

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Закрытом Акционерном Обществе Научно-производственной фирме «Геофизическое дистанционное зондирование» (г. Санкт-Петербург).

Научный консультант	Доктор физико-математических наук, профессор Черемисин Александр Алексеевич
Официальные оппоненты:	Минин Игорь Владиленович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства Катаев Сергей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный педагогический университет», профессор кафедры общей физики Тихомиров Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий отделением института мониторинга климата и экологических систем
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится «08» декабря 2015 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Белинского, 53 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «30» сентября 2015г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.09
кандидат технических наук



Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 наносекундной длительности, 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 местоположении и 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) запирающих свойств 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 результаты применения ТУ;
- 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 и непрерывного мониторинга инъекционного закрепления при их реализации.

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 (волатильность).

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработка на базе ТУ линейки генераторов на базе ДДРВ обеспечивает глубины контроля структуры подстилающей среды до 130 м.
2. Разработаны под линейку генераторов три типа широкополосных антенн подповерхностного зондирования – неоднородные микрополосковые, монополярные, 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, приходящего с генератора излучаемых импульсов, и перехода к синхронизации в аппаратном комплексе от максимального отраженного сигнала.
4. Разработаны преобразования временных сигналов, основанные на информационно – энтропийных критериях, позволяющих литологически разделить 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, контролировать состояние опор (быков) мостов и качество 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 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 состояния инъекционного закрепления на ул. Карбышева г. Санкт-Петербург, в зоне “Размыва” и строящегося (первого в Российской Федерации) двухпутного тоннеля между станциями «Южная» и «Перспект Славы» линии 5 метрополитена г. Санкт-Петербург.

Комплекс ЭМИ СШП зондирования нашел применение при решении практических задач в следующих организациях: АО “Мосинжпроект” (г. Москва), 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 вперёд 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, 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 забота 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.

Объем 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.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, кратко изложены предмет исследований и структура диссертации, сформулированы цели работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

В I главе представлен краткий обзор аппаратуры и методов обследования и контроля подповерхностных объектов, работающих на принципах георадиолокации.

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

$$L = \frac{V_{\phi} \cdot \Delta t}{2}, \quad (1)$$

где Δt – задержка зондирующего сигнала; V_{ϕ} – фазовая скорость в среде с конечной проводимостью.

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

где $\sigma_a^2 / \omega^2 \cdot \varepsilon_a^2 = \operatorname{tg}^2 \delta$ – формализованное представление тангенса угла диэлектрических потерь; σ_a – удельная электрическая проводимость (См/м); ε_a и μ_a – абсолютные диэлектрическая (Ф/м) и магнитная (Гн/м) проницаемости среды; ω – циклическая частота.

В п.1.1 проанализировано поведение электрофизических параметров (ε , $\operatorname{tg} \delta$) почв в переменных электрических полях. Почва рассмотрена как многофазная, распределённая в пространстве гетерогенная дисперсная система. Для неё характерны процессы поляризации, релаксации и электропроводности как временные характеристики и наличие поверхностей раздела фаз как пространственных характеристик. Эти поверхности и их временные характеристики определяют величину поверхностной проводимости, формирование объёмных зарядов и двойных электрических слоев, в свою очередь определяющих напряжённости внутреннего электрического поля почвы и контактную разность потенциалов.

Свойства и спектральный состав поглощения поля электромагнитной волны (ЭМВ) в почве определяются разностью потенциалов на границе раздела фаз и энергетическим состоянием обменных катионов, определяющих их подвижность в электромагнитном поле волны. Подвижность определяет проводимость почвы.

Поглощение поля ЭМВ приводит к появлению в среде релаксационных колебаний, которые определяются величиной поверхностной проводимости; ёмкостью поглощения органических, минеральных и органоминеральных коллоидов; долей дипольной поляризации и её возрастанием за счёт ориентации в сильном электрическом поле органических коллоидов.

Энергия активации высокочастотной релаксации обусловлена различиями свойств почв. Наибольшая энергия активации характерна для каштанового солонца и лугового солончака, наименьшая – для тёмно – каштановой почвы и чернозёма обыкновенного.

Классификация почв по изменениям ε , $\operatorname{tg} \delta$ в области релаксационного максимума обусловлена содержанием высокодисперсных составляющих твёрдой фазы (гумуса; илистой фракции и фракции физической глины) $-T_{\text{дисп}}$; ёмкостью поглощения $-C_{\text{погл}}$; типом насыщающего катиона почвенного поглощающего комплекса (ППК) $-T_{\text{катион}}$; наличием карбонатов $-\text{CaCO}_3$; величиной pH среды; концентрацией высокорастворимых солей $-C\%_{\text{NaCl}}$; площадью удельной поверхности $-S$; плотностью $-\rho$; гигроскопичностью материала $-ГМ$:

$$\varepsilon\{\theta_3(t^0, C)\} = f(T_{\text{дисп}}, C_{\text{погл}}, T_{\text{катион}}, \text{CaCO}_3, \text{pH}, C\%_{\text{NaCl}}, S, \rho, ГМ), \quad (3)$$

где $\theta_3(t^0, C)$ – эффективное время релаксации. Согласно выражению П. Дебая:

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

где ϑ – коэффициент макроскопической вязкости, зависящий от концентрации частиц; r – радиус частицы; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Основным фактором, определяющим изменение электрофизических параметров в профиле почв, является перераспределение органической и минеральной составляющих вниз по глубине в почвенном профиле.

В п.1.2 проанализированы общие закономерности изменения электрофизических параметров грунтов в диапазоне частот 50Гц÷500МГц (рис.1). Объединяя результаты известных экспериментов по определению эффективной диэлектрической проницаемости ε' , мелкозернистого кварцевого песка с данными лабораторных измерений С. Аркона, А. Деланея, Дж. Л. Олифанта, ван Лууна В. К. П., Ч. Ц. Цыдыпова и др. для золотого песка и лёсса, А. Д. Фролов составил эталонную зависимость ε' песчано – глинистых грунтов от объёмной влажности в диапазоне частот 50Гц÷500МГц (рис.1), которая подтверждается во влагометрии талых золотых песков и глинистых грунтов на частоте 500 МГц (О и Δ на рис. 1). Результаты контроля этих данных представлены на рис. 1а, порядок контроля дан в [12].

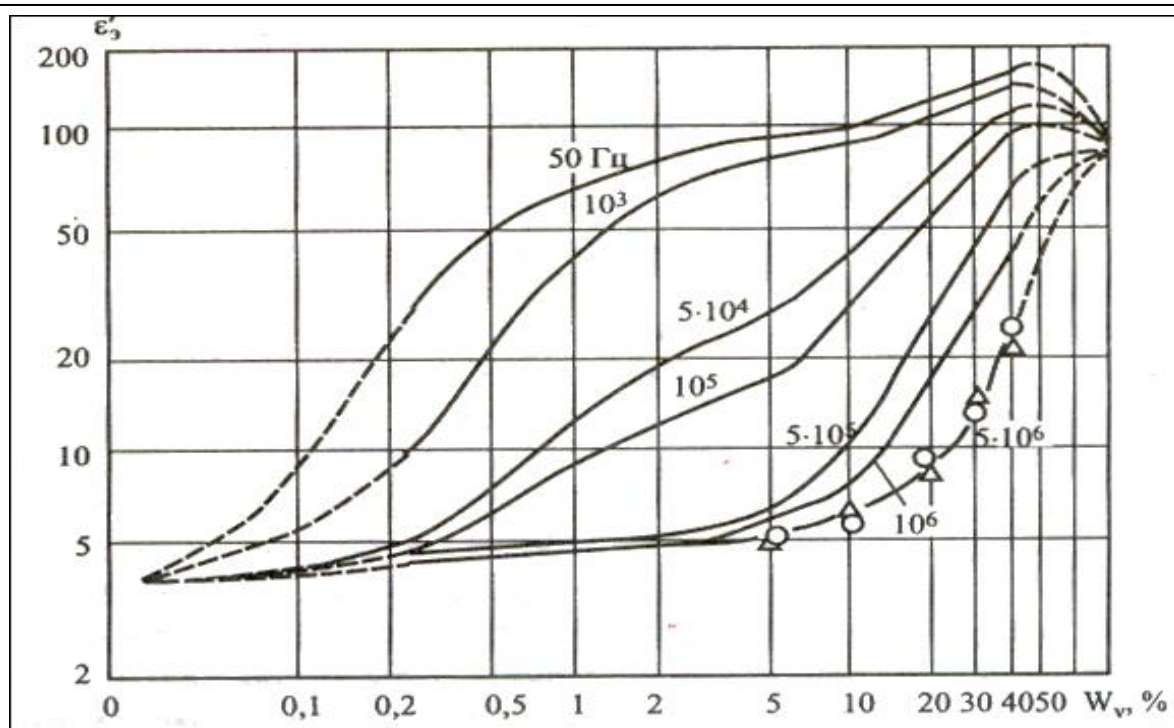
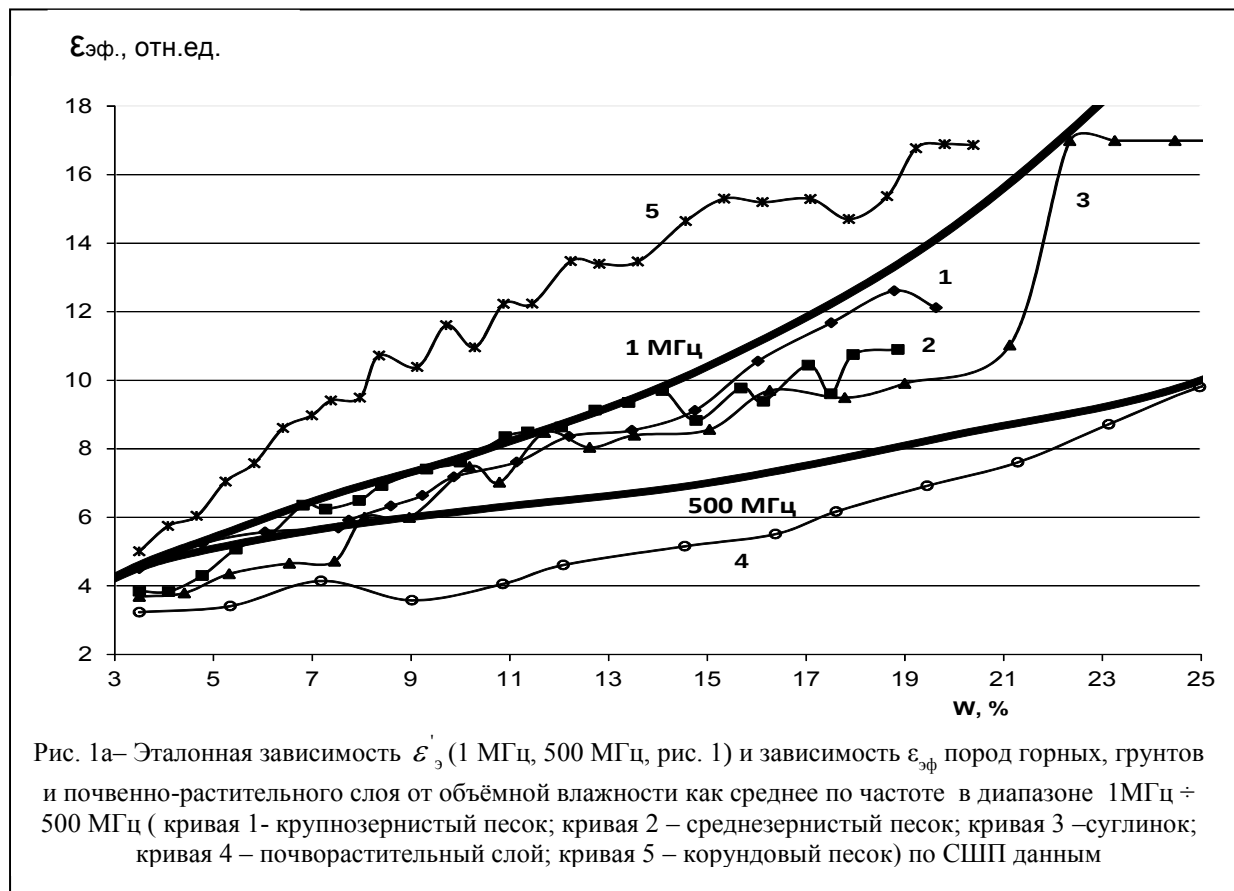


Рис. 1 – Эталонная зависимость ε' песчано – глинистых грунтов от объёмной влажности в диапазоне частот 50Гц÷500МГц (А. Д. Фролов, 2005)

Электрические свойства песчано – глинистых грунтов в переменных электромагнитных полях определяются влажностью и состоянием порового раствора, зависящего от геологических особенностей грунтов (литологических, структурно – текстурных), минерализации поровой влаги, температуры. Влияние минерального состава на диэлектрические свойства вторично, электрофизические свойства определяются содержанием и состоянием незамерзшей воды.

В п.1.3 проанализированы электрические свойства горных пород. Механизм электропроводности горных пород может быть ионным, электронным и смешанным (различие фазового состава, разная природа проводимости).

Удельное сопротивление минерального скелета горных пород изменяется в пределах 9 порядков и превосходит сопротивление жидкой фазы на 6÷8 порядков; газовая фаза горных пород (газовые ловушки) 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 минеральных включений. Магматические и метаморфические горные породы следует рассматривать как дисперсные системы из-за большой удельной поверхности, образованной границами раздела минеральными агрегатами. Установлено, что связанная (толщиной несколько ангстрем) вода (В. А. Королев, 1996) может внедряться в поликристаллические скальные породы по межзёренным поверхностям раздела между различно ориентированными областями поликристалла и межфазным границам.

В п.1.4 рассмотрены георадиолокационные измерения. К настоящему времени создано значительное количество георадиолокационных устройств. Это системы группы Penetrating Radar System (PRS) и Ground Penetration Radar (GPR), которые построены по принципу радиодальномера и подразумевают радиопрозрачность (ток смещения почти равен току проводимости) и изотропность среды для своих сигналов. Малая глубинность (5 ÷ 7 м) обусловлена амплитудой принимаемого сигнала (<1В). Для проведения измерений необходима

максимально ровная поверхность. Геофизическая интерпретация георадиолокационных данных базируется, в основном, на методе радарограмм. Среди параметрических методов обработки сигналов наиболее широкое распространение нашли фильтрация по методу Прони, деконволюция (предсказывающая и импульсная), метод блестящих точек.

