

## МЕТОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В. Б. Болтинцев<sup>1</sup>, В. Н. Ильяхин<sup>1</sup>, К. П. Безродный<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> ЗАО НПФ «Геодизонд», <sup>2</sup> ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»

Получена 16 января 2012 г.

**Аннотация.** Представлен метод подповерхностного ЭМИ СШП зондирования, отличающийся использованием ДДРВ генераторов для излучения электромагнитных волн. Большая глубина распространения сигнала основана на проявлении низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости среды, наличие которой обусловлено вызванной поляризацией с дипольно-релаксационным механизмом, описывающим поведение влажного грунта под воздействием сильного электромагнитного импульсного поля. Приведена методика решения обратной задачи для глубины и сопоставление прогнозных данных ЭМИ СШП зондирования с результатами прямой проходки.

Ключевые слова: сверхширокополосный; дрейфовые диоды с резким восстановлением обратного напряжения; уравнение (метод) Винера-Хопфа; георадиолокация.

**Abstract.** A method for subsurface EMI UWB sounding is using different DSRD (Drift Step Recovery Diodes) generators for the emission of electromagnetic waves. More depth of the signal propagation is based on the manifestation of the lowfrequency dispersion of the dielectric constant of the medium, which is due to the presence of induced polarization with the dipole-relaxation mechanism, which describes the behavior of wet soil under the influence of a strong electromagnetic pulse field. The article describes methods for solving the inverse problem of depth and a comparison of EMI UWB sounding predictions ahead of tunnels with the results of direct tunneling.

**Keywords:** ultra wide band - UWB; drift sep recovery diodes; Wiener – Hopf equation (method); underground radar measurements.

## Введение

Последние сорок лет для решения широкого спектра задач по оценке состояния горного массива все чаще привлекается георадиолокация – технология, использующая при изучении подземного пространства принципы радиолокации (активно разрабатывается в США, Франции, Швеции, России и др.).

Метод электромагнитного импульсного (ЭМИ) сверхширокополосного (СШП) зондирования, как один из методов георадиолокации, нашел применение в инженерной геологии и строительной индустрии за счет увеличения глубины исследований.

Это стало реальным после разработки генераторов на дрейфовых диодах с резким восстановлением обратного напряжения (ДДРВ) – работы И.В. Грехова, А.Ф. Кардо-Сысоева, В.М. Ефанова (1986). Пиковая амплитуда тока в таких приборах может достигать 800 А [1]. Увеличению глубины также способствовали работы по микрополосковым антеннам [2]. Для оценки состояния подстилающей среды требуется идентификация её слоистой структуры. Эта задача является существенно некорректной [3]. Её решению способствовали работы Г.А.Арчи и В.Н.Дахнова [4] о связи сопротивления с пористостью, водонасыщенностью и проницаемостью песков для растворов с разной минерализацией; А.Д.Фролова – о предельной концентрации KCl и NaCl в поровых растворах, характеризующих электропроводность грунта в МГц-диапазоне частот; Л. П. Семихиной – об экстремумах диэлектрических потерь воды в диапазоне частот  $10^4 \div 10^8$  Гц. Они впервые позволили выявить в районе частот  $\sim 10$  МГц сильную низкочастотную дисперсию диэлектрической проницаемости среды, наличие которой ранее лишь предполагалась. Эти теоретические и практические основы обусловили эффективную применимость метода.

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, а при идентификации результатов ЭМИ СШП зондирования помимо электродинамических используются электрофизические свойства объекта (наличие двух и более релаксаторов Дебая, взаимодействие проводимости и вязкости, наличие анизотропии электропроводности среды и т.д.).

### **Особенности поглощения почвой энергии электромагнитного поля**

Общие закономерности поведения грунтов в переменном электромагнитном поле обусловлены тем, что почва любой подстилающей среды является многофазной гетерогенной дисперсной системой. Для неё характерны процессы поляризации, релаксации и электропроводности, которые во многом определяются наличием в ней поверхностей раздела фаз, обуславливающих величину поверхностной проводимости. На этих поверхностях происходит формирование объёмных зарядов и двойных электрических слоёв (Г. Л. Ф. Гельмгольц, 1879), в свою очередь определяющих значения напряжённости внутреннего электрического поля среды и контактную разность потенциалов.

Природа низкочастотного диэлектрического резонанса достаточно сложна, поскольку включает в себя как электродинамические свойства среды, так и электрофизические свойства. К первой группе относятся: киральность (Б. З. Каценелебаум и др., 1997); влияние профиля диэлектрической проницаемости (В.В. Загоскин и др., 1999); наличие пространственной анизотропии проводимости (С.В. Доровский, В.Н. Доровский, 2006) и др.

Электрофизические свойства, описываемые комплексной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega)$  и тангенсом угла

диэлектрических потерь  $tg\delta$ , в подстилающей среде обусловлены всеми видами структурной, дипольно-релаксационной и ионно-релаксационной поляризации. Первой составляющей электрофизических свойств являются  $\varepsilon(\omega)$  и  $tg\delta$  «почвенного поглощающего комплекса» - совокупности высокодисперсных минеральных, органоминеральных и органических частиц, обладающих ионообменной способностью. Для почвы характерно преобладание отрицательного поверхностного заряда, поэтому её способность к поглощению катионов ярче, чем для анионов. Обменные катионы, находящиеся на поверхности почвенных частиц, 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 (С. В.Нерпин, А. Ф. Чудновский, 1967).

Электропроводность почвы и контактная разность потенциалов, формирующаяся на поверхности раздела фаз двойных электрических слоёв (ДЭС), во многом обусловлена содержанием илистой фракции, гумуса и ёмкостью поглощения [5]. Ёмкость поглощения зависит от свойств и объёмной концентрации зарядов ДЭС, увеличение которой приводит к возрастанию электрической ёмкости системы и доли структурной поляризации.

В солончаках, как правило, 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 [6,7].

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.

Так, наличие в среде двухвалентных катионов кальция и магния обуславливает релаксационные процессы (для краснозёмов  $Ca^{++} + Mg^{++} \sim 55\%$  [8,9]); высокое содержание обменного натрия приводит к резкому увеличению дисперсности среды [10, 11], увеличению плотности поверхностного заряда и контактной разности потенциалов [11]. Поглощение поля ЭМВ приводит к появлению в среде релаксационных колебаний, которые определяются:

- величиной поверхностной проводимости [12,13];
- ёмкостью поглощения органических коллоидов;
- возрастанием доли дипольной поляризации за счёт ориентации в сильном электрическом поле органических коллоидов.

Электропроводность подстилающей среды определяется подвижностью легкорастворимых солей [14,15] и ЭДС почвенного раствора [5]. Например, своеобразие солончаков, занимающих территориальное положение вдоль Мёртвого и Красного морей (по Иорданскому разлому), обусловлено высокой степенью подвижности всех заряженных частиц [8,16], т.е. широким спектром значений энергии активации процессов релаксации. Для гидроморфных (активных к воде) солончаков характерен максимум  $tg\delta$  на  $\approx 1$  МГц с последующим его падением при увеличении частоты [17].

### **Характеристические частоты в подповерхностной среде**

В табл. 1 приведены частоты отраженных сигналов ЭМИ СШП зондирования 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 ( $\sim 20$ нс) [17]. Представлены частоты отраженного сигнала по измерениям, проведенным на бетонном фундаменте при различных комбинациях приемных и передающей антенн и четырех ДДРВ - генераторов (амплитуда, фронт, длительность измерены по уровню  $0.1 \div 0.9$ ) для трехслойной модели (0.5 м – бетон, 2.5 м – насыпной грунт, далее суглинки).

Для принимаемых длин волн  $\lambda_{\max}$ : м - ( $\lambda_{\max} \sim 3.5$ м): м<sub>1</sub> - ( $\lambda_{\max} \sim 1.6$ м): дм - ( $\lambda_{\max} \sim 46$ см): дм<sub>1</sub> - ( $\lambda_{\max} \sim 16$ см) диапазонов отношение значений эффективной площади приемных антенн составляет приблизительно 67.8 : 10.8 : 4 : 1, отношение центральных частот этих антенн составляет 300 МГц : 350 МГц : 786 МГц: 920 МГц. 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 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 низкочастотных составляющих в диапазоне частот от 50 МГц до 75 МГц отмечено в некоторых эпизодах георадарных исследований [19]. По данным Института органической и физической химии им. А.Е.Арбузова в диэлектрических характеристиках масляных фракций Нурлатского нефтегазового месторождения присутствуют резонансы на 40.2 МГц и 85.7 МГц [20]. Наличие максимума  $\varepsilon''$  при некоторой радиочастоте

замечено в мерзлотоведении [21]. Для мерзлых глинистых грунтов отмечается дисперсионный переход  $\varepsilon'$  к динамическим (высокочастотным) значениям на частотах  $\geq 1 \div 10$  МГц, а максимум  $\varepsilon''$  выражен достаточно четко [22]. 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.

Таблица 2

Название объекта, тип грунта	Частота по каналу м-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 сигнал ЭМИ СШП зондирования. Эти частоты зависят от типа сред и материалов природно-технических объектов, а также от их состояния в текущий момент времени; эти частоты можно назвать характеристическими.

Таким образом, данные ЭМИ СШП зондирования выявляют наличие характеристических частот для широких классов природных сред и материалов технических объектов. Также и природно-технические объекты, включающие бетоны и грунты, при воздействии на них ЭМИ СШП сигналом формируют собственные характеристические частоты.

Комплекс ЭМИ СШП зондирования

Метод ЭМИ СШП зондирования [27] основан на решении обратной задачи методом Винера – Хопфа и реализуется комплексом (рис. 1), имеющим в составе:

- 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 от 1 кВ, 4.77 кВ, 6.3 кВ, 9.87 кВ; пиковую амплитуду тока – 20÷120 А.

Перечисленные характеристики генераторов измерены в полосе 0÷20 ГГц [2]; метрологически аттестованные в полосе частот 0.3 ÷ 1500 МГц приемные и передающая антенны. Для последней согласование со средой по Е-составляющей поля реализовано «ямой Брюстера» - угол падения излучаемой волны ~ (68° ÷ 74°) для волнового сопротивления среды 91.4÷93.4 Ом;

приемно-регистрирующий блок с высокой помехозащищенностью для записи принимаемых сигналов ~20 мВ÷100 В в полевых условиях. Указанные значения определены метрологически.

Стоимость аппаратных средств, безопасность эксплуатации, малые размеры и вес аппаратуры делают данный метод достаточно доступным. Процесс измерения в одной точке зондирования занимает несколько десятков секунд. Весь комплекс полевой аппаратуры питается от постоянного напряжения 12 В. Суммарная потребляемая мощность не более 150 Вт. Вес комплекса ≤ 15 кг. Общий вид комплекса представлен на рис. 1.

