые) отмечаются в точках СШП зондирования ТЗ-01, ТЗ-35, ТЗ-36 и ТЗ-37 на правом берегу реки. Мощность данных отложений от 0.5м до 3.1м.</p> <p>Зоны разуплотненных пород обнаружены в ТЗ-09 в интервале 22.2-23.3м и в ТЗ-37 – в интервале глубин 1.8-2.6м.</p>
26	Реконструкция подводного перехода нефтепровода «Куйбышев-Лисичанск» ДУ 1200 через р. Волга траншейным методом	ЗАО «ПИРС»	2003	Уточнено положение основных геологических разностей, слагающих участок работ на глубину до 30.0 м от поверхности воды.

27	Северо-Европейский газопровод. 1.Участок «Грязовец – Выборг». Подводный переход через р. Нева методом ННБ 2.Участок «Грязовец – Выборг». 512 км –602 км. Подводный переход магистрального газопровода (ППМГ) через р. Волхов методом ННБ	ЗАО «ПИРС»	2004	Уточнено положение основных геологических разностей, слагающих участок работ на глубину до 40 м от поверхности земли и ледяного покрова реки.
28	Ремонт подводного перехода ППМН «Альметьевск-Горький-3», р. Кама на 164км, основная нитка	ЗАО «ПИРС»	2004	Определялось геологическое строение разреза участка на глубину до 25.0 м от поверхности воды.
29	Капитальный ремонт подводного перехода магистрального нефтепровода (ППМН) с заменой трубы н/п НКК верхняя резервная нитка «А» 103 км, р.Обь	ЗАО «ПИРС»	2004	Уточнено положение основных геологических разностей, слагающих участок на глубину до 30 м от поверхности земли на урезах реки и от поверхности воды в русловой части.
30	Реконструкция с заменой трубы нефтепровода «Дружба – 1», ДУ 1020 мм ППМН р. Волга (основная нитка)	ЗАО «ПИРС»	2004	Определялось геологическое строение пород в русловой части реки на глубину до 15 м от поверхности земли и воды: положение коренных пород под четвертичными отложениями
31	Замена дефектного участка магистрального нефтепровода Рязань – Москва подводного перехода через р.Пахра,169 км	ОАО «Гипротрубопровод», г. Москва	2005	Обследование новой проектной трассы нефтепровода, перенесенной параллельно ранее намеченной на 50 м ниже по течению реки, позволило выявить две структуры протяженностью 15 м и 30 м и мощностью от 2.0 до 3.8 м, в которых отмечаются продукты нефтепереработки