В п.1.5 рассмотрены основы распространения ЭМИ СШП сигналов в подстилающей среде. Моноимпульсная локация объектов с использованием мощных импульсов наносекундной длительности в подповерхностной радиолокации представлена системами «Лоза» и «Грот-12» (А.Г.Васильев, В.В. Копейкин, П.А.Морозов).

Оценки частотной зависимости эффективности подземной радиосвязи (п.1.5.1) с учётом токов проводимости и токов смещения (А. Д. Фролов, 2005) показали, что в сильнозасоленных песках оптимальные частоты для радиосвязи уменьшаются с расстоянием как $f_{\text{opt}} \approx A \cdot r^{-0.7}$ (r - расстояние).

Сегодня рассматривается задача моделирования (аппроксимации) эмпирических гистограмм амплитуды (п.1.5.2) одноканальных спутниковых изображений, полученных при помощи радара с радиосинтезированной апертурой (РСА), с применением смесей обобщенных гамма – распределений. Данная задача является базовой при обработке РСА–данных.

В п.1.6 представлено состояние вопроса о согласовании антенны с подстилающей средой как датчика контроля поля. Учёт влияния земной поверхности в расчётах характеристик приземных антенн рассматривался в трудах А. Зоммерфельда, В. А. Фока, Е. Л. Фейнберга, Г. З. Айзенберга. В работах этих авторов приземные антенны «смотрят» на земную поверхность под углом. По нормали рассмотрел распространение радиоволн в однородной атмосфере Б. А. Введенский. Г. А. Лавров и А. С. Князев рассмотрели подземные антенны в СССР, Р. Кинг – за рубежом. М. А. Леонтович записал импедансные граничные условия.

При проектировании приземных антенн используют интегральное уравнение (ИУ) тонкого вибратора (С.И. Эминов, 1993), но при этом следует учитывать вопрос об устойчивости и сходимости численного решения (В.А. Яцкевич, 1991). При учёте согласования и фазирования устройств ВЧ – диапазона сюда же следует отнести и метод обобщенной эквивалентной цепи (Л. С. Казанский, 2006).

Альтернативой этим методам является тонкопроволочное приближение (Е. Hallen, 1938; R. F. Harrington, 1968) с использованием ИУ Фредгольма I рода, получившее наиболее широкое распространение в задачах проектирования проволочных антенн (Г. З. Айзенберг, Е. Н. Васильев, Ю. В. Пименов и др.). Недостаток - некорректность и неустойчивость решений ИУ Фредгольма I рода по Адамару. В частности, такие уравнения имеют ограничения на радиус проводника сверху (максимальный радиус проводника, при котором решение ИУ Фредгольма I рода достоверно, $\approx 1\% \lambda$). Например, если для антенны допустимо качество согласования с

$KCBH \geq 2$, то современные вычислительные методы обеспечат достаточную точность. Однако в случае повышения требований к КСВН (≈ 1.1) неизбежно проведение серьёзных экспериментальных работ (М. А. Бузова, 2005).

Методы, основанные на описании подповерхностной среды с помощью условия Леонтовича – Щукина (Г. Т. Марков и др., 1979), требуют серьёзных усилий для согласования антенны и среды во избежание появления «звона» в антенне. Привлечение ИУ для подстилающей среды и для тока в антенне является ресурсоёмким и заканчивается разработкой согласующих устройств, которые не всегда удаётся реализовать физически.

Построение электродинамической теории микрополосковых и щелевых антенн впервые проведено в работах В. А. Неганова, Е. И. Нефёдова, Б.А. Панченко. Сегодня в электродинамике микрополосковых и щелевых структур предпочтение отдаётся проекционным методам (Г. И. Веселов, А. С. Ильинский, Л. Левин, А. М. Лерер, В. С. Михалевский, В. В. Никольский, А. Г. Свешников, Я. Н. Фельд). Эту схему выделяют из-за возможности учёта особенностей поля на ребре как геометрической сингулярности (условие Мейкснера).

Задача синтеза проволочных направляющих структур с помощью ИУ Фредгольма представляет собой проблему отыскания геометрических параметров излучающей структуры – длины и поперечных размеров проводника, их положения и ориентации в пространстве. Определение входного сопротивления произвольных тонкопроволочных антенн посредством решения ИУ является на современном этапе сложной задачей. Например, основной проблемой при решении ИУ методом моментов является плохая обуславливаемость матрицы полных сопротивлений при увеличении её порядка, в результате чего погрешности определения матрицы могут возрастать, и сходимость решения электродинамической задачи может отсутствовать.

В выводах по I главе сформулированы вопросы перехода к зондированию подстилающей среды мощными наносекундными импульсами.

Во II главе представлено описание комплекса ЭМИ СШП зондирования подстилающей среды и методики аппаратной идентификации.

В комплексе для ударного возбуждения антенны использован ДДРВ¹ генератор.

¹ Прибор, получивший название дрейфовый диод с резким восстановлением (ДДРВ), был предложен в 1979 г. после обнаружения явления обратимого пробоя полупроводников с образованием задержанной ударно – ионизационной волны. Принцип действия основан либо на заполнении рабочего промежутка, к которому приложено напряжение проводящей плазмой (закрывающий 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.

Пиковая амплитуда тока в таких приборах может достигать 800 A^2 .

Состав комплекса подповерхностного ЭМИ СШП зондирования (рис.2):

- 1) набор излучающих генераторов наносекундных импульсов, изготовленных по технологии ДДРВ и имеющих фронты импульсов 0.5 нс ; 1 нс ; 3 нс при длительности $\sim$ от $3 \div 4$ до 10 нс ; пиковую амплитуду импульса напряжения 1 кВ , 4.77 кВ , 6.3 кВ , 9.87 кВ (рис. 4); пиковую амплитуду тока – $20 \div 120 \text{ A}$;
- 2) информационно – измерительная система (ИИС) комплекса - приемно-регистрирующий блок с высокой помехозащищенностью для записи принимаемых сигналов в полевых условиях в диапазоне от 20 мВ до 150 В . Указанные значения определены метрологически в полосе частот $0 \div 500 \text{ МГц}$;
- 3) приемные и передающая антенны, метрологически аттестованные в полосе частот $0.3 \div 1500 \text{ МГц}$. Согласование для волнового сопротивления среды $91.4 \div 93.4 \text{ Ом}$.

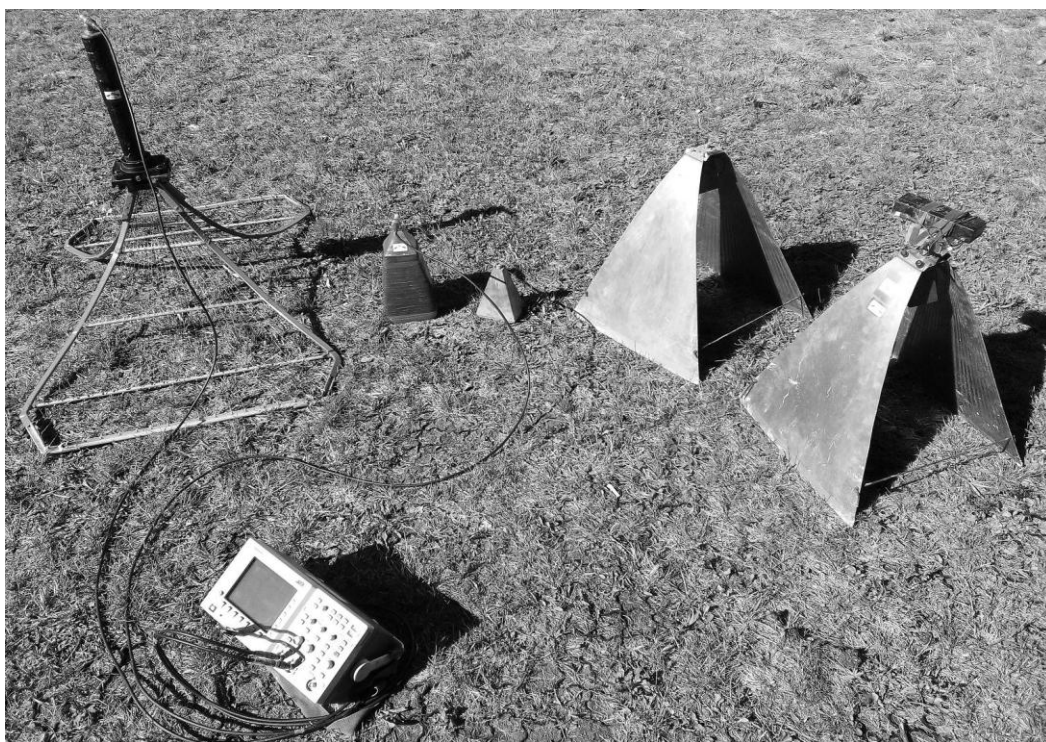


Рис. 2 – Общий вид комплекса ЭМИ СШП зондирования с четырьмя типами приёмных антенн: м-: дм-: дм₁-: м₁- диапазонов (справа показана генераторная антенна м₁- диапазона). Приёмник – цифровой осциллограф TDS3052C

ТУ на ДДРВ генератор включает задание выходной амплитуды напряжения импульса; уровни асимметрии импульса (фронт, длительность); тактовую частоту следования импульсов; стабильности параметров импульса при изменении нагрузки генератора; вес, габариты, «парусность» в конструкции с антенной; параметры питания; зависимости параметров

² Аналогичные работы на релятивистской лампе обратной волны ведутся в Институте прикладной физики и в Институте сильноточной электроники (г. Томск). Широко применяется резонансная трансформаторная схема (трансформатор Тесла) в однополупериодном режиме (ФГУП Всероссийский электротехнический институт, г. Москва).

импульса от девиации питания; измерение и испытания параметров импульса. Результатом выполнения требований ТУ является линейка генераторов (рис.3) с параметрами: амплитуда импульса $\sim 1.0 \div 9.87$ кВ; тактовая частота следования импульсов $\sim 8 \div 10$ кГц.



Рис. 3. – Линейка ДДРВ генераторов

Вид импульса на выходе ДДРВ генератора представлен на рис. 4.

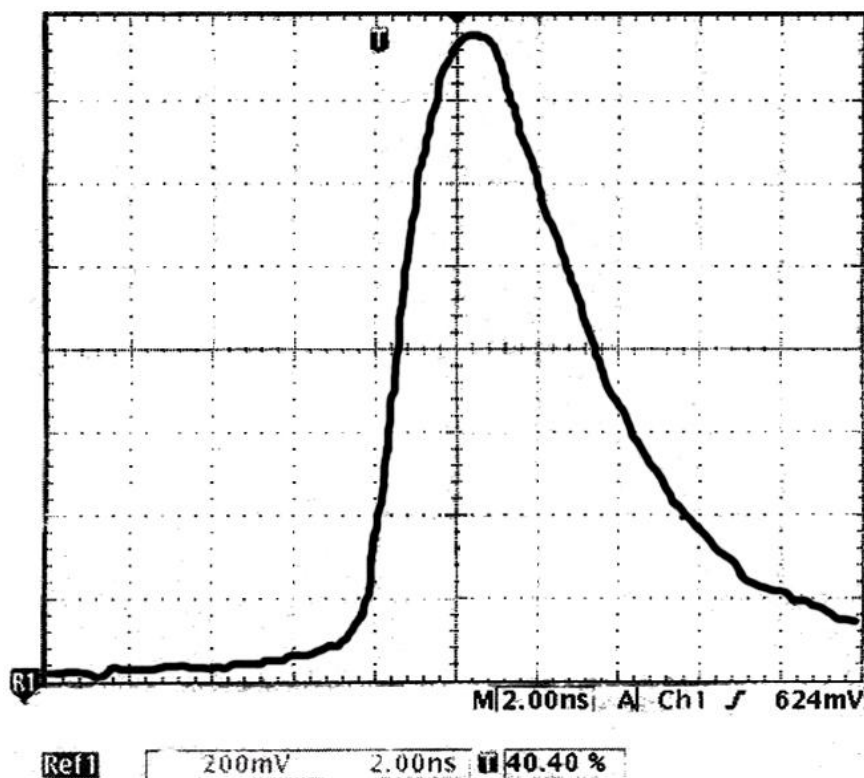


Рис. 4 – Вид импульса ДДРВ генератора ($U_{\text{имп}} \sim 9.87$ кВ, $\tau_{\text{фронт}} \sim 1$ нс, $\tau_{\text{имп}} \sim 10$ нс)

Для измерений параметров линейки ДДРВ генераторов используется осциллограф TRM8105 ($\Delta f = 0 \div 20$ ГГц по уровню -3дБ; уровень шумов < 2 мВ; дискретность амплитудного

канала 12 бит) и аттенюатор Barth Electronics, INC. ($\Delta f = 10^{-4} \div 17.44$ ГГц; $\lim \text{дБ} = 0 \div 100$ дБ; $\delta A \leq 0.64$ дБ в $\Delta f = 10^{-4} \div 2.15$ ГГц).

В качестве приемно-регистрирующего блока выбрана ИИС на базе осциллографа TDS3052C (Δf по уровню -3дБ $0 \div 500$ МГц; $U_{\max} \sim 150$ В; $\delta U = \pm 2\%$; АЦП с разрешением 9 бит; отдельные преобразователи для каждого канала) с записью на флешкарту, с входными разъёмами CP-75 и встроенной батареей питания. В выборе участвовали стробоскопические осциллографы C9-28, Hewlett Packard 54615B, Tektronix TDS3054.

Методики аппаратной идентификации представляют возможности оперативного представления информации в форс – мажорных обстоятельствах, например, при проходке горной выработки, на оползневых склонах и т.п. Реализуются аппаратно, результаты представляются в ходе проведения измерений.

Методика синтеза амплитуды сигнала. Предназначена для повышения разрешающей способности комплекса по глубине (путём синтеза, или «сшивки» файлов входных сигналов, записанных с разной развёрткой по амплитуде) и расширения динамического диапазона приёмника по амплитуде.

Методика определения глубины залегания слоя (объекта): Фурье - образ отражённого сигнала всегда лежит между кривыми 10^6 Гц и 500 МГц (рис. 1, 1а), поэтому задача по определению $\varepsilon_{\text{эф}}$ сводится к определению частоты для Фурье - образа отражённого сигнала и измерению влажности грунтов на поверхности или в забое [12].