Исходя из определения поверхностного импеданса подстилающей среды как отношения тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей  $E_\tau$  и  $H_\tau$  на границе раздела сред воздух – подстилающая среда [23]

$$Z_{\text{среды}} = \frac{E_\tau}{H_\tau},$$



можно говорить об измеряемости этой величины и по результатам антенных измерений оценить качество согласования антенны с подстилающей средой. Например, последовательное соединение двух импедансов (антенна



Рис.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 м1- диапазона). Приёмник – цифровой осциллограф TDS3054

и среда)  $Z_a$  и  $Z_{среды}$  оценивается измеряемыми величинами

- коэффициентом отражения ( $|R|$ , или элементом  $S_{11}$  матрицы  $\|S\|$  [24])

$$|R| = \frac{Z_{среды} - Z_a}{Z_{среды} + Z_a},$$

- коэффициентом стоячей волны по напряжению

$$K_U = \frac{1 + |R|}{1 - |R|}.$$

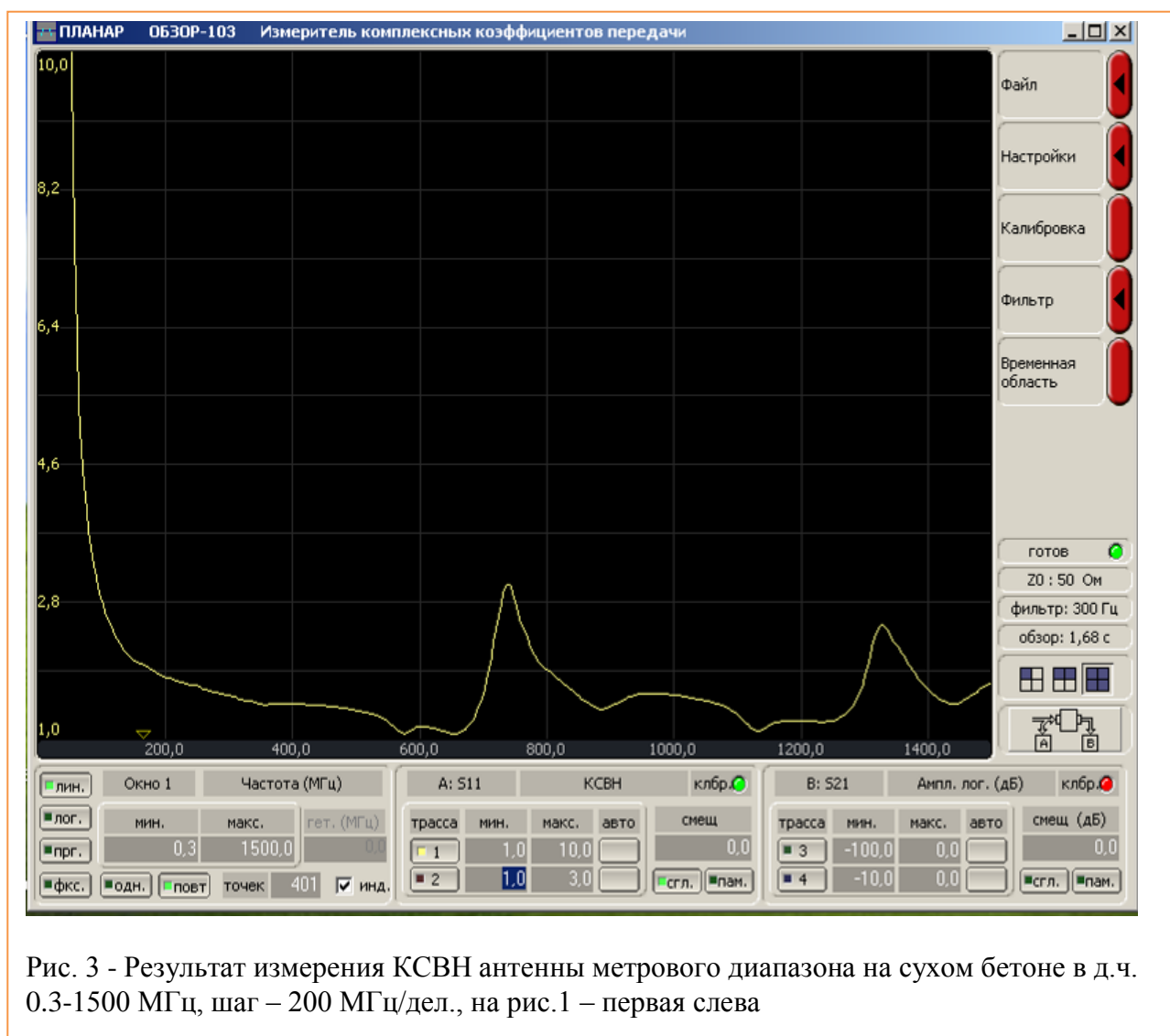
Эти определения измеряемых величин позволили реализовать

следующее: лабораторная установка для измерения КСВН создана на базе измерителя комплексных коэффициентов передачи «ОБЗОР - 103» и предназначена для проверки работоспособности собственно антенн и 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 ЭМИ СШП зондирования.

На рис. 2 представлена лабораторная установка для измерения КСВН ( $K_U$ ) антенны метрового диапазона, включающая собственно антенну м- диапазона, подключенный к ней направленный ответвитель с измерительной секцией PLANAR, 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 (красный). Интерфейс прибора как результат измерений  $K_U$  антенны м-диапазона показан на рис. 3.



Приемно-регистрирующий блок с высокой помехозащищенностью комплекса ЭМИ СШП зондирования, предназначенный для записи принимаемых сигналов  $\sim 20 \text{ мВ} \div 100 \text{ В}$  в полевых условиях, представляет собой информационно-измерительную систему (ИИС) на базе цифрового стробоскопического осциллографа TDS3054. Основные элементы такой ИИС и её технические характеристики представлены на рис. 4. ДДРВ – генератор со снятой крышкой показан на рис. 5.

Моделирование на основе применения неразделяющегося решения уравнения Клейна – Гордона для электрической и магнитной составляющих нестационарного электромагнитного поля в диспергирующей среде без потерь (Шварцбург А.Б., 1998) 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) темпы дисперсионной деформации гармоник электрической и магнитной составляющих поля по глубине существенно различны.

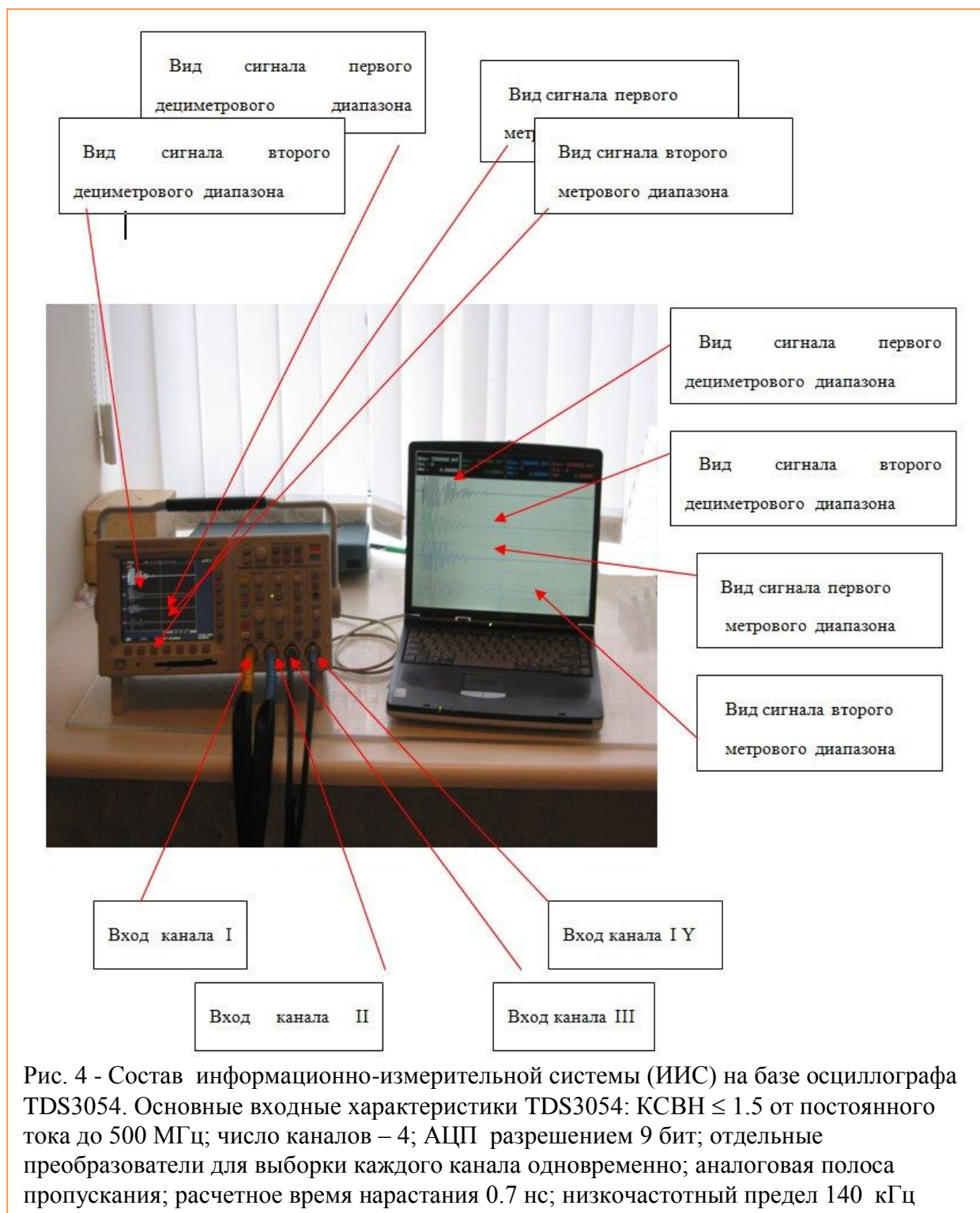
Экспериментально установлено [25], что структура отражённых сигналов ЭМИ СШП зондирования существенно отличается от откликов на традиционные модели модулированных квазимонохроматических сигналов:

- распределение поля (напряженность) излученного видеоимпульса в раскрыве передающей антенны представляет собой вторую производную от формы импульса [25];

- передний и задний фронты излучаемого видеоимпульса несимметричны (рис. 6);

- расстояния между точками пересечения нуля принимаемого сигнала неравны (рис. 7, 8).

На рис. 6 представлен вид импульса (амплитуда  $\sim 9.87$  кВ) ДДРВ генератора на экране осциллографа TRM8105 ( $\Delta f \sim 16$  ГГц) с использованием аттенюатора BARTH ( $\Delta f \sim 26$  ГГц).