Методика идентификации наличия воды в точке зондирования: экспериментально установлено, что частотная характеристика $\text{tg} \delta$ воды имеет $\min$ в районе 25 МГц [36].

Методика оценки наличия связанной воды в горной выработке [18].

В соответствии с ГОСТ Р 51318.11 – 2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от промышленных, научных, медицинских и бытовых (ПНМБ) высокочастотных устройств. Нормы и методы испытаний» проведено испытание излучения неоднородной микрополосковой антенны (МПА) с генератором 1 кВ (протокол № FGG2012/01/02/280-01 от 24.10.2012 г.). На рис. 5 приведены результаты превышения (кривая 2) нормы излучения над допустимыми (кривая 1). Экспериментально установлено, что используемые в данном комплексе полоса и напряжённость излучаемого поля позволяют производить ЭМИ СШП зондирование через лёд, воду, железобетонные тубинги обделки тоннелей, дифференцируя геологические разности.

В соответствии с ГОСТ 23495-82³ данный комплекс может рассматриваться как обеспечивающий безопасность при строительстве и эксплуатации подземных сооружений⁴.

³ «Породы горные. Метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь»

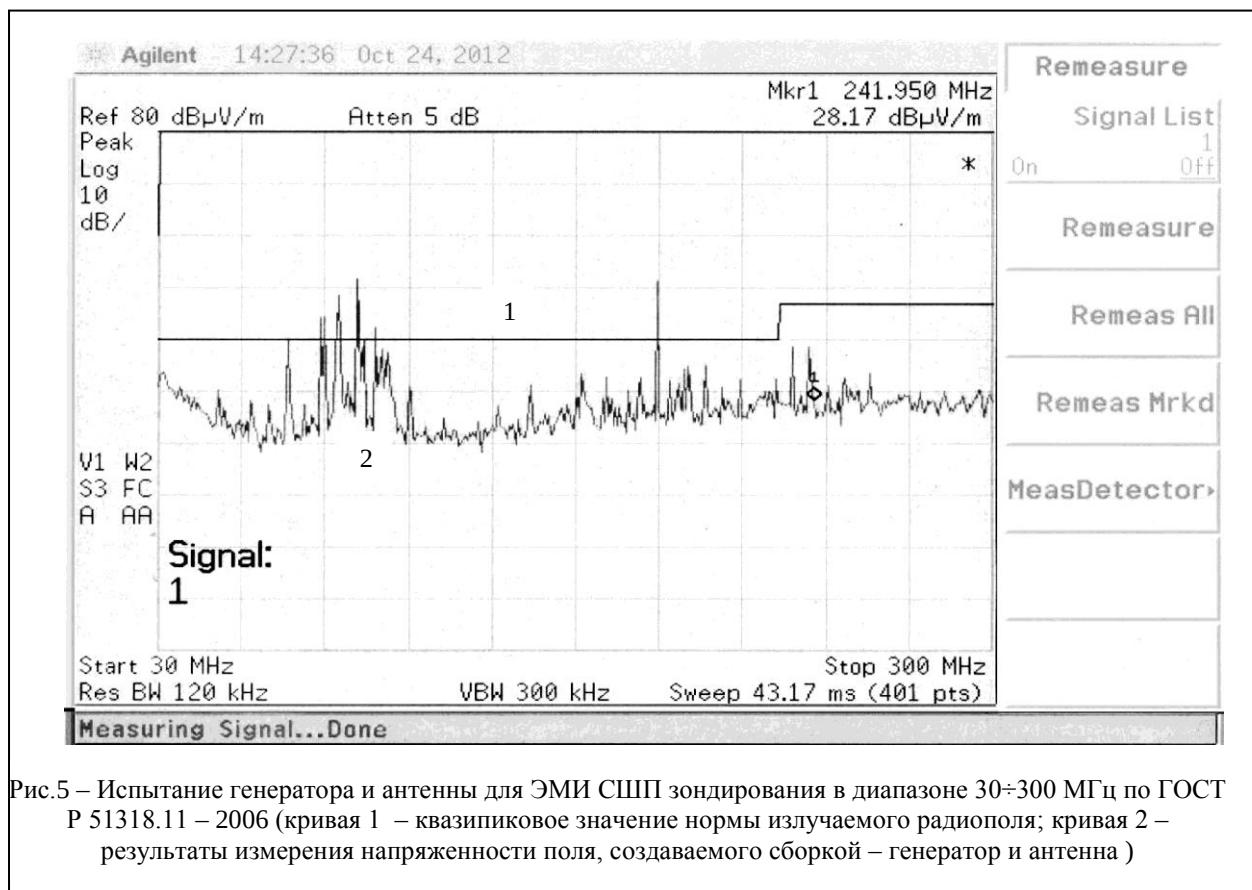


Рис.5 – Испытание генератора и антенны для ЭМИ СШП зондирования в диапазоне 30÷300 МГц по ГОСТ Р 51318.11 – 2006 (кривая 1 – квазипиковое значение нормы излучаемого радиополя; кривая 2 – результаты измерения напряженности поля, создаваемого сборкой – генератор и антенна)

Существенное ускорение и повышение точности определения местоположения слоя (объекта) 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.

Выводы по главе II:

- для выполнения требований ТУ сформированы и реализованы схемы и методы измерений и испытаний параметров ДДРВ генераторов ($U_{\text{имп}} \sim 1.64 \text{ кВ}$, $\tau_{\text{фронт}} \sim 1 \text{ нс}$, $\tau_{\text{имп}} \sim 3.5 \text{ нс} \div U_{\text{имп}} \sim 9.87 \text{ кВ}$, $\tau_{\text{фронт}} \sim 1 \text{ нс}$, $\tau_{\text{имп}} \sim 10 \text{ нс}$) в полосе частот $10^{-4} \div 17.44 \text{ ГГц}$;
- на примере четырёх вариантов построения приёмного тракта комплекса для четырёх видов приемно-регистрирующего блока ИИС показано, что наиболее эффективной является синхронизация блока TDS3052C от max сигнала одного из приёмных каналов;
- экспериментально проверено, что вид распространяющегося импульса хорошо согласуется с видом второй производной от гауссовского импульса в теории атомарных функций. Отклик отдельного слоя в многослойной среде на такой сигнал приближённо представляет собой временную последовательность узкополосного, почти гармонического сигнала.

⁴ 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. При строительстве тоннелей Метрополитена г. Санкт-Петербург погибших нет.

Основным элементом георадара являются антенны. В **III главе** рассмотрены три типа антенн подповерхностного зондирования (неоднородная микрополосковая, монополярная, тонкопроволочная), разработанные для ЭМИ СШП зондирования.

Вопрос о согласовании импедансов антенны и подстилающей среды остаётся открытым. Последнее обусловлено общими закономерностями поведения почв, грунтов, горных пород в переменном электромагнитном поле. До сегодняшнего дня не решены задачи по созданию приёмных антенн, минимально искажающих структуру наблюдаемого поля, и задачи по контролю излучения в подстилающей среде.

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. Выделяют Impulse Radiating, Vivaldi, Scissor, TEM Antennas.

Процесс излучения СШП сигнала имеет значительные отличия от процесса излучения узкополосного сигнала, поскольку для антенн подповерхностного зондирования при возбуждении их токами $20 \div 120 \text{ А}$ аналитическое решение внутренней задачи вызывает значительные математические трудности. Это связано с тем, что при таких токах антенны начинают проявлять достаточно чётко выделяемые излучатели электрического и магнитного типов (В.П. Беличенко, 2010). Поэтому разработку удачной конструкции антенны обычно связывают с наличием в ней конструктивных элементов, обеспечивающих возможность эффективного обмена энергией между этими излучателями.

В данной работе рассмотрена неоднородная микрополосковая антенна (МПА). Перспективность ее применения (В.В. Чебышев, 2003) обусловлена тем, что в отрезках проводников с плавным изменением профиля легко реализуется способ трансформации волнового сопротивления $\rho_{волн}(x)$ за счёт изменения погонных параметров линии. Коэффициент отражения неоднородной линии передачи $\Gamma(x)$ как элемент матрицы рассеяния $\|S\|$ и функция пространственной координаты x описываются уравнением Риккати (А. Л. Фельдштейн и Ф. Болиндер, 1950). Для произвольной функции $\rho_{волн}(x)$ нахождение точных решений уравнений неоднородной МПА — весьма сложная задача (И. Н. Салий и др., 1985).

Широкое распространение получили методы параметрической оптимизации как приближённые методы. Они в своей основе содержат физические предпосылки, упрощающие исходные уравнения. Далее для простоты и наглядности представлены результаты этой группы решений. Для эквивалентной схемы неоднородной связанной полосковой линии особый интерес представляют две постоянные времени - $\tau_I = L/R$, $\tau_U = C/G$, теоретически

определяющие отношение электрической и магнитной энергий или полосу исследуемого процесса (ограничение Стреттона – Чу, отношение принято считать равным 1).

Поскольку ударное возбуждение антенны производится ДДРВ генератором, излучение антенны подповерхностного зондирования происходит в режиме больших импульсных (переходных) токов, когда антенна проявляет себя как магнитный диполь, для которого основной электродинамической характеристикой является погонная индуктивность.

Моделирование параметров погонной индуктивности (п. 3.2) за счёт параметрической оптимизации поперечных размеров токоведущих проводников проведено с учётом влияния земли. Импеданс подстилающей среды запишем как

$$Z_{среда} = \sqrt[4]{\frac{\mu_a^2}{\epsilon_a^2 + \frac{\sigma_a^2}{\omega^2}}} \cdot e^{j\theta_{среда}}, \quad \theta_{среда} = \frac{1}{2} \arctg\left(-\frac{\sigma_a / \omega}{\epsilon_a}\right) - \text{фазовая характеристика среды};$$

$\frac{\sigma_a}{\omega} : \epsilon_a = \frac{\delta_{np}}{\delta_{см}}$ – граничные условия Леонтовича – Щукина: отношение плотности токов проводимости δ_{np} к плотности токов смещения $\delta_{см}$.

Из условия синфазности импеданса антенны и среды $\theta_{антен} = \theta_{среда}$ следует, что время на трансформацию тока в антенне должно быть в пределе равно $1/\tau_I = \frac{R}{L} = \frac{\sigma_a}{\epsilon_a}$. Это условие применено здесь при разработке всех типов антенн.

Из обхода контура «крыло МПА – подстилающая поверхность – крыло МПА» (рис. 6б) следует, что приложенное напряжение расходуется на преодоление э.д.с. самоиндукции $L_{11}dx \cdot \frac{dI_1}{dt}$ и э.д.с. взаимной индукции $L_{12}dx \cdot \frac{dI_2}{dt}$ (I_1 – ток в первом «крыле», I_2 – ток во втором «крыле»).

Собственная индуктивность МПА состоит из индуктивностей «крыльев» L_{11} , L_{22} , их взаимной индуктивности L_{12} и может быть представлена погонной индуктивностью:

$$L(x) = L_{11} + L_{22} + L_{12}. \quad (5)$$

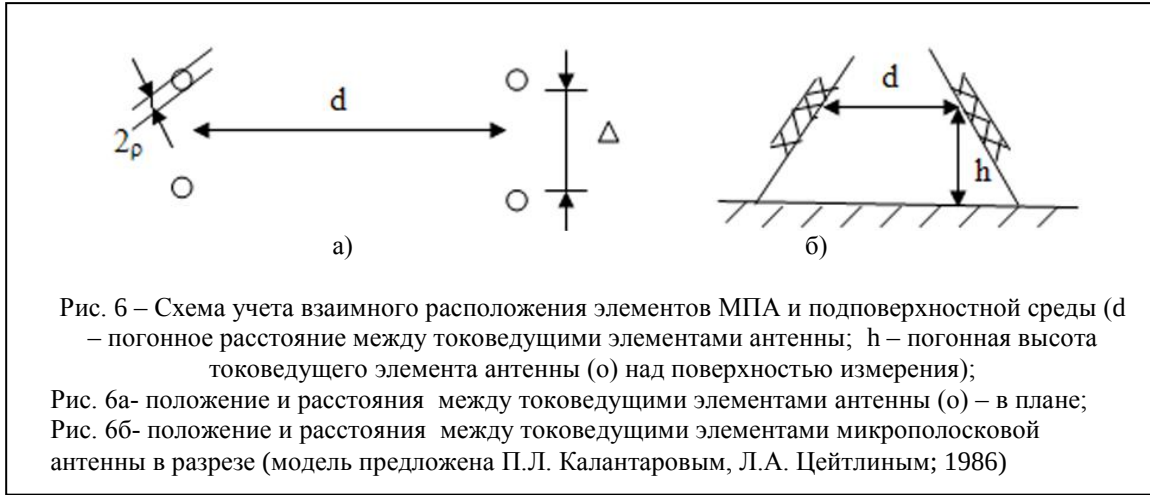
Без учёта влияния земли индуктивность с расщеплёнными проводами (рис. 6а):

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\ln \frac{d^2}{\rho \cdot \Delta} + \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{\xi}{4} \right). \quad (6)$$

По определению (П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин, 1986)

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln g, \quad \ln g = \frac{1}{S_1 \cdot S_2} \int_{S_1} \int_{S_2} \ln \eta \cdot ds_1 \cdot ds_2, \quad (7)$$

где g - среднее геометрическое расстояние (с.г.р.) площади поперечного сечения токопровода; η - расстояние между произвольными металлическими элементами площади первого и второго крыльев антенны ds_1 и ds_2 ; ξ - учитывает поверхностный эффект.



С учётом влияния подстилающей поверхности и результатов моделирования ξ в [13] получены значения частоты, проводимости материала антенны и ширины токопровода, при которых $\xi \rightarrow 0$. Тогда индуктивность L_{11} можно записать как

$$L_{11} = L_{11}(\xi = 0) - \Delta L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{4 \cdot d^2 \cdot h^2}{(4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta} \rightarrow const, \quad (8)$$

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. Предположим, что

$$\ln \frac{d^2 \cdot h^2}{(4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta} = 1, \text{ или } d^2 \cdot h^2 = 2.78 \cdot (4h^2 + d^2) \cdot \rho \cdot \Delta. \quad (9)$$

Из этого следует, что текущая ширина токопроводов ρ и расстояние между ними Δ (ширина щели) являются функцией вида антенны $d = f(h)$, где h - высота (рис. 6б) над уровнем подстилающей поверхности (рис.7). Размеры поперечных сечений токоведущей линии и щели вида

$$\rho \cdot \Delta = \frac{d^2 \cdot h^2}{2.78(4 \cdot h^2 + d^2)}, \quad \chi = \left[\rho \cdot \Delta - \frac{d^2 \cdot h^2}{2.78(4 \cdot h^2 + d^2)} \right] \rightarrow \min \quad (10)$$

представляют собой уравнение неоднородной МПА подповерхностного зондирования.