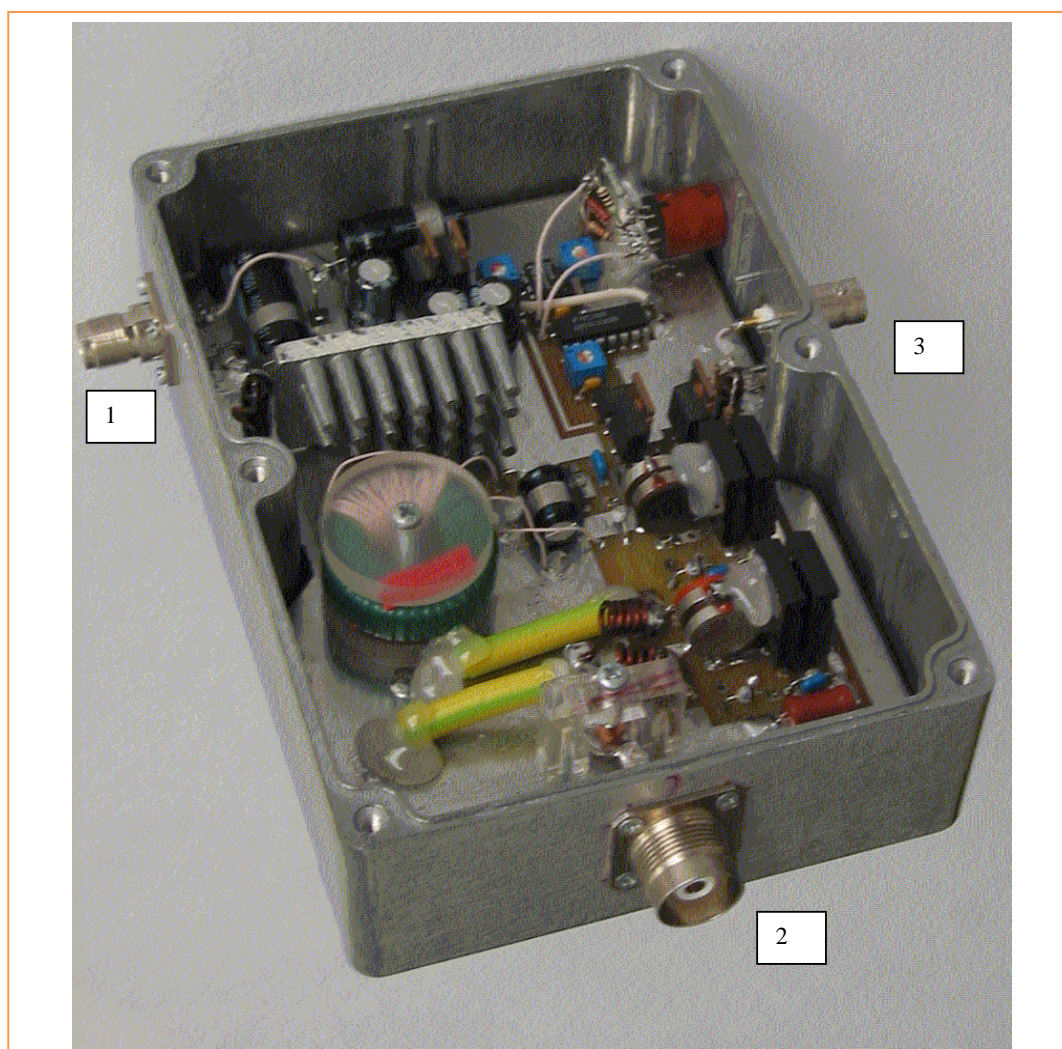


Рис.5 – Вид ДДРВ генератора со снятой крышкой (1- разъем питания, 80 мА, 12 В; 2 – разъем выходного сигнала; 3 – разъем синхронизации)

На рис. 7, 8 представлены результаты измерений отражённых сигналов,

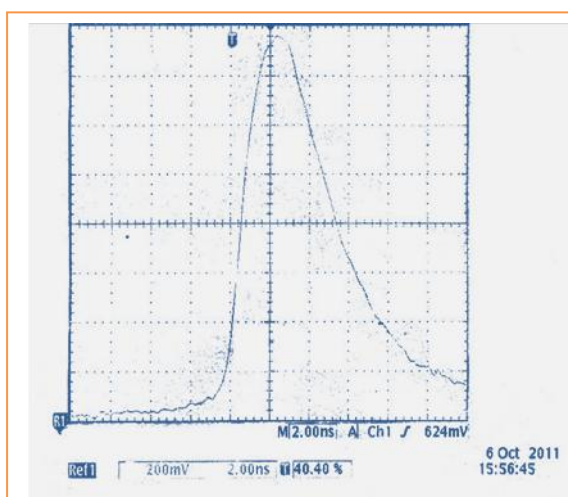


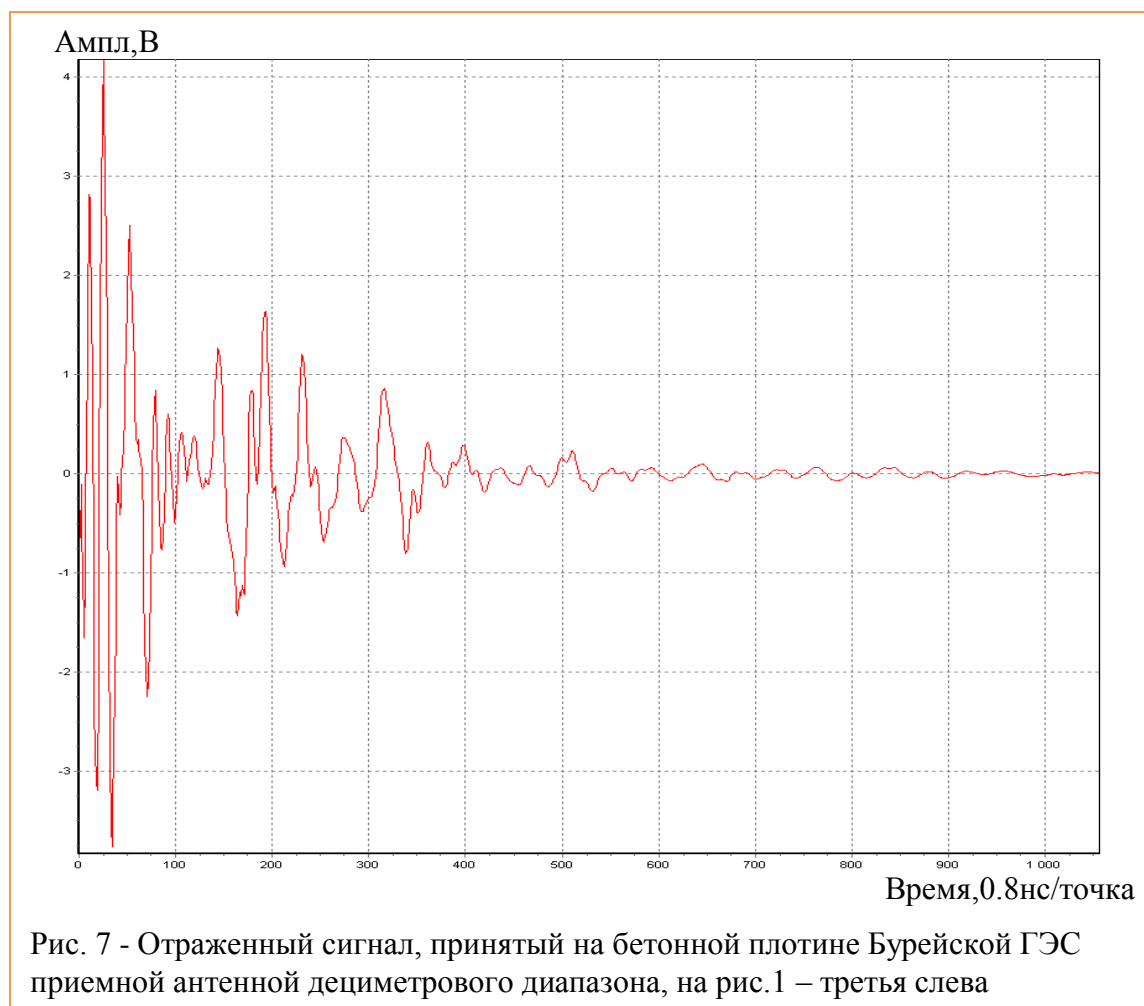
Рис.6 - Вид импульса генератора ДДРВ (фронт ~1 нс, длительность ~10 нс. амплитуда ~ 9870 В)

выполненных на бетонной плотине Бурейской ГЭС. Эти сигналы измерены в метровом (м-) и дециметровом (дм-) диапазонах длин волн и рассматриваются как эталонный класс сигналов, характерный для бетонных поверхностей (высота бетонной плотины ~ 70 м).

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.

Для метода ЭМИ СШП зондирования высокая точность измерений отраженного сигнала определяется следующими факторами: стабильностью параметров генераторов [26]; многоканальностью ИИС приема отраженных сигналов большой амплитуды [27]; согласованием приемных и передающей антенн с подстилающей средой по волновому сопротивлению [28]; совершенствованием методов обработки измерений [27, 29]; учетом данных метрологического обеспечения измерительных возможностей комплекса.



Современные способы литологического расчленения подстилающей среды базируются на двух методах:

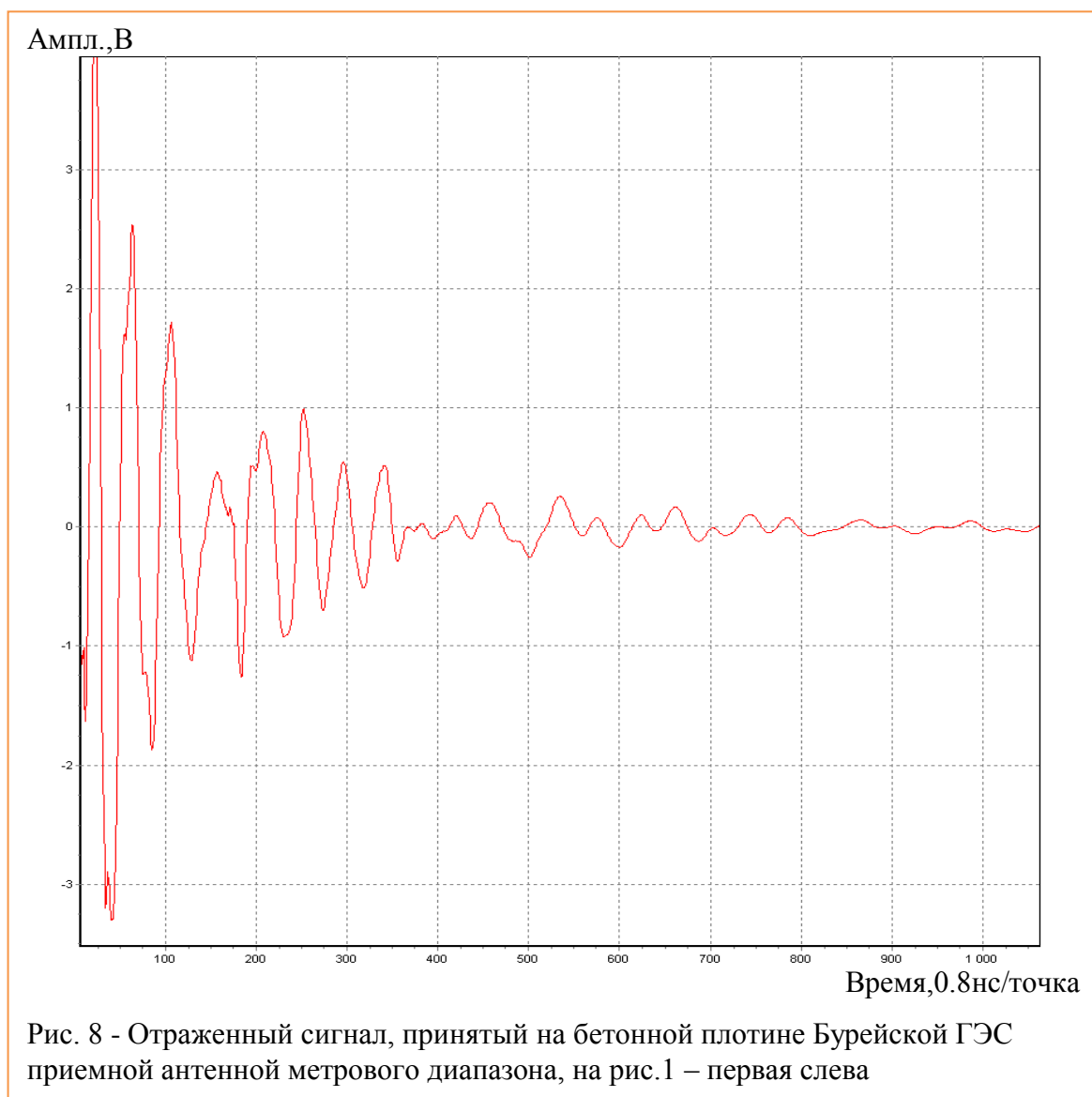


Рис. 8 - Отраженный сигнал, принятый на бетонной плотине Бурейской ГЭС приемной антенной метрового диапазона, на рис.1 – первая слева

- построении годографа и его модификациях (синфазность и т.д.);
- моделировании волнового поля.

### **Методика определения глубины залегания слоя (объекта)**

В методике идентификации образов для ЭМИ СШП зондирования при решении обратной задачи использовано уравнение Винера – Хопфа [27,29].

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 расширило возможности инженерно-геологических изысканий [25].

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. Если скорость света известна, задержка зондирующего сигнала является величиной измеряемой, то определение  $\epsilon'_s$  является в общем случае сложной задачей. На 90% территории РФ первый слой подстилающей среды – влажные грунты.

На рис. 9 приведена зависимость  $\epsilon'_s$  песчано – глинистого грунта от объёмной влажности  $W_v, \%$  в частотном диапазоне нескольких октав (50 Гц ÷

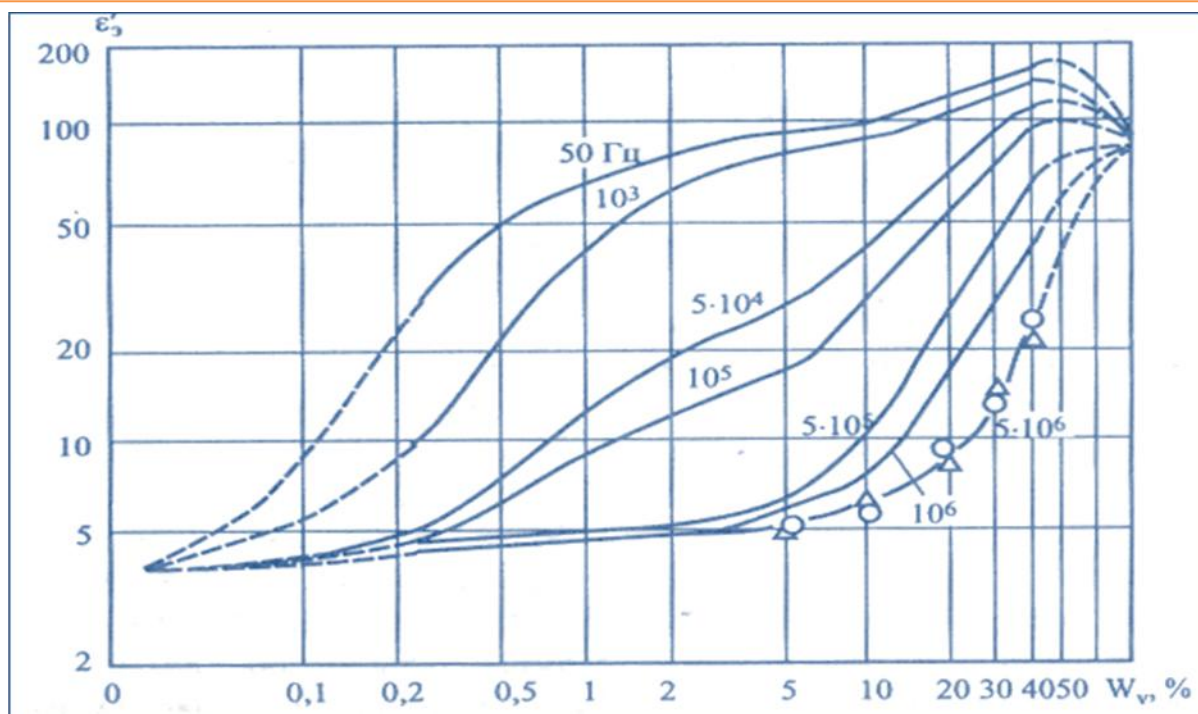


Рис. 9 – Зависимость  $\epsilon'_s$  песчано – глинистого грунта при объёмной влажности ( $W_v, \%$ ) на различных частотах

500 МГц). С повышением частоты ( $\geq 0,5$  МГц) начинает преобладать релаксационный компонент ориентационной молекулярной (дипольной) поляризации. Эта закономерность подтверждается во влагометрии талых



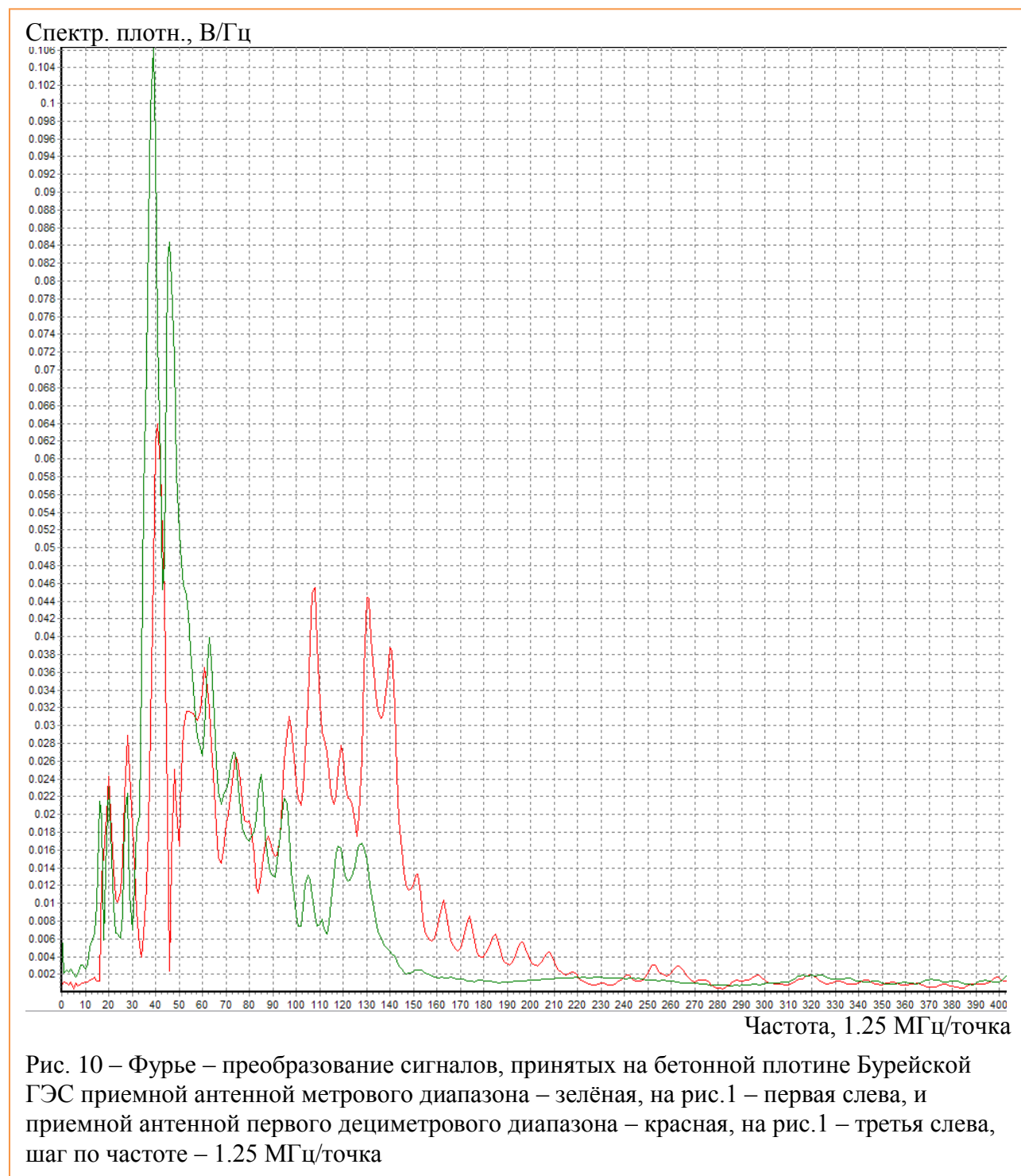
эоловых песков [30, 31] и глинистых грунтов [32] на частоте  $\sim 500$  МГц ( $\circ$  и  $\Delta$  на рис. 9). Объединяя результаты экспериментов [33] по определению  $\varepsilon'_s$ , мелкозернистого кварцевого песка с данными лабораторных измерений [30] для эолового песка и лёсса, можно составить 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. Таким образом, электрофизические свойства песчано – глинистых грунтов в переменных электромагнитных полях определяются их влажностью. Влияние минерального состава имеет второстепенный характер.

#### **Идентификация наличия воды по проявлению низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости среды**

Экспериментально установлено [34], что частотная характеристика  $tg\delta$  воды имеет  $\min$  в районе 25 МГц, влажность первого слоя всегда измеряема, далее по данным рис. 9 определяется  $\varepsilon'_s$ , и по указанной выше формуле определяется  $L$ . Погрешность  $\delta L, \%$  данной методики определения глубины  $\leq 1\%$ . Снижение  $\delta L$  возможно за счёт использования моделей  $\varepsilon'_s$ , (Дебая, Коула – Коула, Коула – Девидсона, Хаврильяка - Негами) [35,36,37,38], для этого по измеренной  $W_v$  на дневной поверхности между кривыми  $10^6 \div 500 \cdot 10^6$  Гц ( $\circ$  и  $\Delta$  на рис. 9) строится частота центра тяжести Фурье-образа отражённых сигналов (рис. 10). Таким образом, уточняется значение  $\varepsilon'_s$ .

Общим критерием диэлектрических спектров (А. Р. Хиппель, 1954) – синоним «релаксационные спектры» [34] - 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 возрастет 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 [39,40].

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 комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ).