Требование $L_{11} \rightarrow const$ означает переход для $L(x)$ к погонным параметрам с учётом влияния поверхности земли; возможность задания целевой функции χ для размеров поперечных сечений токоведущих линий антенны.

Рассчитанная суммарная индуктивность $L(x)$ для СШП антенны (рис. 7) ~ 14.95 нГн. Результаты экспериментальных измерений частотных характеристик неоднородной МПА, нагруженной на подстилающую среду, приведены в [13, 35].

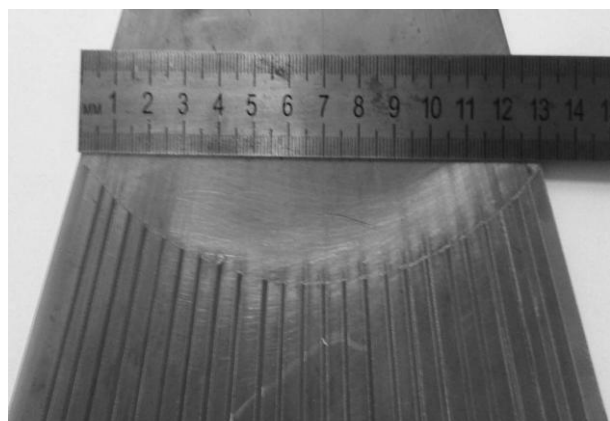


Рис.7 – Размеры поперечных сечений токопровода и щели неоднородной МПА

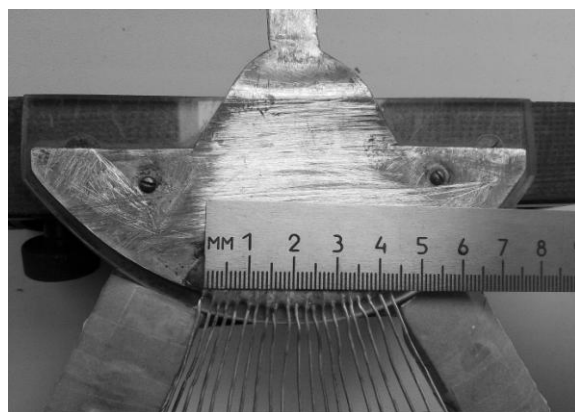


Рис. 7а – Размеры поперечных сечений токопровода и щели тонкопроволочной (струнной) антенны

Экспериментально определено, что антенна чувствительна к изменению $Z_{\text{среда}}$; природа волн в излучающей неоднородной МПА - волна H_{10} ; фазовый набег (запаздывание $\delta_{\text{см}}$ относительно $\delta_{\text{пр}}$ в антенне) в диапазоне частот $0.3 \div 700$ МГц изменяется от -13.8° до $+15.2^\circ$; существует оптимальный угол раскрыва антенны, при котором коэффициент отражения $\Gamma(x) \rightarrow \min$.

В случае неоднородной МПА ребро проводника конечной толщины представляет собой геометрическую сингулярность (условие Дж. Мейкснера на ребре). Технологически (путём вышлифовывания 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 о дифракции на импедансном клине). На рис. 8 приведено сравнение антенн по величине коэффициента стоячей волны по напряжению K_U до вышлифовывания ребра токопровода и после ($S_{12} < 8.5\%$ с ребром, $S_{12} < 6\%$ после его вышлифовывания). Экспериментально проверено влияние анизотропии материала подложки, оголовка и толщины неоднородной МПА.

По измеренным на просвет данным построен вид распространяющегося в среде поля. Голографическое восстановление поля в дальней зоне при измерениях на просвет даётся интегралами по поверхности, перекрывающей раскрыв антенны, от функций измеряемых ортогонально друг другу тангенциальных составляющих поля (Л. Д. Бахрах, А.П. Курочкин, 1979; Н. М. Цейтлин, 1985). Результаты восстановления поля в дальней зоне по полю, измеренному на плоскости, для бетона, песка с различной влажностью, суглинка, почворастительного слоя представлены в [45]. Псевдо частоты для них равны: 147 МГц, 125 МГц, 86 МГц, 122 МГц соответственно.

В п. 3.5 проанализированы монополярные антенны (рис.2, вторая слева).

Все тоннельные механизированные проходческие комплексы (ТМПК) имеют так называемые «окна», которые обеспечивают доступ к горной породе через щит проходки.



Поэтому при наличии горнопроходческого щита для проведения ЭМИ СШП измерений вперёд забоя необходимо, чтобы совокупные геометрические размеры трёх антенн помещались в это окно. Наличие конкретных размеров в щите обязало разработать ряд монополярных антенн, отличающихся длиной плеча диполя, диэлектрическими свойствами заполнителя, формой линзы.

На рис. 9 приведено сравнение измеренных значений на «ОБЗОР-103» коэффициента стоячей волны по напряжению K_U монополярной антенны дм – диапазона внутри замкнутой по периметру металлической (медной) поверхности (тубуса) с K_U той же антенны без металлической поверхности. Погрешность измерения $\delta K_U \approx \pm(2.4 \cdot \text{КСВН})\%$.

Конструктивная особенность формы диэлектрика монополярной 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 вертикальной оси. Собирающей линзой выступает боковая поверхность диэлектрика. Форма преломляющей поверхности такой линзы рассчитана, исходя из условия равенства длин оптических путей:

$$r = \frac{(\sqrt{\varepsilon} - 1) \cdot f}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \cos \theta - 1}, \quad (11)$$

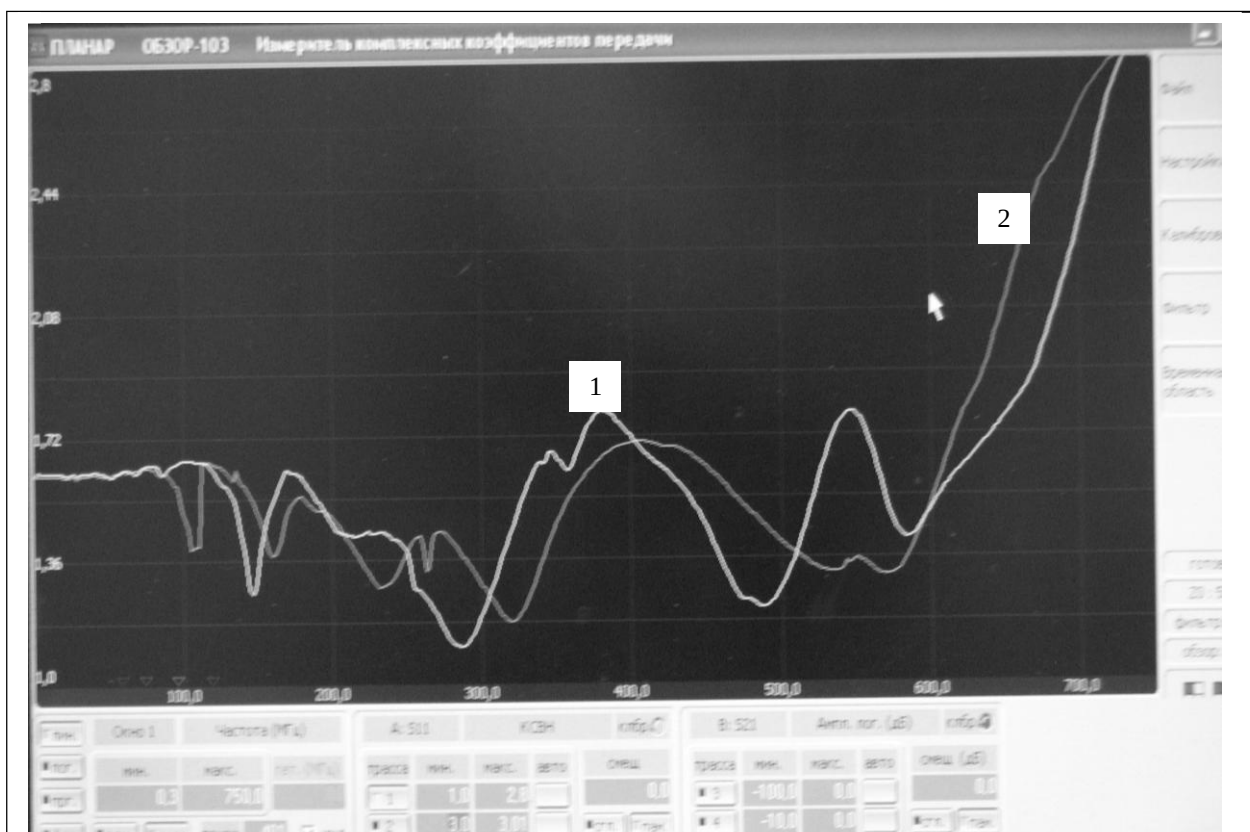


Рис. 9 – График зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению K_U от частоты monopольной антенны дм – диапазона внутри замкнутой по периметру металлической (медной) поверхности (кривая 1). На заднем плане (кривая 2) – график зависимости K_U от частоты той же антенны без металлической поверхности. Диапазон измеряемых частот – 0.3÷750 МГц. Измерения на песке

где r – расстояние от f (фокуса) до любой точки границы, на которую падает волна; F – центр окружности волновой поверхности волны; f – фокусное расстояние; θ – полярный угол радиус-вектора $\vec{r}$, имеющего начало в F .

При $\sqrt{\varepsilon} = 1.6$ (пенопласт) формула превращается в уравнение гиперболы с эксцентриситетом $\sqrt{\varepsilon}$ и началом координат в одном из фокусов. Асимптоты гиперболы образуют угол θ_n с вертикальной осью антенны:

$$\theta_n = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}\right) \approx 37.8^\circ. \quad (12)$$

Построение monopольной антенны осуществляется путём перехода от идеально согласованной дипольной «антенны в материальной среде» (диполь в песке, табл.1) к «монополю». Переход осуществлён заменой распределённого в пространстве плеча диполя сосредоточенным в пространстве элементом Гюйгенса с сохранением распределённого в пространстве второго плеча диполя. Конструктивно (за счёт гиперболической формы фокусирующей линзы) в антенне возбуждается волна H_{10} .

В п. 3.6 проанализированы тонкопроволочные антенны (рис. 2, первая слева; рис.7а). Увеличение глубины зондирования за счёт увеличения амплитуды излучаемого и принимаемого сигналов определяется двумя факторами – согласованием антенн с подстилающей средой и величиной эффективной поверхности антенн S_λ . В общем случае её эффективная площадь

$$S_\lambda = D \cdot \lambda^2 / 4\pi \quad (13)$$

где под длиной волны λ понимается величина $y_{\max} = \lambda/2$ - максимальный раскрыв антенны; D – коэффициент направленного действия.

Результаты измерений коэффициента стоячей волны по напряжению K_U от частоты для тонкопроволочной (струнной) антенны на двух границах раздела сред представлены на рис. 10.



Переход от ВЧ - разъёма ДДРВ генератора к излучающей поверхности тонкопроволочной (струнной) антенны осуществлён с помощью перехода в волноводной технике известного как ступенчатый. Среди них минимальную длину имеет переход с частотной характеристикой, описываемой полиномами Чебышева (А. Л. Фельдштейн и др., 1967). В табл.1 сведены интегральные (по частоте) значения характеристик приведенных выше антенн и датчика контроля поля (диполя в песке).

Изменение параметра S_{12} матрицы рассеяния неоднородной МПА позволяет сделать следующие выводы:

- для обеспечения сверхширокополосности антенны задача параметрической оптимизации включает нахождение решения условия развязки $L(x)$ с подстилающей средой путем задания

ширины щели и токопровода по высоте антенны, оптимизацию угла раскрыва антенны, выбор типа дифракции на ребре токопровода, задание толщины подложки, определение точки запитывания «крыльев» антенны;

- сверхширокополосность неоднородной МПА, для которой выполняются условия параметрической оптимизации, характерна для гибридных T - волн. У подобных антенн собственное значение продольного волнового числа существует начиная с частот, близких к нулевой частоте. Её гибридность обусловлена конструктивным возбуждением в неоднородной МПА как в диэлектрическом волноводе волны типа H_{10} ;
- антенна обладает комплементарными свойствами: на излучение она работает как неоднородная полосковая антенна и, одновременно, как симметричная щелевая антенна;
- расхождение рассчитываемых и измеряемых параметров антенны, нагруженной на подстилающую среду, составляет: $\Delta_{\text{фурье}} \approx 2.8\%$, $\Delta Z \approx 3.8\%$, $\Delta L \approx 5.4\%$ при коэффициенте стоячей волны по напряжению $K_U < 1.85$ в полосе частот $0.3 \div 700$ МГц.

Таблица 1

Название антенны	R_a , Ом	X_a , Ом	φ , рад	КСВН, отн.ед.	Полоса, МГц	λ_{max} , длина волны, м
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

Для монопольной антенны неравномерность параметра S_{12} матрицы рассеяния антенны <6% ($K_U < 1.85$) в диапазоне частот $0.3 \div 650$ МГц для большинства типов грунтов при очевидной развязке $L(x)$ антенны с металлом проходческого щита.

Для тонкопроволочной (струнной) антенны неравномерность параметра S_{12} антенны <6% ($K_U < 1.85$) в диапазоне частот $0.3 \div 500$ МГц для большинства типов грунтов.

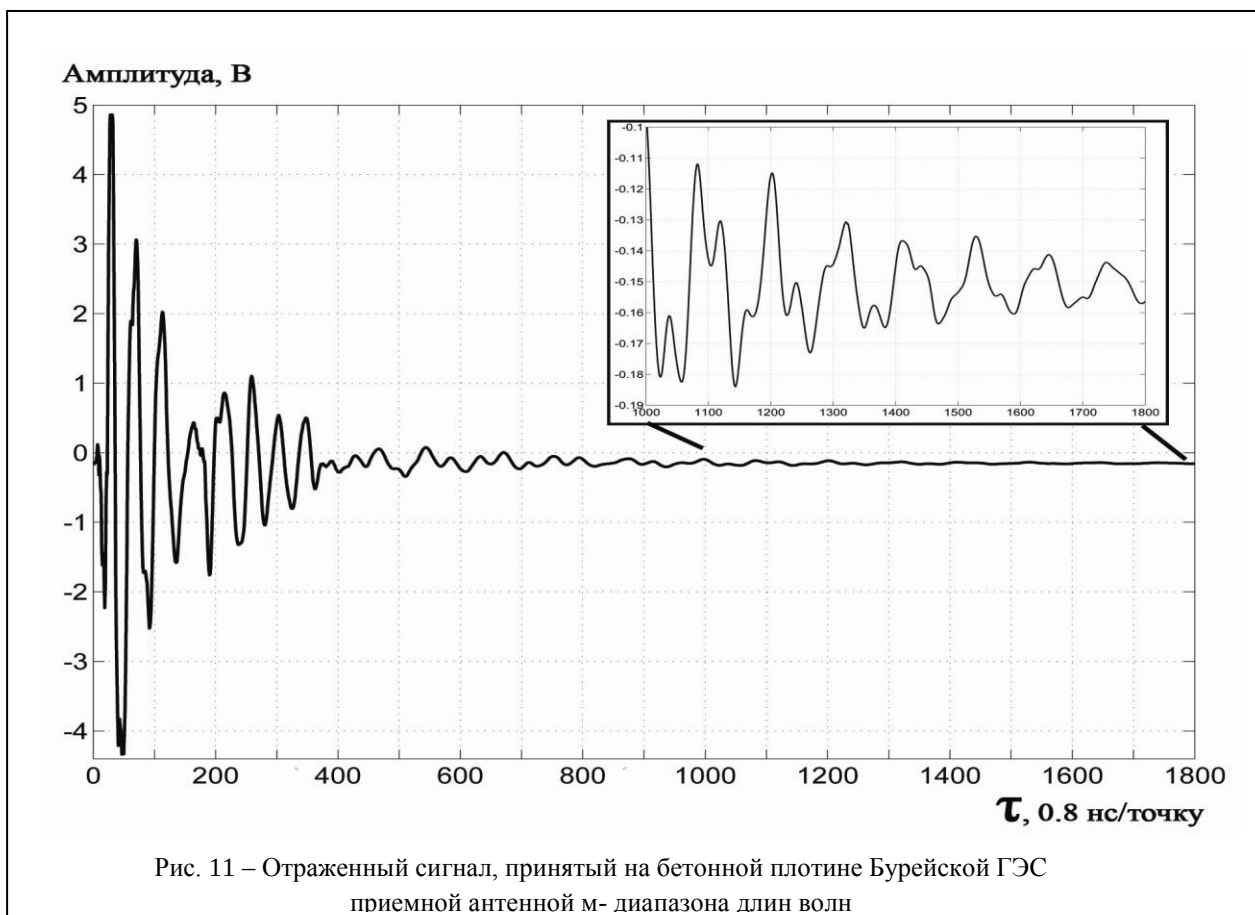
В IV главе представлены преобразования сигналов на основе информационно – энтропийных критериев, позволяющих выявлять структуру и геометрические размеры подповерхностных объектов, предложенные Е.Н. Коломенским, В.А. Королёвым (1982) для глинистых грунтов и А. Д. Фроловым (1986) для горной породы по температурам.

На измерительную информацию, получаемую от СШП системы, осуществлен перенос формальных методов информационных технологий - статистического формализма Э. Т.

Джейнса (1982), основанного на построении эмпирической плотностью вероятности (гистограммы) отраженного сигнала ЭМИ СШП зондирования.

Представим записанный как временной ряд $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)$ отраженный сигнал ЭМИ СШП зондирования m – диапазона длин волн (рис. 11) вектором наблюдений

$$\vec{y} = [y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N)]^T = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T.$$



В каждый момент t_k для сколь угодно больших N (на рис. 11 $N=1800$, возможно > 5000) и всевозможных $t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots < t_N$ для $\vec{y}$ существует его эмпирическая гистограмма $w_{t_k}(y_j, y_{j+1}, \dots, y_N)$ размерностью $(N-k)$. Общепринятое обозначение эмпирической гистограммы – $w_N(Y_i)$, априорной или модельной плотности вероятности – $p(Y_i)$. Усреднение по ансамблю (число реализаций или накоплений для момента времени t_k) в осциллографе TDS3052C = 516.

По амплитудным значениям $\vec{y}$ для каждого момента времени t_k строится вариационный ряд: $Y_i, (i=1, \overline{n})$ – $Y_1 < Y_2 < \dots < Y_n$, где n – неизвестное собственное число степеней свободы $\vec{y}$, которое оценивается по формуле:

$$n = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{\Delta Y}, \quad (14)$$

где $Y_{\max} = Y_n$ – максимальное значение $\bar{y}(t_k)$; $Y_{\min} = Y_1$ – минимальное значение $\bar{y}(t_k)$; ΔY – вариационный интервал. Исходами величины y_k с момента t_k до момента t_N будут факты попадания значений величины y_k в некий интервал $[Y_i, Y_{i+1}]$ – один из числа интервалов группирования экспериментальных данных n , число попаданий в него есть значение эмпирической плотности вероятности (ЭПВ), или значение гистограммы:

$$w_{t_k}(Y_i) = \frac{N_i}{N-k}. \quad (15)$$

В настоящее время отсутствует метод определения оптимального числа интервалов группирования экспериментальных данных n (далее «ящиков»). П. В. Новицкий и И.А. Зограф (1985) приводят более 30 способов построения эмпирических гистограмм, устанавливающих связь между объёмом выборки N и числом ящиков n . Одно из решений – max энтропии.

Из определения энтропии для значения y_k , попадающего в интервал $[Y_i, Y_{i+1}]$, следует её зависимость от вариационного интервала ΔY :

$$H(Y_i) = - \sum_i^{i+1} \{w_N(Y_i) \cdot \log w_N(Y_i)\} + \log \Delta Y. \quad (16)$$

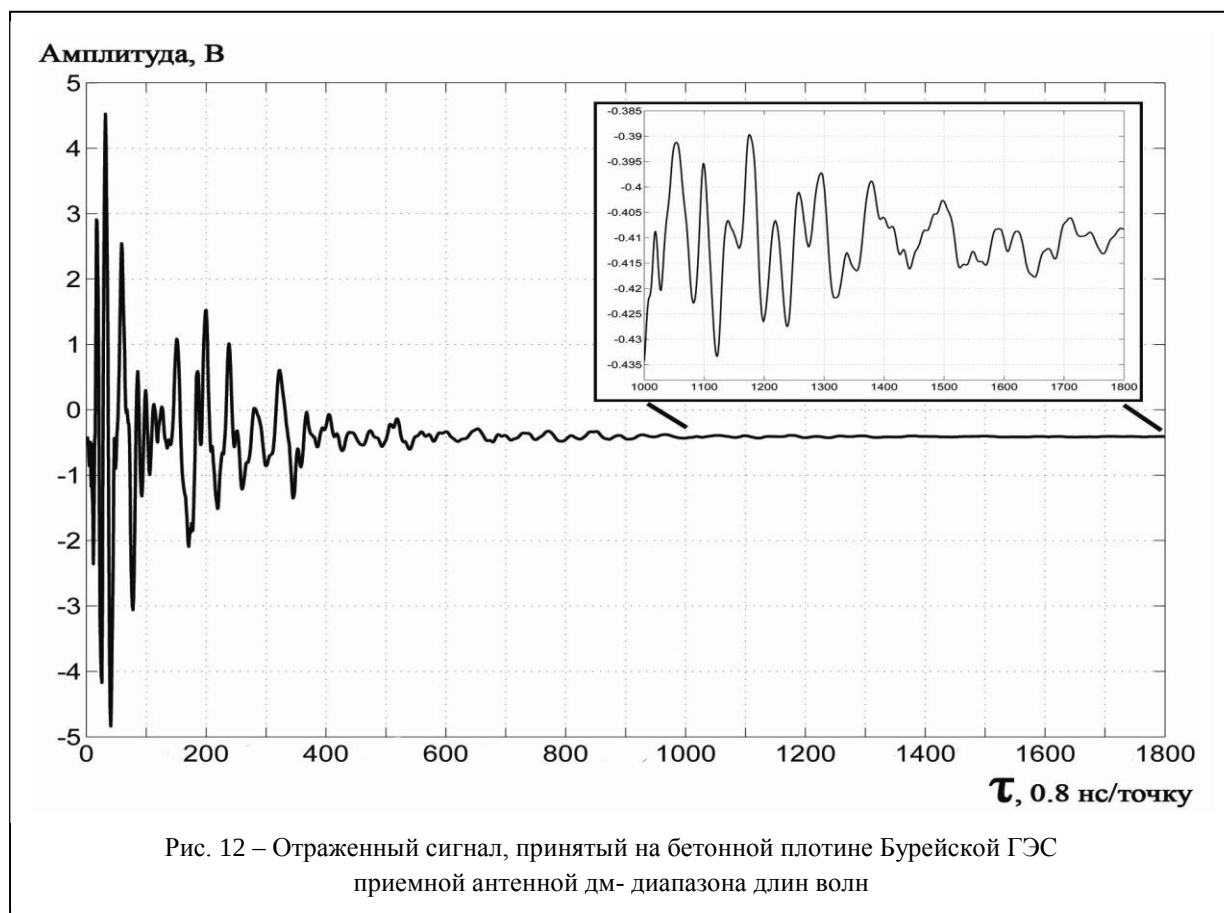
В случае СШП сигналов за определением ΔY (далее «ширина ящика») с точки зрения физических процессов стоит волна – такая временная последовательность y_j , которая образуется тогда, когда имеется хотя бы два значения в i -ом ящике, таких, что время для этих значений не совпадает ($t_{j1} \neq t_{j2}$). В нашем случае построение гистограммной ЭПВ есть построение многомодовости отражённого сигнала. Многомодовость и непрерывное изменение по глубине (при увеличении t_k) эмпирической гистограммы обусловлены различиями в прохождении сигналов для м-, дм- диапазонов длин волн, вызванными частотной дисперсией диэлектрической проницаемости подстилающей среды. Введение энтропии двух процессов обусловлено невозможностью отказа от учёта логарифма «ширины ящика» в одномерной энтропии и ограниченностью применения множителей Лагранжа для max энтропии [17, 40].

Аналогично сигналу м- диапазона введём временной ряд дм- диапазона длин волн $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ как вектор наблюдений $\vec{x}$ (рис. 12), для которого в каждый момент t_k определим его значения гистограммы $w_{t_j}(x_j, x_{j+1}, \dots, x_N)$.

Поскольку энтропия для двух процессов определяется как

$$H(x, y) = H(x) + H(y) - I(x, y), \quad (17)$$

то «места» логарифмов ширины «ящика» по $\vec{x}$ и $\vec{y}$ занимает «третий игрок» в виде взаимной информации $I(x, y)$, а величины $\log \Delta X$ и $\log \Delta Y$ взаимно сокращаются.



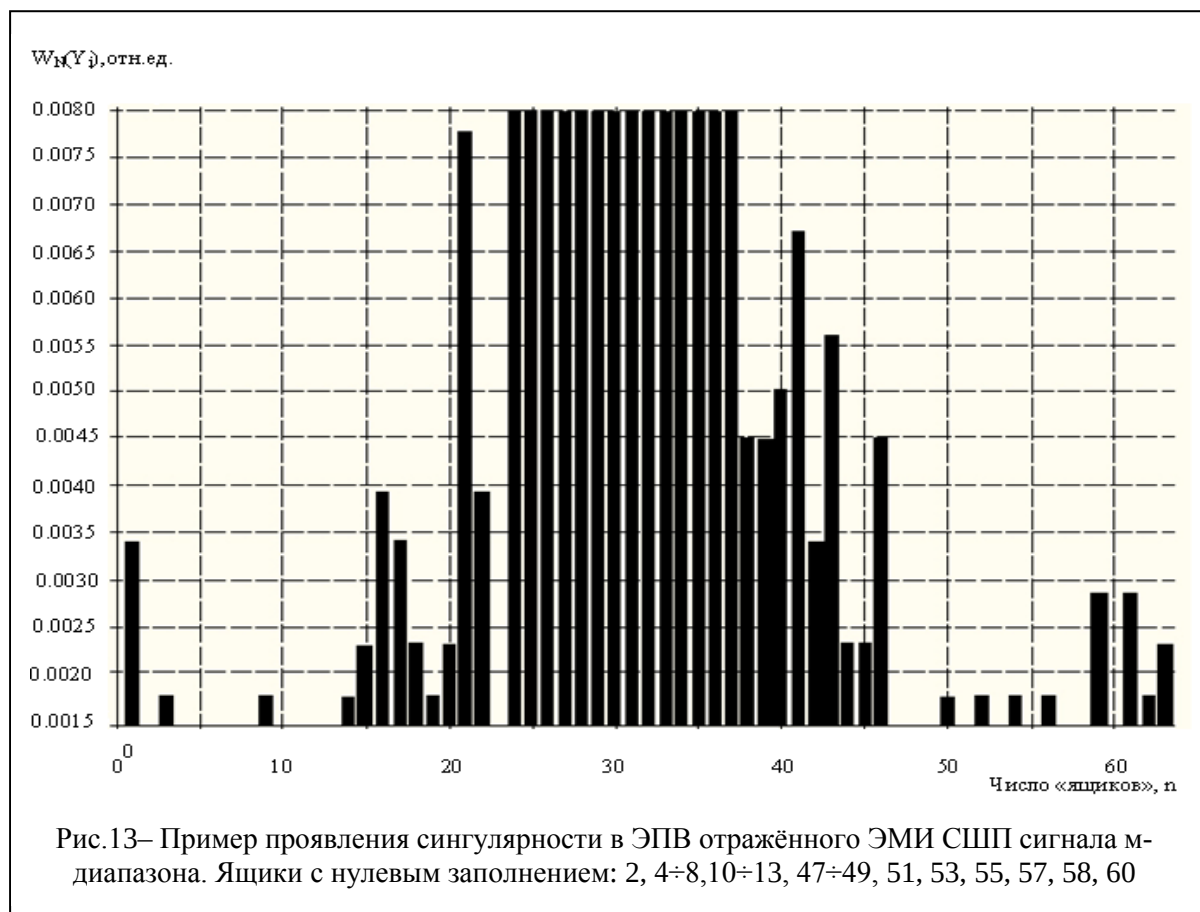
Для практического построения двумерной плотности вероятностей векторов $\vec{x}, \vec{y}$ используем принцип шахматной доски и 3D модель: по z откладываются значения эмпирических гистограмм $w_N(X_i)$ и $w_N(Y_j)$, по вертикали – вариационный ряд X_i , по горизонтали – вариационный ряд Y_j , в плоскости XY образуется «логическая» сумма событий $X_i + Y_j$, а по z – их гистограмма. Для такой модели выражение для взаимной информации $I(x, y)$ выглядит (указано без $\log \Delta X$ и $\log \Delta Y$) как [17]

$$I(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (N_{ij} / N) \cdot \log \{ (N_{ij} / N) (N^2 / N_i N_j) \}. \quad (18)$$