Вид сигнала «на просвет», снятый на приёмную антенну типа «электрический диполь» с глубины  $\sim 3$  м (глубина реки в данном месте  $\sim 6$  м) на полигоне для измерения частотной дисперсии диэлектрической проницаемости речной воды (р. Нева, г. Санкт - Петербург) приведен на рис. 11. Расстояние между передающей антенной и приемным диполем  $\sim 30$  м.

На рис. 12 показана частотная зависимость  $\lg(tg\delta)$  воды [34, 41, 42, 43] и водного раствора  $NaCl$  с проводимостью 100 мкСм/см [43]. Из этих данных следует, что нижняя (по частоте) точка минимума функции  $\lg(tg\delta)$  имеет значение  $\sim 25$  МГц – частотный предел, к которому стремится функция  $\lg(tg\delta)$  при снижении концентрации солей в воде.

Анализ данных по этому вопросу [34, 41, 42, 43] 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. 12).

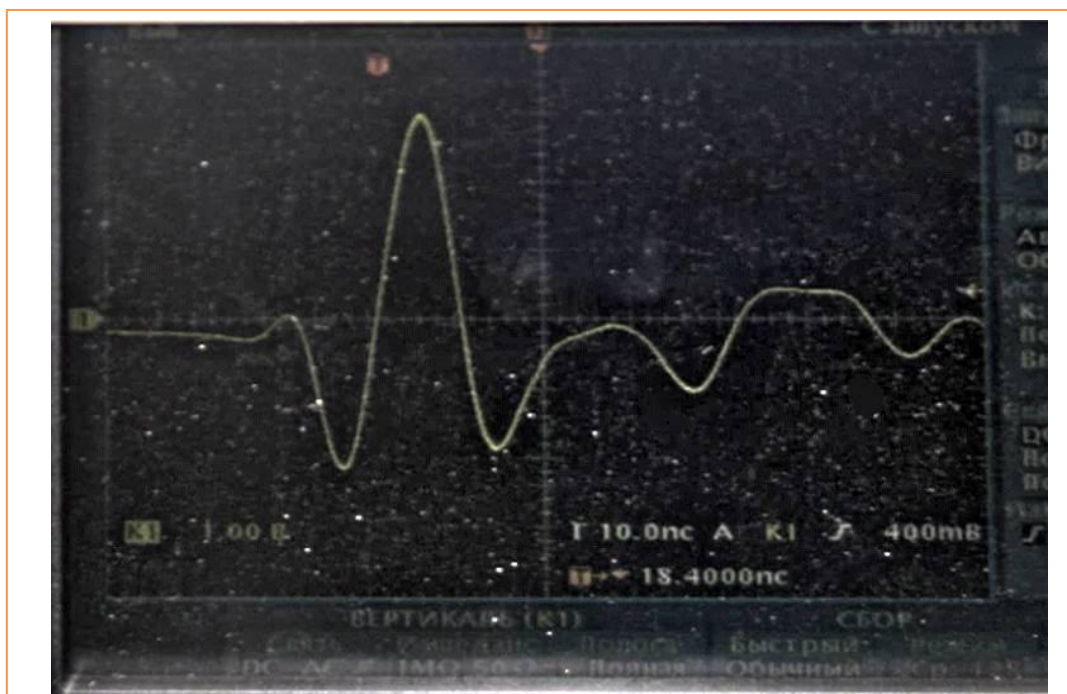


Рис. 11 – Вид сигнала «на просвет», снятого на приёмную антенну типа «электрический диполь» с глубины ~ 3 м (глубина реки в данном месте ~ 6 м) на полигоне для измерения частотной дисперсии диэлектрической проницаемости речной воды (р. Нева, г. Санкт - Петербург)

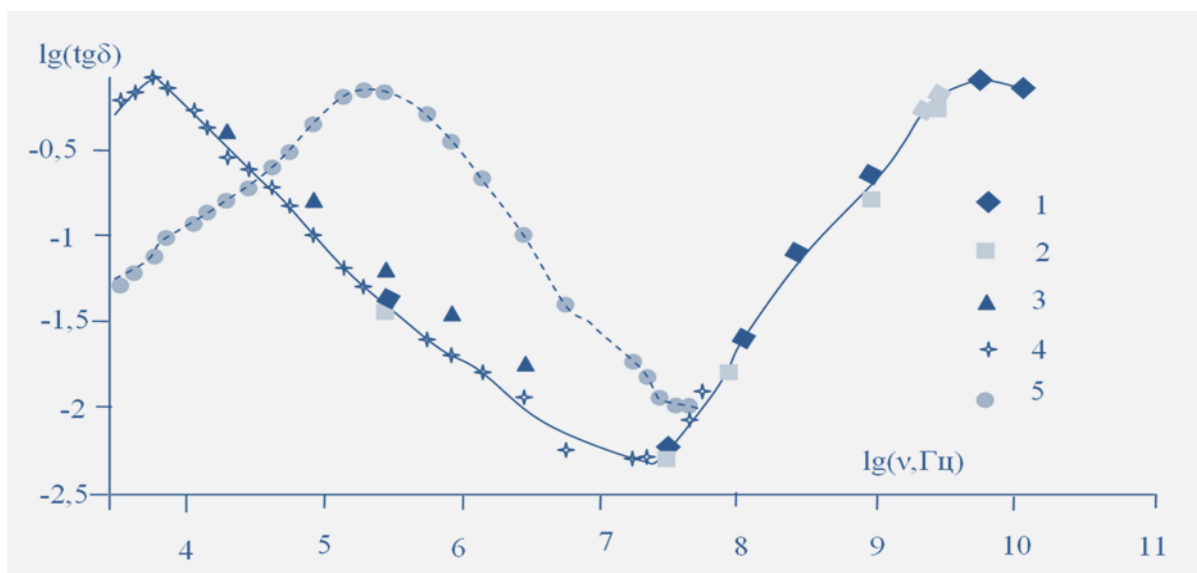
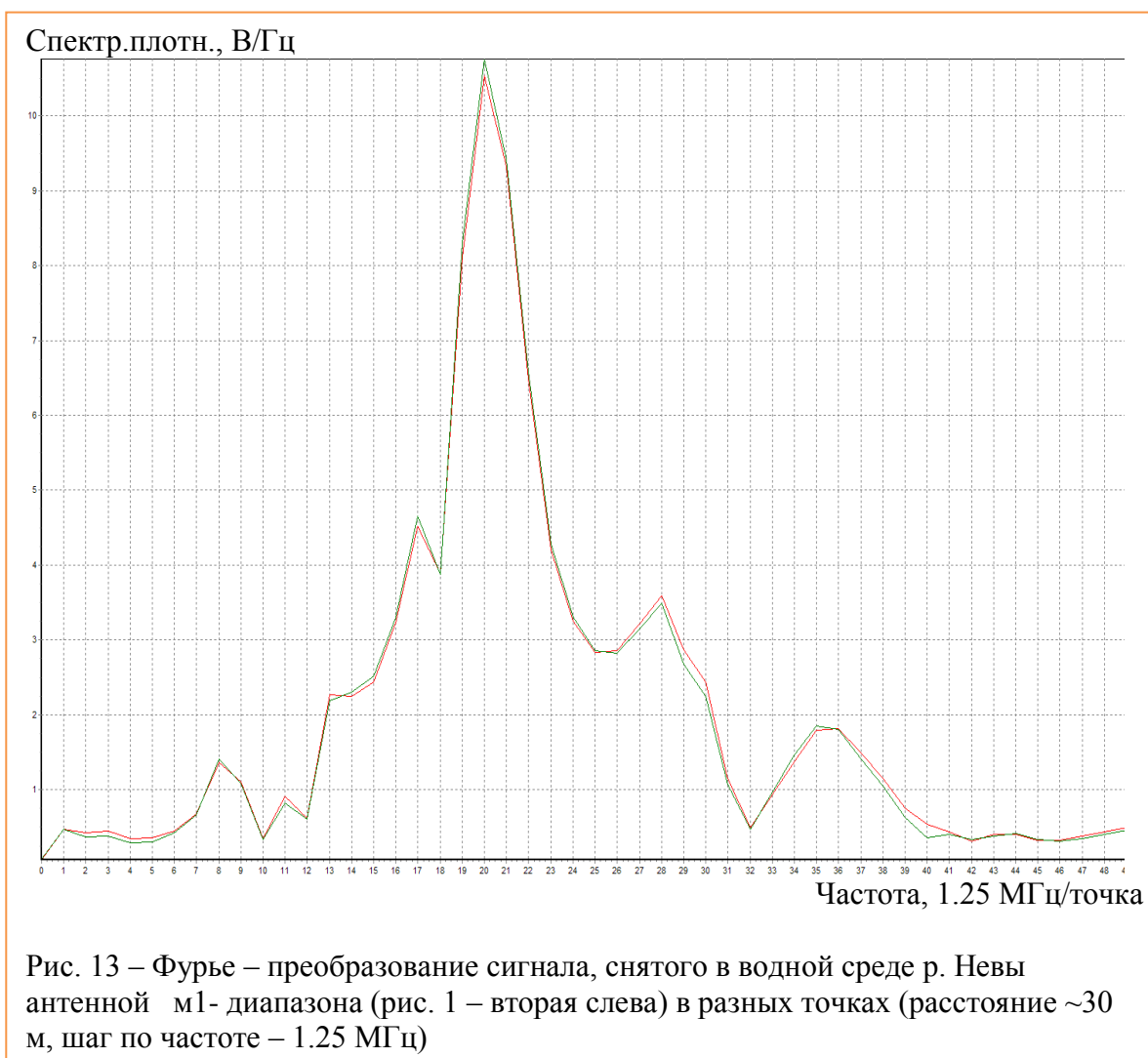


Рис. 12 – Частотная зависимость  $\lg(tg\delta)$  воды (1-4) и водного раствора  $NaCl$  с проводимостью 100 мкСм/см (5) по данным: 1- (Ахадов Я. Ю. 1972); 2 –(Хиппель А.Р. 1959); 3–(Тонконогов М.П., Векслер В.А., Биржанов К.Ж. 1975); 4 – (Семихина Л. П. 2007)

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

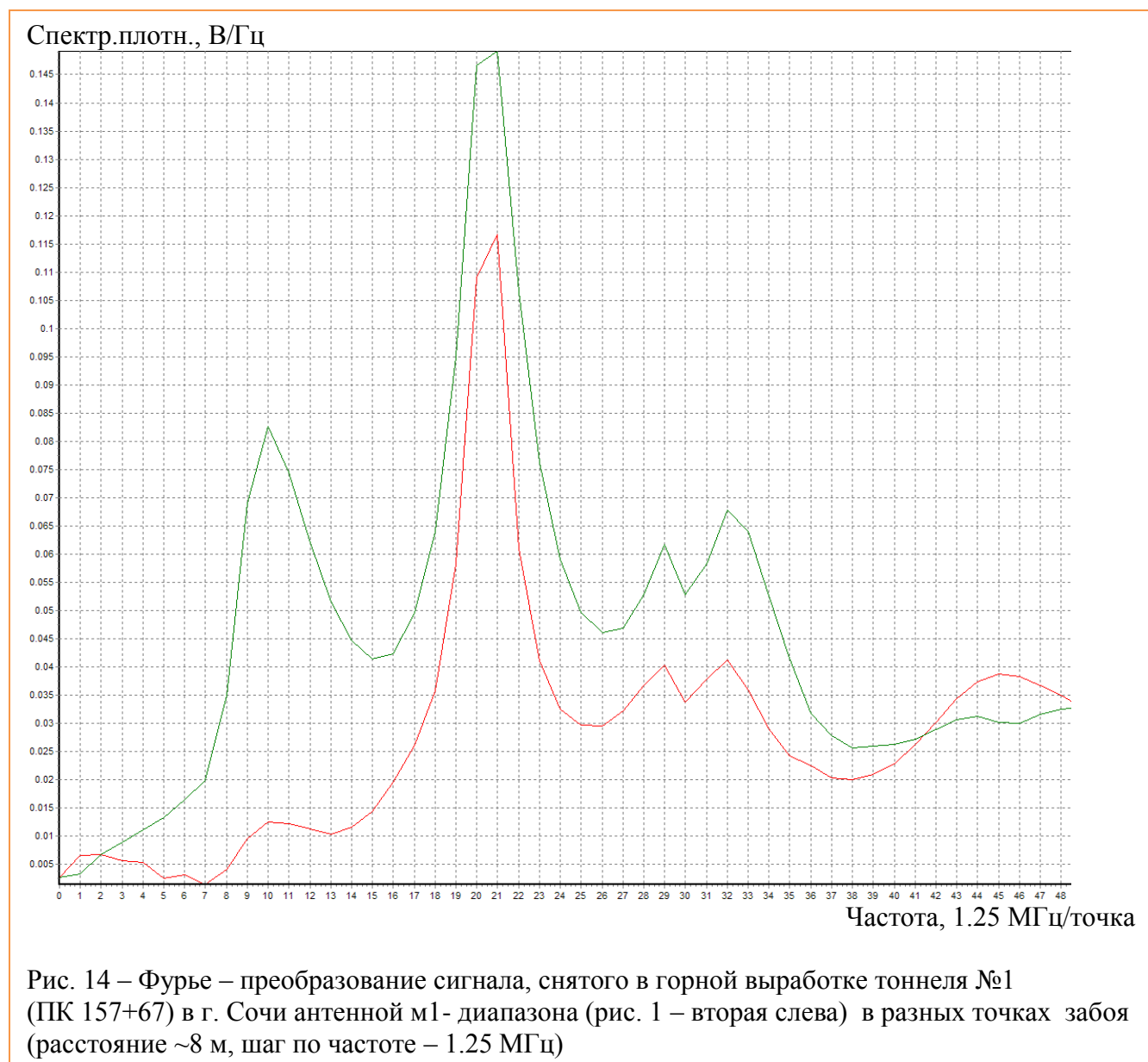
чистой водой, размытый переходный слой на границе между гидратной оболочкой и объёмной водой отсутствует. Полагается, что концентрационная граница, выше которой объёмная вода в растворе отсутствует, в первом приближении соответствует максимуму удельной электропроводности раствора. Подобное представление о структуре водных растворов предлагает А.А.Потапов (1994). А.С.Лилеевым (2004) 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.



Для проверки возможности получения оценки обводненности горных пород при строительстве подземных выработок была проведена серия 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 м1-диапазона в разных точках (расстояние между точками измерений ~ 30 м, шаг по частоте – 1.25 МГц) приведены на рис. 13; экстремум спектра сигнала соответствует значению 25 МГц по частоте. Вторая серия состояла в измерениях в забое горной выработки (тоннель №1, ПК 157+67) г. Сочи. Здесь ПК – пикет, его длина строго 100м. Результаты Фурье – преобразования сигнала, снятого в горной выработке тоннеля №1 (ПК 157+67) той же антенной в разных точках забоя (расстояние между точками измерений ~8 м, шаг по частоте – 1.25 МГц), приведены на рис. 14; экстремум спектра сигнала соответствует значению 25.6 МГц по частоте. Размер окна Фурье – преобразования принят постоянным для первой и второй серий.

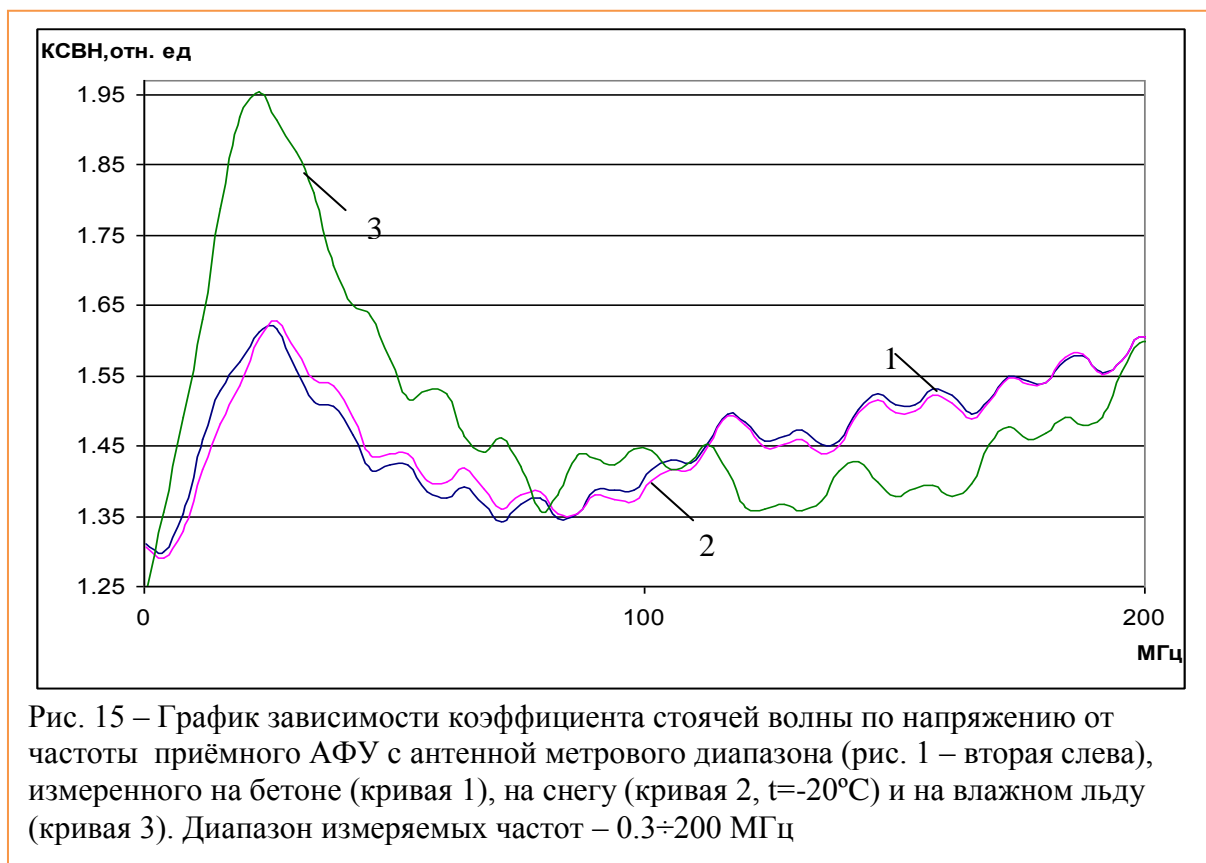
Для оценки эффективности полученных спектров (рис. 13, 14) на лабораторной установке (рис. 2), предназначенной для измерения КСВН собственно антенн и АФУ (включающих антенну, согласующий тройник и приёмный РК – кабель) в диапазоне частот 0.3 ÷ 200 МГц проведены измерения КСВН антенн, расположенных на различных подстилающих поверхностях (сухой бетон, снег, лёд с плёнкой воды). Результаты измерений приведены на рис. 15.

Из результатов измерений следует, что изменение импедансных свойств подстилающей поверхности влияет на характеристики антенны двояко: подобие результатов, представленных кривыми 1, 2 на рис. 15, позволяет судить о близких по величине значениях импедансов.



Это может быть обусловлено тем, что в этих структурах вода отсутствует полностью - в сухом бетоне скелет представляет собой чешуйчатую структуру и влажность не превышает сотых долей процента, в снеге ( $t \leq -20^{\circ}C$ ) вода выморожена полностью, и снег представляет чисто кристаллическую структуру. Кривая 3 на рис. 15 соответствует измерениям, когда в качестве импедансной поверхности выступает лёд, искусственно покрытый тонкой плёнкой воды. Различия между кривыми 1, 2 и 3, соответствующими сухому бетону, снегу и льду с водяной плёнкой, очевидны. Следует отметить, что для льда с водяной плёнкой резко возрастает коэффициент отражения в диапазоне частот 17-28 МГц, что

может рассматриваться как признак низкочастотной дисперсии водной плёнки на поверхности льда.



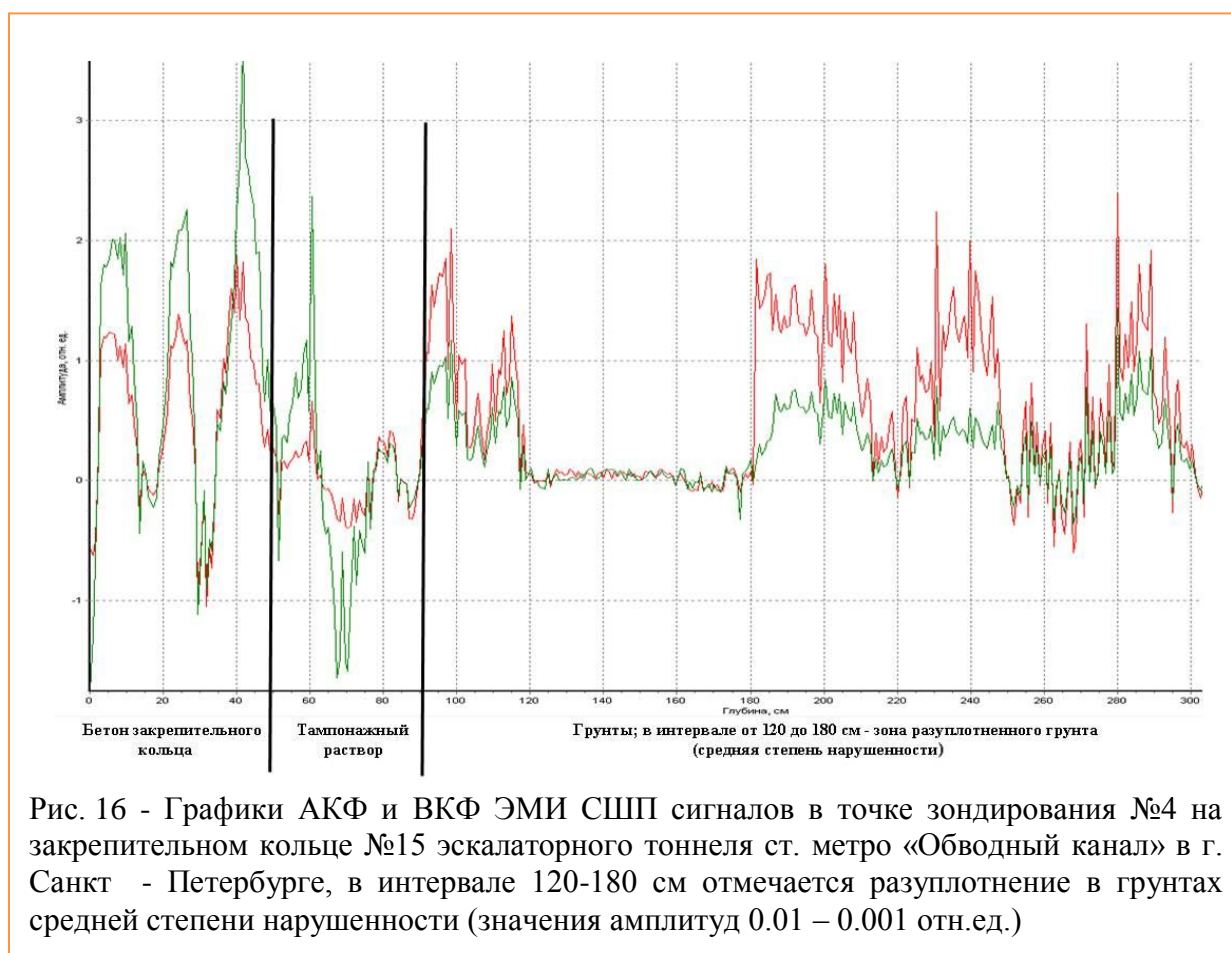
Таким образом, из данных, приведенных на рис. 15 следует, что данная антенна является «чувствительной» в диапазоне частот, соответствующем проявлению низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости воды. При наличии такой «чувствительности» у антенны сопоставление результатов, представленных на рис. 13, 14, позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования обводнённости горной выработки.