Здесь основным ограничением является сингулярность типа $\lim_{x \rightarrow 0} (x \cdot \log x)$, или вопрос о существовании ящиков с нулевым заполнением ($N_i = 0$ или $N_j = 0$). Если система линейна (все антенны согласованы с подстилающей средой и полоса принимаемого сигнала меньше полосы приёмного тракта), то можно допустить их существование, ограничение о равномерном распределении N_i и N_j внутри ΔX и ΔY ослабнет. Пример проявления сингулярности в эмпирической гистограмме показан на рис.13. Первая вариационная задача для нахождения $\max H(x, y)$ с учётом $I(x, y)$ выглядит как поиск значения объёма данных $N_{ix,y}$, при

котором по двум независимым векторам $\vec{x}, \vec{y}$ с помощью величин интервалов вариации ΔX и ΔY находится максимум функционала:

$$H(X, Y) \rightarrow \max. \quad (19)$$



Наличие систематического смещения максимума энтропии (Буйнявичус В.-А.В. и др., 1985) приводит к второй вариационной задаче: ищется способ представления результатов измерений в виде эмпирических гистограмм, для которых количество информации $I_{\text{Shen}}(X, Y)$, содержащейся в наблюдаемых независимых векторах $\vec{x}, \vec{y}$, минимизируется, или — количество информации, приходящееся на букву используемого алфавита, совпадает с энтропией источника (К. Шеннон, 1948). Формула для выражения $I_{\text{Shen}}(X, Y)$:

$$I_{\text{Shen}}(X, Y) = \log n - H(X, Y). \quad (20)$$

Вторая вариационная задача: поиск значения объёма данных $N_{2x,y}$, при котором по двум независимым векторам $\vec{x}, \vec{y}$ с помощью величины интервалов вариации ΔX и ΔY находится минимум функционала:

$$I_{\text{Shen}}(X, Y) \rightarrow \min. \quad (21)$$

Характер поведения $I_{\text{Shen}}(X, Y)$ как функции от объёма выборки N позволяет найти точку, в которой скорость изменения информации по Шеннону как $I_{\text{Shen}}(X, Y) = f(N)$ резко

меняется. Порядок вычисления этой точки сводится к определению для времени t_k кривизны $I_{\text{Shen}}(X, Y)$

$$k(X, Y) = \frac{\partial^2(I_{\text{Shen}}(Y, Y))}{\partial N^2} \bigg/ \left[1 + \left(\frac{\partial I_{\text{Shen}}(Y, Y)}{\partial N} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (22)$$

где N – текущий объём выборки; первая и вторая производные находятся для $I_{\text{Shen}}(X, Y)$ как функции от объёма выборки $I_{\text{Shen}}(X, Y) = f(N)$.

Третья вариационная задача: поиск значения объёма данных $N_{3x,y}$, при котором по двум независимым векторам $\vec{x}, \vec{y}$ с помощью величины интервалов вариации ΔX и ΔY находится максимум функционала:

$$k(X, Y) \rightarrow \max. \quad (23)$$

Объёмы данных, получаемые в ходе решения трёх вариационных задач, для сигналов м-, дм- диапазонов длин волн, принятых на бетонной плотине Бурейской ГЭС, представлены на рис. 14. Эти величины представляют собой объёмы, по которым ищутся первый и второй моменты в модельных распределениях $p(\vec{y}; \theta_y)$ и $p(\vec{x}; \theta_x)$ в каждый момент времени t_k .

В качестве критерия оценивания используется информационная мера Кульбака (ИМК), или мера Кульбака – Лейблера - Санова (S. Kullback, R.A. Leibler, 1951; И. Н. Санов, 1957) как мера приближения условной энтропии к безусловной:

$$I_N(n) = \int_{R^n} w_N(\vec{y}) \cdot \log \frac{w_N(\vec{y})}{p(\vec{y}; \theta)} d\vec{y}. \quad (24)$$

А. Таглиани (A. Tagliani, 2003) показал, что мера изменения эмпирического и модельного распределений связана с ИМК как

$$V = \int_Y |w_N(Y) - p(Y; \theta)| \cdot dY \leq 3 \cdot \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{4}{9} \cdot I_N(n)}}. \quad (25)$$

Использование ИМК в качестве штрафной функции обеспечивает алгоритму свойство монотонности, что соответствует увеличению функции правдоподобия на каждом шаге итерации. Для обеспечения сходимости оценки к локальному тах правдоподобия приходится использовать гладкие (дифференцируемые по оценке) распределения. Вопросы сходимости даны в работе М. I. Jordan and L. Xu (1996). В качестве априорной (модельной) плотности вероятности из нормального и распределения Релея – Райса по величине ИМК выбрано последнее [1]. Нахождение оценок сводится к их взвешиванию. Порядок «взвешивания оценок» по трём вариационным задачам представлен на рис. 15: $\vec{\theta}_x(t), \vec{\theta}_y(t)$ – первые моменты,

$\bar{\sigma}_x(t), \bar{\sigma}_y(t)$ – среднеквадратические отклонения в распределении Релея – Райса. $\theta_1(t)$ и $\sigma_1(t)$ находятся по объему $N_{1x,y}$; $\theta_2(t), \sigma_2(t)$ – по $N_{2x,y}$; $\theta_3(t), \sigma_3(t)$ – по $N_{3x,y}$. В качестве веса использовано значение соответствующей ИМК, за оценки принято пересечение медиан.

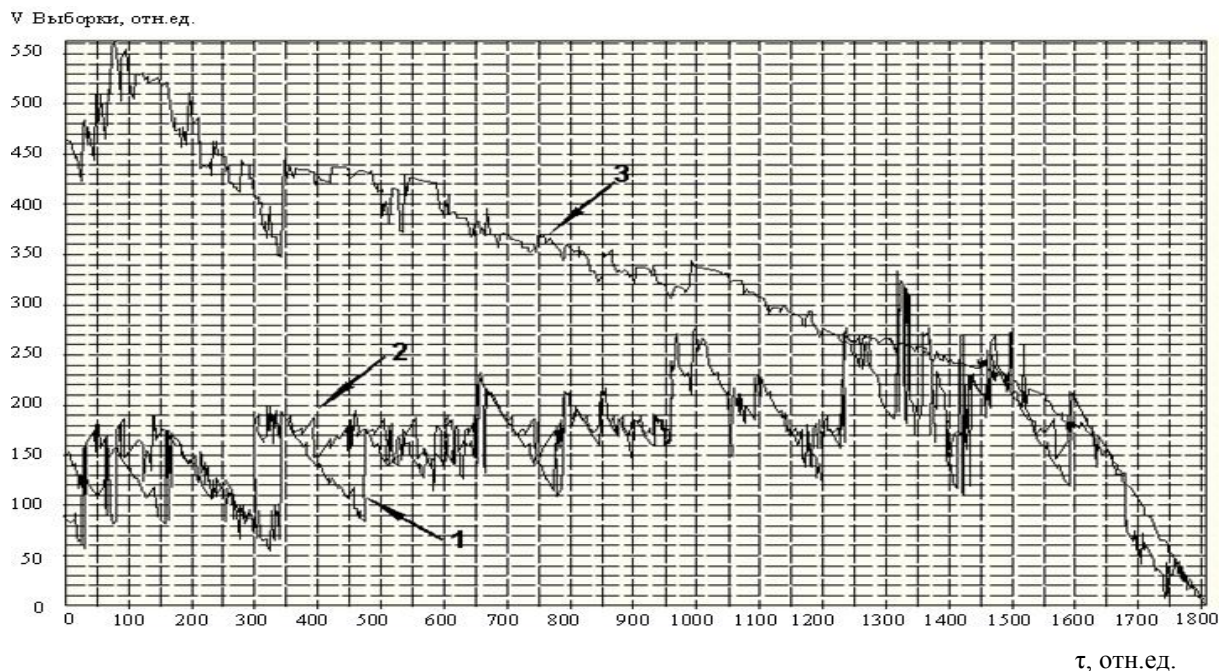


Рис. 14 – Оценка объёма данных ($V_{\text{выборки}}$) трёх вариационных задач для сигналов м-, дм-диапазонов длин волн (кривая 1 - $N_{1x,y}$; кривая 2 - $N_{2x,y}$; кривая 3 - $N_{3x,y}$), принятых на бетонной плотине Бурейской ГЭС (развертка – 0.8 нс/точка)

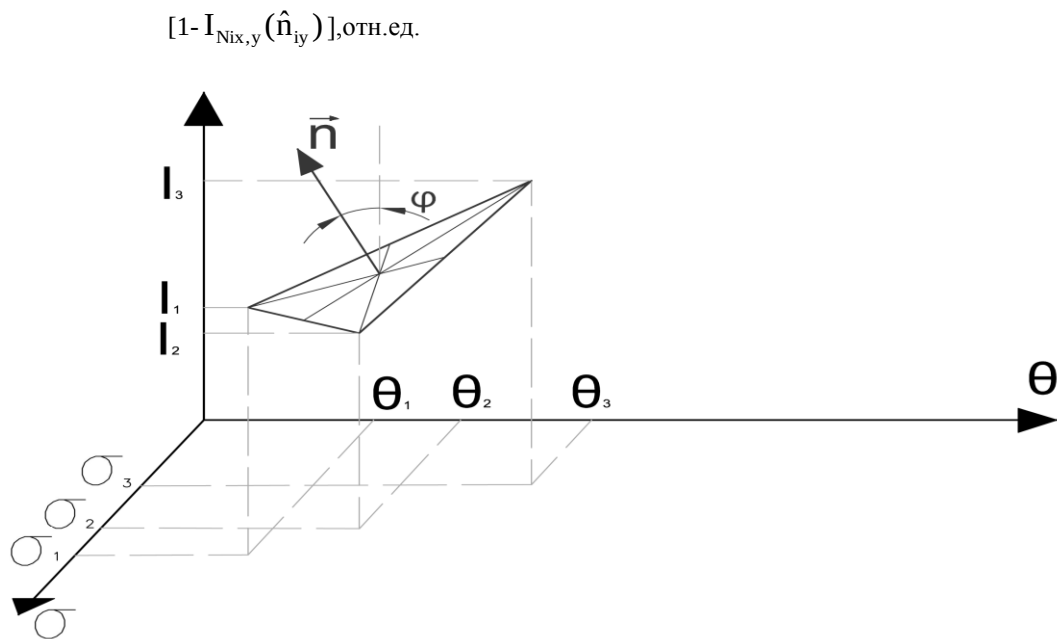


Рис. 15 – Порядок «взвешивания оценок» $\theta(t), \sigma(t)$, $\vec{n}$ – нормаль к плоскости оценок

По формулам:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (x(t) - \bar{\theta}_x(t)) / \bar{\sigma}_x(t), \\ \dot{y}(t) &= (y(t) - \bar{\theta}_y(t)) / \bar{\sigma}_y(t)\end{aligned}\quad (26)$$

производится центрирование и нормирование сигналов для нахождения авто- и взаимнокорреляционной функций (АКФ, ВКФ) сигналов дм-, м- диапазонов. Центрировано – нормированные ЭМИ СШП сигналы обладают свойством идентифицируемости (Н. Teicher, 1961): для функции, обратной масштабу ($\bar{\sigma}_x(t)$ и $\bar{\sigma}_y(t)$), существует Фурье преобразование, нигде не обращающееся в нуль; характеристическая функция, соответствующая функции распределения сигнала, нигде не обращается в нуль.