### Идентификация наличия трещиноватости среды

Главным интерпретационным критерием для выявления в подстилающей среде трещиноватых структур, расположенных по нормали к условному «лучу» ЭМИ СШП зондирования, являются малые и сверхмалые абсолютные значения амплитуд автокорреляционной (АКФ) и взаимной корреляционной (ВКФ) функций отраженных сигналов м1- и дм-

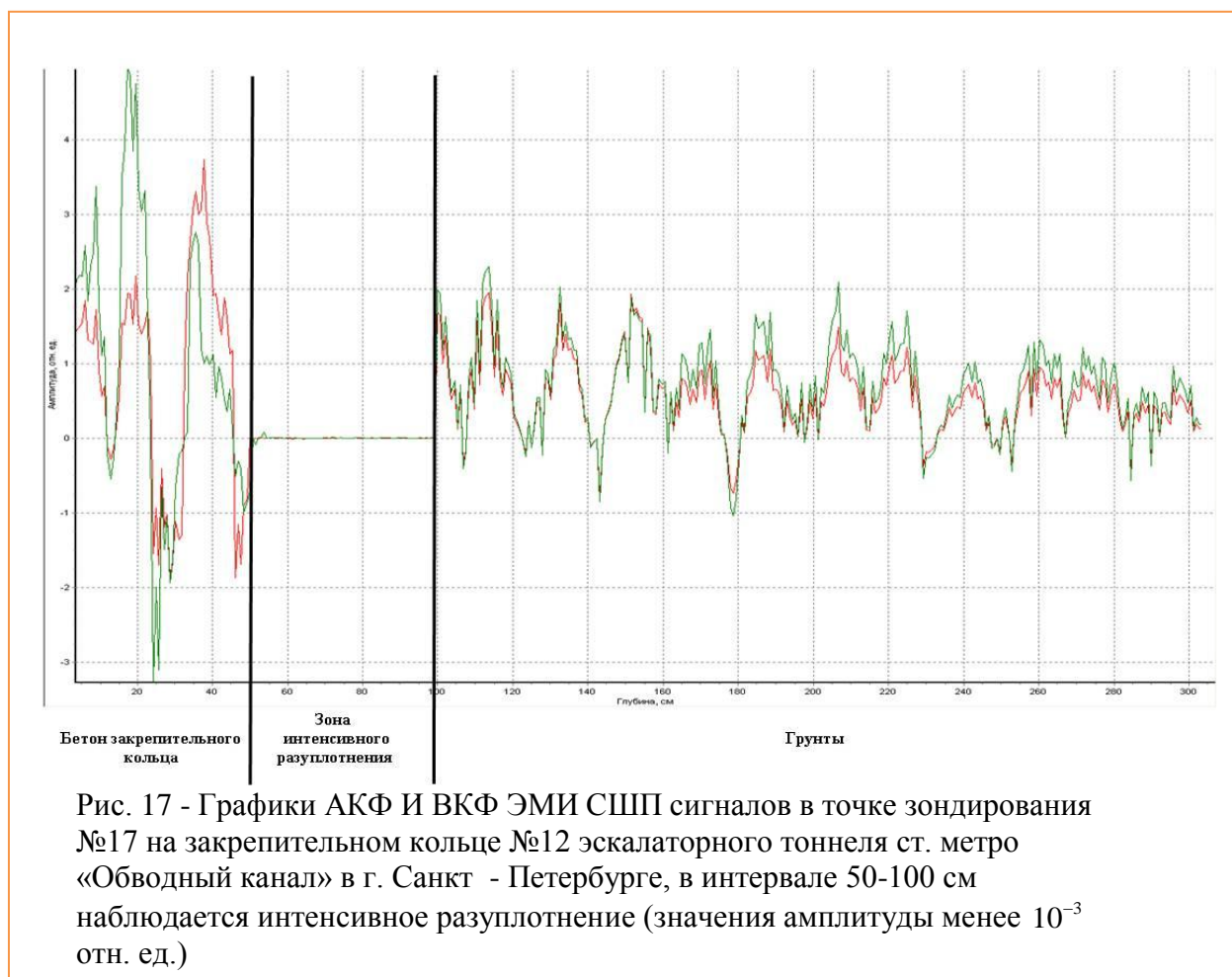


диапазонов, а именно: стремящиеся к нулю показатели амплитуд АКФ и ВКФ свидетельствуют о зоне трещиноватой породы, ориентированной перпендикулярно распространению излучаемого электромагнитного поля. Нарушения в сплошности инженерно-геологических структур дифференцируются по степени приближения показателей амплитуды к нулю как «разуплотнения (или трещиноватость) средней степени» (рис. 16) и «интенсивные разуплотнения (или трещиноватость)» (рис. 17). Представленные на рис. 16, 17 данные получены при контроле инъекционного закрепления заобделочного пространства в ходе строительства эскалаторного тоннеля ст. метро «Обводный канал» в г. Санкт - Петербурге [44].



Для определения в разрезе геологической толщи трещиноватых структур, субсогласных (почти параллельных) с направлением «луча» ЭМИ

СШП зондирования (рис. 18), использовались следующие поисковые признаки: двоение (дуплет) Фурье - спектра сигнала, принятого антенной м1- диапазона, при этом размер окна выбирается как решение одной из трёх вариационных задач [27,29]. Решение задачи по выявлению вертикально залегающих трещин методом ЭМИ СШП зондировании рассмотрим на примере измерений в бассейне суточного регулирования Зарамагской ГЭС в республике Северная Осетия (рис. 18).



На рис. 19 представлен Фурье - спектр сигнала, принятого антенной метрового диапазона (рис. 1 – вторая слева). Размер окна Фурье - преобразования при этом определяется как решение задачи: при каком объеме выборки взаимная энтропия принятых СШП сигналов м1- и дм диапазонов будет максимальной; варьирование ведётся по всему объёму

записанной выборки. Эти задачи известны как задачи К. Шеннона, Р. Хартли, В. А.Н. Колмогорова [45, 46, 47, 48].