Корреляционные зависимости центрировано - нормированных сигналов вида

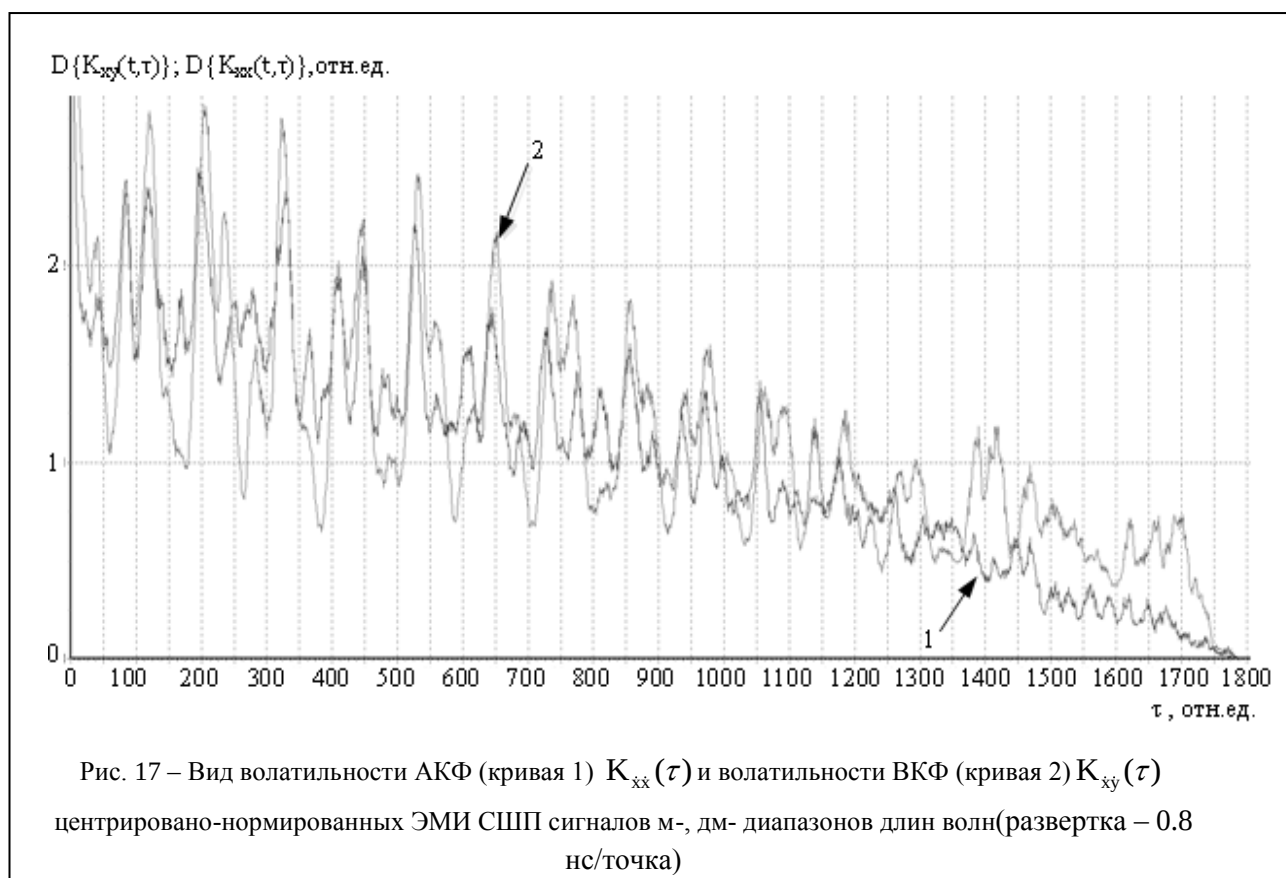
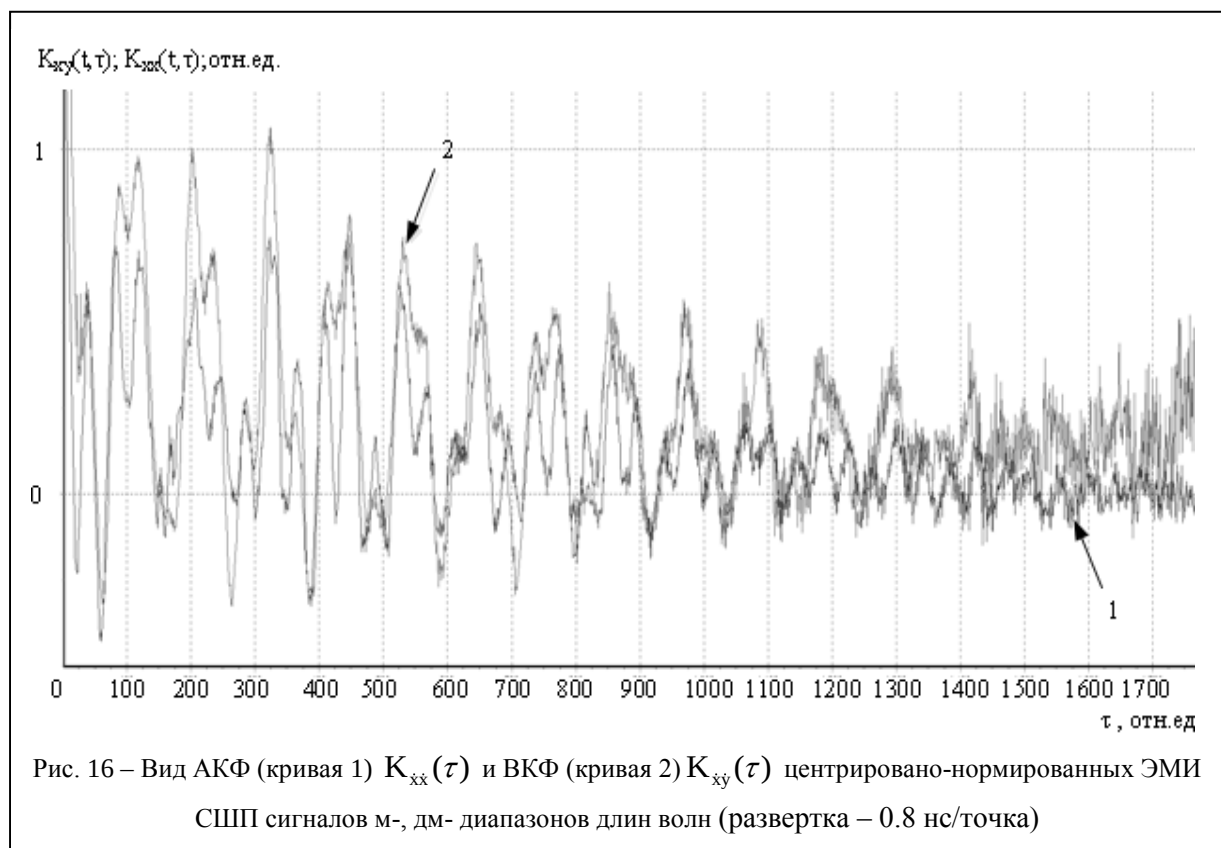
$$\begin{aligned}K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau) &= M[\dot{x}(t) \cdot \dot{x}(t - \tau)] \\ K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau) &= M[\dot{x}(t) \cdot \dot{y}(t - \tau)], \quad M[\dots] - \text{знак мат. ожидания};\end{aligned}\quad (27)$$

как задача оценивания нормированной корреляционной функции, является одной из задач, тесно примыкающих к задачам оценивания корреляционных функций. Порядок работы со значениями матриц $\|K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau)\|$ и $\|K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau)\|$ следующий: τ – номер строки; для каждой из строк строится эмпирическая гистограмма и по ней находится мат. ожидание как значение АКФ и ВКФ для строки с номером τ ; последовательность этих значений образуют авто- и взаимнокорреляционные функции от τ . Вид АКФ и ВКФ центрировано-нормированных ЭМИ СШП сигналов показан на рис. 16. При изучении тонкой стохастической структуры корреляционных матриц наибольший интерес представляет скорость изменения процесса (его волатильность). Волатильности (В.Ю. Королёв, 2011) как функции от τ находятся по эмпирической гистограмме строки τ матрицы $\|K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau)\|$ и по эмпирической гистограмме строки τ матрицы $\|K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau)\|$:

$$D\{K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau)\} = \sum_{i=1}^k \left(\|K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau)\|_i - K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau) \right)^2 \cdot w_i(\|K_{\dot{x}\dot{y}}(t, \tau)\|), \quad (28)$$

$$D\{K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau)\} = \sum_{i=1}^k \left(\|K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau)\|_i - K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau) \right)^2 \cdot w_i(\|K_{\dot{x}\dot{x}}(t, \tau)\|). \quad (29)$$

На рис. 17 (кривая 2) представлена волатильность - динамическая составляющая дисперсии для ВКФ сигналов м-, дм - диапазонов, центрировано-нормированных относительно оценок первого и второго моментов, полученных для семейства вероятностных плотностей Релея-Райса; кривая 1 - волатильность для АКФ центрировано-нормированного сигнала дм – диапазона.



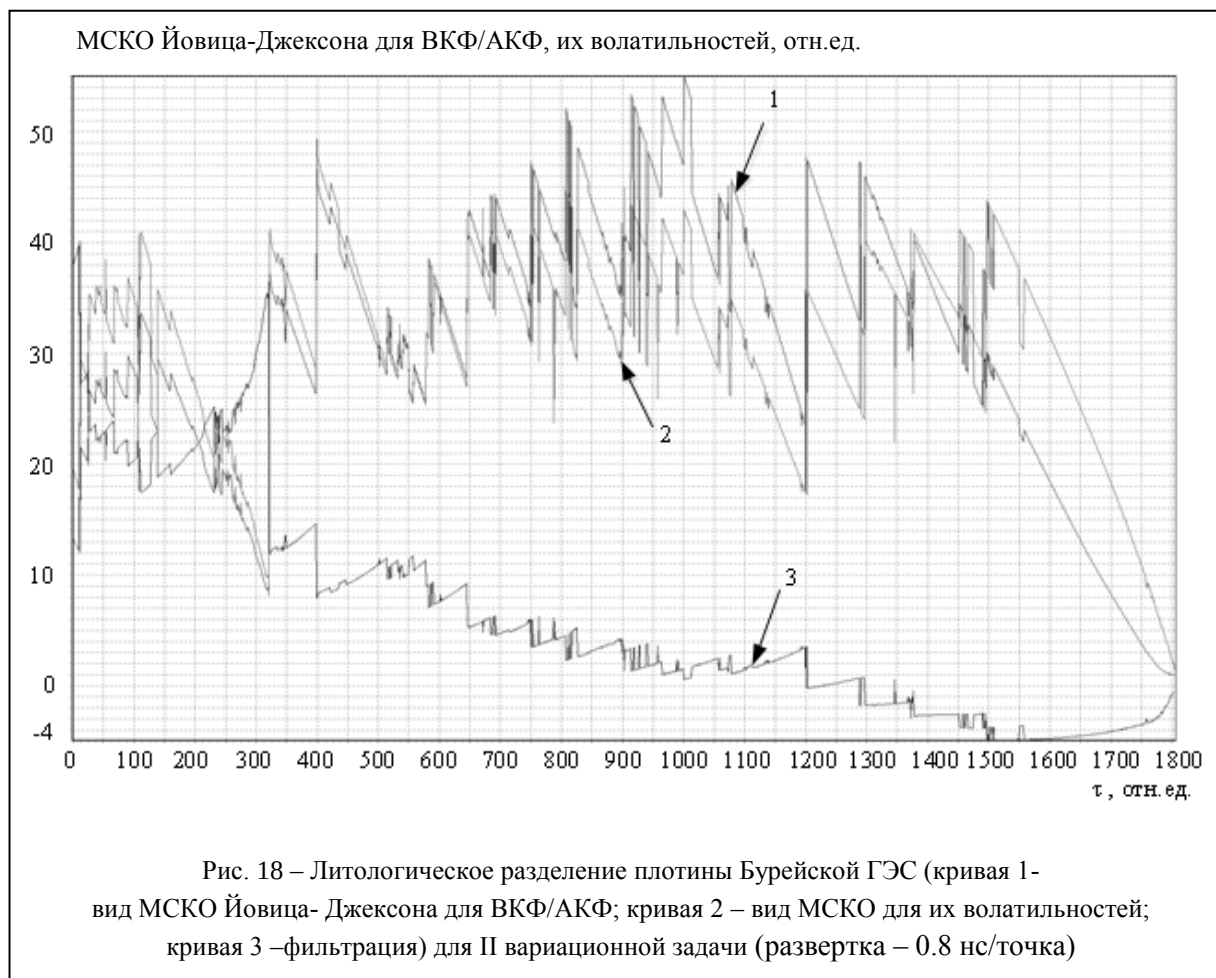
Отношение спектральных составляющих для ВКФ и АКФ дано в работе (М. С. Yovits and J. L. Jackson, 1955). Вывод формулы Йовица – Джексона (30) путем решения уравнения Винера –

Хопфа относительно АКФ и ВКФ для минимальной среднеквадратической ошибки (МСКО) дан В. Линдсеем (1978). Она позволяет произвести литологическое разделение подстилающей среды в точке зондирования.

$$\sigma_0^2 = \frac{N_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left[1 + \frac{2 \cdot S_s(\omega)}{N_0} \right] \cdot \frac{\partial \omega}{2 \cdot \pi}, \quad (30)$$

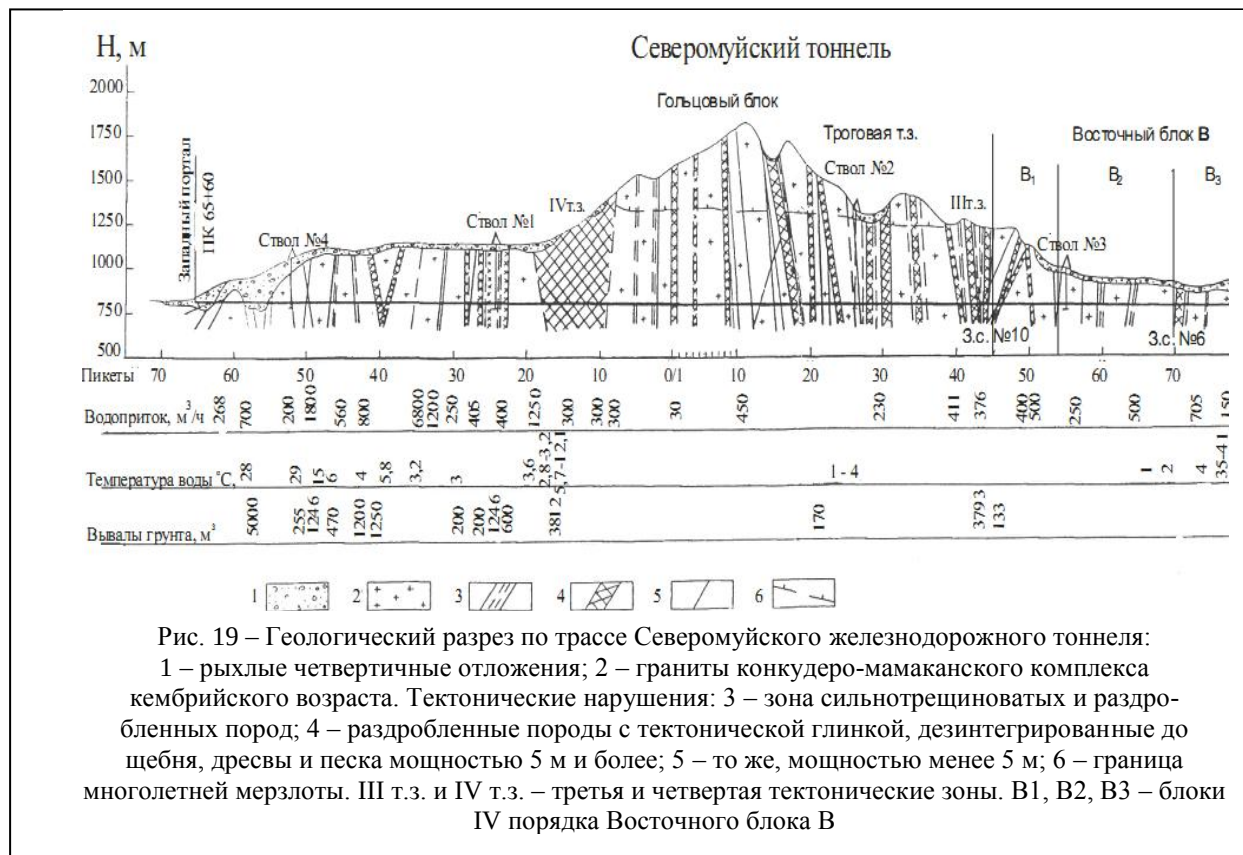
где $S_s(\omega)$, N_0 – спектральные плотности сигнала и шума; σ_0 – МСКО Йовица-Джексона.

Фурье преобразование АКФ как N_0 , ВКФ как $S_s(\omega)$ и, аналогично, для их волатильностей, реализованное для объёмов выборок $N_{1x,y}(t)$, $N_{2x,y}(t)$, $N_{3x,y}(t)$, позволяет произвести литологическое разделение плотины Бурейской ГЭС (рис. 18).



Алгоритм литологического разделения подстилающей среды, реализующий (14÷30), реализован единым программным комплексом. Наиболее затратная его часть (разложение по ящикам) реализована на языке ассемблер. Команды языка ассемблера один к одному соответствуют командам процессора. Фактически, они и представляют собой более удобную для человека символьную форму записи (мнемокоды) команд и их аргументов. Используются языки программирования C++, QBasic.

В V главе показаны примеры практического применения комплекса. В разделе 5.1 приведены результаты работ по ЭМИ СШП зондированию, выполненному в Северомуйском тоннеле БАМа (рис. 19) и на территории станции метро «Звенигородская» в г. Санкт-Петербурге.



В разделе 5.2 приведены результаты обследования качества бетонной кладки плотины Бурейской ГЭС и выявление в ней трещин, пустот и неоднородностей [28, 29]. В разделе 5.3

приведены результаты ЭМИ СШП мониторинга зоны «Размыва», г. Санкт - Петербург (рис. 20) и результаты мониторинга инженерно-геологического пространства г. Сочи вперёд забоя [7, 33, 37].

По результатам работ в г. Сочи ЗАО НПФ «Геодизонд» награждён 3 дипломами Тоннельной Ассоциации РФ в номинации «Безопасность при строительстве и эксплуатации подземных сооружений» в 2010÷ 2012 гг. В табл.2 в сравнении с остальными методами проходки (комбинированным и БВР —буро – взрывными работами) показано, что при проходке ТМПК (щит 1÷6) проведено 2174 измерения монопольными антеннами, по ним построено 692 прогноза вперёд забоя.

Таблица 2

№	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

В разделе 5.4 приведены результаты применения комплекса ЭМИ СШП зондирования на стадии разведки месторождений горючих сланцев в полупустынях Иордании [9] и саванне Мьянмы [44]. На рис. 21 представлен план кровли сланцев площади блока AUG22 (Иордания), построенный по данным ЭМИ СШП зондирования. В Мьянме определялась перспективность участков в пределах трёх бассейнов горючих сланцев (Mepale, Melamat and Phalu basins) путем дифференциация сланцев на «богатые» и «бедные» разности по содержанию в них сланцевого масла. На рис. 22 показано изменение по глубине спектральной плотности пяти существующих в спектре характеристических частот для скважины В4.

В разделе 5.5 приведен надводный вариант комплекса. Эффективность его применения показана в Прил. J.

В VI главе показаны возможности воздушных РЛС для изучения подстилающей среды с радиосинтезированной апертурой (РСА), которая работает в нижней части ВЧ - диапазона (20...90 МГц). Эксперименты с РСА–изображениями высокого разрешения убедительно демонстрируют высокое качество. В разделе 6.1 представлен самолётный вариант комплекса и

Эффективность самолётных ЭМИ СШП измерений подтверждена выявлением низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости влажных грунтов в разрезах, составленных в ходе облета дельты р. Невы.

В разделе 6.2 представлены результаты натурных испытаний подводного варианта комплекса [19, 43] подповерхностного ЭМИ СШП зондирования: в бассейне; на малой глубине (~3м); на большой глубине (~24м). Подводный вариант комплекса отличается от наземного геометрией антенн, наличием гидроизоляции и записью сигнала на компьютер. Эффективность подводных ЭМИ СШП измерений подтверждена выявлением железомарганцевой конкреции в придонных грунтах акватории Финского залива.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 ТУ, обеспечивает глубины контроля структуры подстилающей среды до 130 м.
3. Под линейку генераторов разработаны три типа широкополосных антенн подповерхностного зондирования – неоднородные микрополосковые, монопольные 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 - измерительная система комплекса обладает повышенной помехоустойчивостью благодаря отказу от использования сигнала синхронизации, формируемого в генераторе излучаемых импульсов и подверженного воздействию синхропомехи, 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 (первого в Российской Федерации) двухпутного тоннеля между станциями «Южная» и «Перспект Славы» линии 5 метрополитена г. Санкт-Петербург, непрерывного мониторинга инъекционного закрепления на ул. Карбышева г. Санкт-Петербург, в зоне “Размыва”.

10. Введение в состав комплекса измерителя параметров четырёхполюсника «ОБЗОР-103», обеспечивающего проверку антенн по КСВН в одной из точек зондирования, делает процесс измерения отражённых сигналов контролируемым.

В приложениях приведены наиболее громоздкие вычисления, результаты измерений и отзывы.

Статьи из перечня ВАК

1. 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.
2. 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.
3. Болтинцев В.Б. Применение радиолокации в геологических и подземных изысканиях / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, О. Н. Дерябин // Транспортное строительство. -1999, № 6. - С.23-24.
4. Болтинцев В.Б. Применение метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно-геологических изысканиях/ В. Б. Болтинцев и [др.] // Инженерная геология. - 2006, № 2 - С. 72-76.
5. Безродный К.П. Контроль инъекционного укрепления в грунтовых условиях Санкт - Петербурга / К. П. Безродный, А. Г. Мацегора, В. И. Маслак, А. И. Осокин, В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин // Жилищное строительство. - 2009, №2 – С.4-9.
6. Безродный К.П. Геофизическое обследование инъекционного закрепления заобделочного пространства методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / К.П. Безродный, В. Б. Болтинцев и [др.] // Жилищное строительство. - 2010, №5 – С.39-44.
7. Болтинцев В. Б. Мониторинг подземного пространства вперед забоя методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования на примере строящихся тоннелей в Сочи / В. Б. Болтинцев и [др.] // Жилищное строительство. -2010, №12. – С.40-44.
8. 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.
9. 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.
10. Болтинцев В.Б. Оценка обводненности горной выработки по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Жилищное строительство. -2011, №9. – С.34-37.
11. Болтинцев В.Б. Определение диэлектрических свойств сложных грунтов при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Промышленное и гражданское строительство. - 2011, №11. – С.25-28.

12. Болтинцев В. Б. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Журнал радиоэлектроники. - 2012, №1; <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.pdf>
13. 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; <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/13/text.pdf>
14. Черемисин А.А. Особенности широкополосной георадиолокации / А. А. Черемисин, В. Б. Болтинцев// Известия ВУЗов. Физика. -2012, т. 55, № 8/2.- С.12–19.
15. Болтинцев В.Б. Расширение возможностей мониторинга подземного пространства методом ЭМИ СШП зондирования // Жилищное строительство. -2012, № 9. – С.54-58.
16. Болтинцев В.Б. Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Журнал радиоэлектроники. - 2012, № 9; <http://jre.cplire.ru/jre/sep12/5/text.pdf>
17. Болтинцев В. Б. Обработка сигналов м-, дм- диапазонов длин волн при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Журнал радиоэлектроники. - 2013, № 3; <http://jre.cplire.ru/jre/mar13/1/text.pdf>
18. Болтинцев В. Б. Оценка наличия связанной воды в горной выработке по данным электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Жилищное строительство. -2013, № 4. – С.43-46.
19. Болтинцев В.Б. Подводный вариант комплекса электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // Инженерные изыскания. -2013, № 12. – С.48-53.

Патент

20. Пат. № 2144682. Российская Федерация 7 G 01 S 13/02. Способ радиолокационного зондирования геологического разреза / В. Б. Болтинцев; заявитель и патентообладатель Болтинцев В.Б. - №99104111/09; заявл. 01.03.1999; опубл. 20.01.00, Бюл.№ 2. – М.: 2000. <http://ru-patent.info/21/40-44/2144682.html>

Прочие публикации

21. Bezrodny, K. P. An advanced underground imaging radar / K. P. Bezrodny, V. B. Boltinsev, V. M. Efanov, V. N. Iljakhin, M. G. Tolstobrov // World Tunnel Congress '99.- Norway, Oslo, 1999. - P. 31-34.
22. Болтинцев В.Б. О новых геофизических методах исследования горного массива /В. Б. Болтинцев и [др.] // Труды Юбилейной научно-практической конференции “Подземное строительство на рубеже XXI века”.- М.: 2000. - С. 159-164.
23. Болтинцев В.Б. Геофизические методы для оценки инженерно-геологических условий и устойчивости пород впереди забоя во время сооружения тоннелей / В. Б. Болтинцев и [др.] // Труды Международной конференции “Тоннельное строительство России и СНГ в начале века”. – М.: 2002. - С. 441-444.
24. Болтинцев В.Б. Автоматизация изысканий с помощью метода СШП-зондирования // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. 2002, № 4- 5 - С. 141-144.
25. Свидетельство на полезную модель № 28289. Российская Федерация 7 Н 01 Q 7/00. Антенна для подповерхностного зондирования / В. Б. Болтинцев; заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ Геодизонд. № 2002126446/20; заявл. 07.10.02; опубл. 10.03.03, Бюл.№7. - М.: 2003.- 4с.

26. Свидетельство на полезную модель № 27228. Российская Федерация 7 G 01 S 13/02. Устройство для определения рельефа горизонтально-слоистого разреза / В. Б. Болтинцев и [др.] - заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ Геодизонд. № 2002118960/20; заявл. 15.07.02; опубл. 10.01.03, Бюл.№1. - М.: 2003.- 4с.

27. Свидетельство на полезную модель № 27233. Российская Федерация 7 G 01 N 29/24. Устройство для определения рельефа горизонтально-слоистого разреза / В. Б. Болтинцев и [др.] - заявитель и патентообладатель ЗАО НПФ Геодизонд. № 2002118961/20; заявл. 15.07.02; опубл. 01.01.03, Бюл.№1.- М.: 2003. -4с.

28. Безродный К. П. 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 – С.- Пб., 2004.-72с. – Деп. в ВНИИЦ 26.01.2004, № 01.200 315448 (Каталог НИОКР РФ 2010, приборостроение).

29. Власов В. М. Применение метода сверхширокополосного зондирования при обследовании инженерных сооружений. – Безоп. Энерг. Сооруж./ В.М. Власов, В. Н. Ильяхин, В. Б. Болтинцев и [др.] // Научно - технич. и произв. сб., вып. 14. –М.: 2004. - С.129-138.

30. Болтинцев В.Б. Инженерно-геофизический мониторинг методом импульсного электромагнитного сверхширокополосного зондирования / В. Б. Болтинцев, А. А. Черемисин, К. П. Безродный // Труды конференции «Научно-практические задачи Красноярской ж.д.» - Красноярск.- 2006. - С. 88–91.

31. Bezrodniy, K.P. Application of the methods electromagnetic pulse ultra broadband (EMP UMB) sounding and earth's electromagnetic field natural pulses (EEMFNP) to geological surveys in front of the heading of a tunnel under construction / К. Р. Bezrodniy, V. B. Boltinsev, V. N. Iljakhin // Proceedings ITA-AITES World Tunnel Congress 2009.- Budapest, Hungary, may 23-28; <http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/P-02/P-02-09.pdf>

32. Болтинцев В.Б. Перспективы использования сверхширокополосной георадиолокации на объектах железнодорожного транспорта / В. Б. Болтинцев, А. А. Черемисин //Труды тринадцатой научно – практической конференции КРИЖТИРГУПС, т.1- Красноярск. - 2009.-С. 213 - 217.

33. 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 // VII Международная конференция “Инженерная геофизика”: труды конф., -М.:,2011.: - С. 104-106. <http://www.earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=49983>

34. Болтинцев В.Б. Определение степени трещиноватости породного массива методом ЭМИ СШП зондирования / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, С. В. Андрианов// Всероссийская конференция “Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли”: труды конф., – Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2011. –Том I. – С. 129 - 132.

35. Болтинцев В.Б. Оценка реализации свойства сверхширокополосности Т-волн для антенн подповерхностного зондирования с параметрической оптимизацией поперечных сечений токоведущих линий // V Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2011. –Том I. - С.8-16.

36. Болтинцев В.Б. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // V

Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2011. –Том I. - С.32-37.

37. Болтинцев В. Б. Мониторинг подземного пространства методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин // Метро и тоннели. 2011, №6 – С.40-41.

38. Salikhov R. Forming New Market Niches: Strategy For Improving The Competitiveness of Oil Shale Products / R. Salikhov, M. Petrov, E. Golmshtok, V. Boltintsev, V. Iljakhin , S. Andrianov; http://www.oil-shale.ru/data/uploads/Salikhov_Ruslan_Atomenergoproekt_JIOSS_2012.pdf

39. Болтинцев В.Б. Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования // VI Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2012. –Том I. - С.7-13.

40. Болтинцев В. Б. Обработка сигналов м-, дм- диапазонов длин волн при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // VI Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2012. –Том I. - С.21-27.

41. Boltintsev V. B. METHOD OF ELECTROMAGNETIC PULSE ULTRA WIDEBAND PROBING OF THE UNDERLYING MEDIUM / V. B. Boltintsev, B. N. Lyakhin, K. P. Bezrodnyi // DOI: 10.1615/JRadioElectr.v1.i2.50 <http://www.begellhouse.com/journals/49791ac230bedeec>

42. Болтинцев В.Б. Аэровоздушный (самолётный) вариант комплекса подповерхностного электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования для инженерно – геологических изысканий / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, К. П. Безродный // Инженер и промышленник сегодня, № 2 (2), апрель, 2013. - С. 40 -43.

43. Болтинцев В.Б. Подводный вариант комплекса электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования для изысканий при строительстве намывных территорий / В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, С. В. Андрианов // Инженер и промышленник сегодня - № 4 (4), август, 2013. - С. 56 -60.

44. 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>

45. Болтинцев В. Б. Восстановление поля в дальней зоне антенны подповерхностного зондирования (импульсная амплифазометрия) // II Всероссийская Микроволновая конференция: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2014. - С.509-513.

46. Черемисин А. А. Опыт применения метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования на объектах железной дороги / А. А. Черемисин, В. Б. Болтинцев, Р. Е. Тойб, С. В. Широков// Всероссийская научно – практическая конференция “120 лет железнодорожному образованию в Сибири”: сб. статей,— Красноярск: Изд-во «Касс», 2014. - С. 160–162.