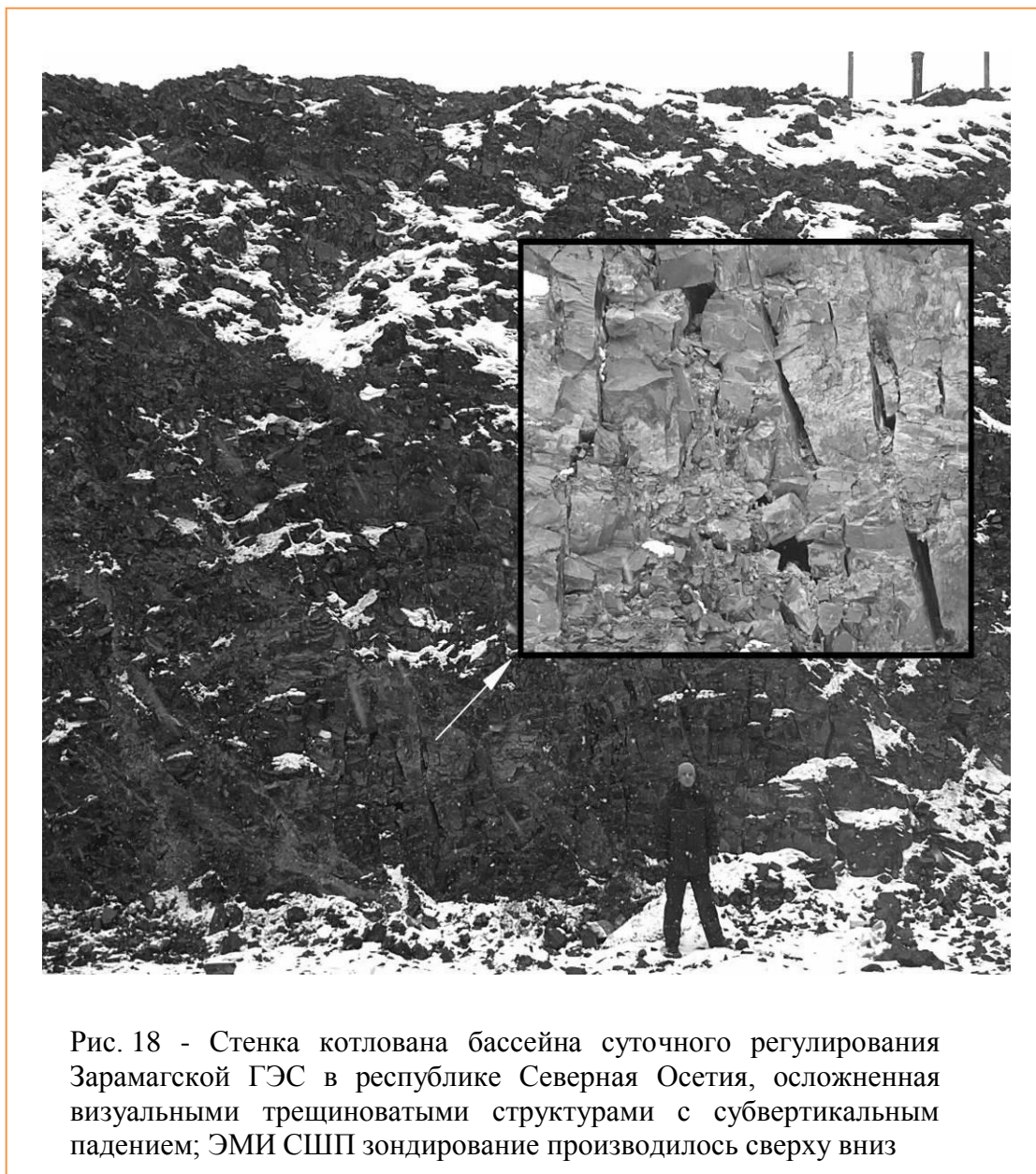


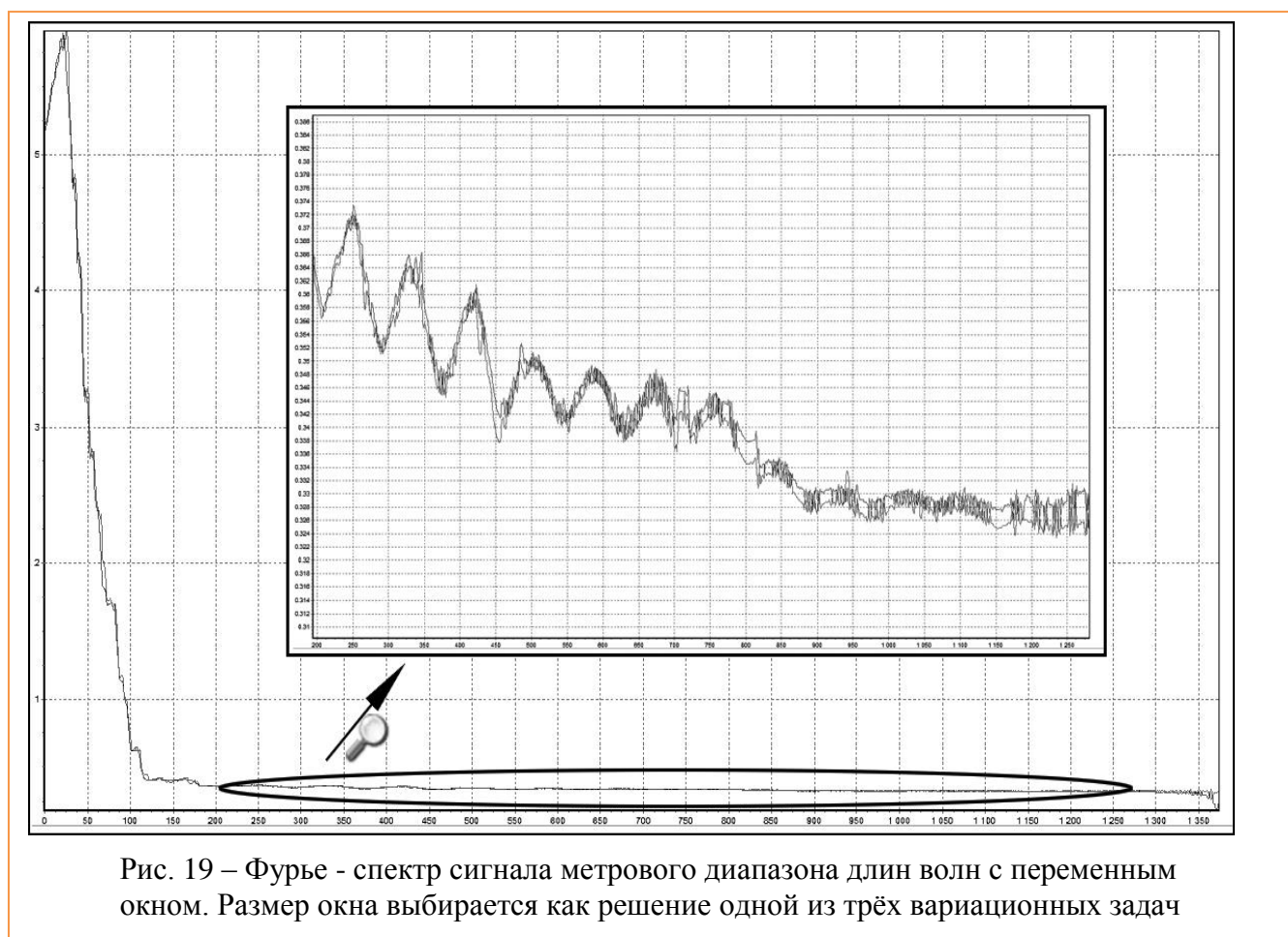
Рис. 18 - Стенка котлована бассейна суточного регулирования Зарамагской ГЭС в республике Северная Осетия, осложненная визуальными трещиноватыми структурами с субвертикальным падением; ЭМИ СШП зондирование производилось сверху вниз

Таким образом, оценка поведения (появление дуплета) Фурье-спектра в отраженном сигнале указывает на позицию структуры крутопадающих трещин в разрезе.

На рис. 20 приведен интерфейс программы обработки данных ЭМИ СШП зондирования, разработанной для реализации приведенных выше



критериев и алгоритмов построения структурной модели природно – технических объектов.

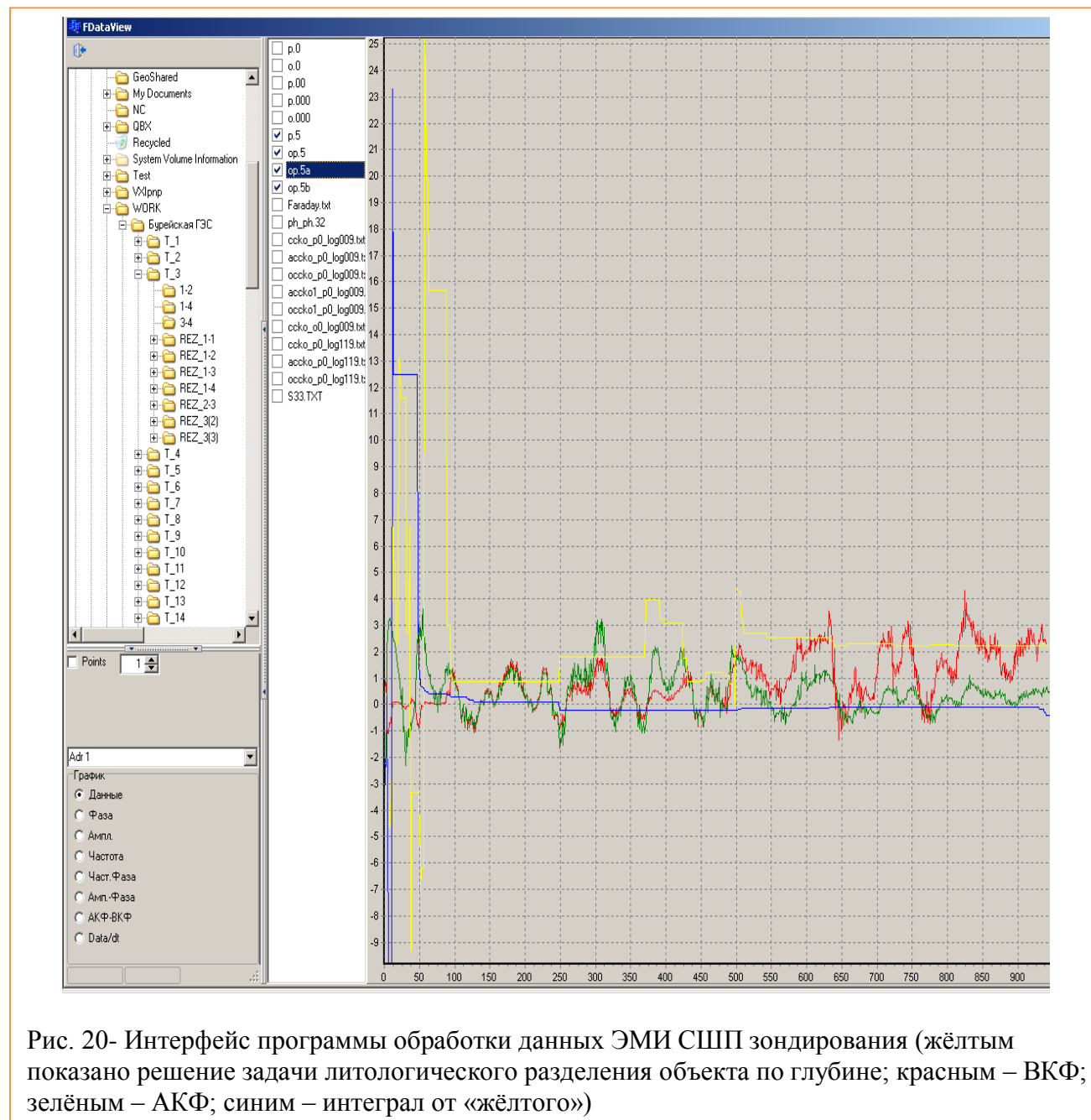


### Сопоставление прогнозных данных ЭМИ СШП зондирования с результатами прямой проходки

В качестве наиболее представительных работ по геофизическому контролю за состоянием горного массива следует отметить наблюдения методом ЭМИ СШП зондирования при строительстве железнодорожного Лагар-Аульского тоннеля на перегоне «Облучье - Известковая» Дальневосточной железной дороги (ДВЖД).

Исследование горных пород на трассах тоннелей методом ЭМИ СШП зондирования представляют собой измерения «в горизонт» на вертикальной поверхности забоев выработок в фиксированных пунктах размещения

измерительных антенн комплекса. При этом «лучи» зондирования



ориентируются вдоль проектной оси тоннеля. На каждом забое выполняются, как правило, 5 геофизических измерений, при этом 3 точки зондирования располагаются в приподошвенной части забоя, а две – в верхней (сводовой) части. Указанная схема измерений позволяет по результатам последующего анализа геофизических данных составить представительные горизонтальные разрезы, отражающие особенности геологического строения массива на горизонте строящейся горной

выработки. Работы проводятся поэтапно. Этапность геофизических исследований определяется предельной эффективной глубиной ЭМИ СШП измерения, колеблющейся в пределах 70 м. То есть, по истечении проходки предыдущих 68-70 м трассы тоннеля, на которые давался прогноз инженерно-геологических условий, выполняется очередной этап геофизического обследования, обеспечивающий прогнозную оценку аналогичных условий горного массива для проходки следующих 70 м. Результаты сопоставления ЭМИ СШП зондирования и фактических данных горных работ при проходке Лагар-Аульского железнодорожного (ж/д.) тоннеля ДВЖД представлены в табл. 3.

Таблица 3

<i>Прогноз геологической ситуации по данным ЭМИ СШП зондирования</i>	<i>Факт (приводится по данным исполнительной документации ООО "Дальтоннельстрой")</i>
<p align="center"><b>ПК 49+29 – ПК 49+99</b></p> <p>А) На всем участке многочисленные мощные зоны сильно трещиноватой породы (тектонические нарушения). Б) Водонасыщенные породы установлены на участке ПК 49+48 – ПК 49+65.</p>	<p>А) Порода сильно трещиноватая, система трещин различная. Б) Влажная порода на участке ПК 49+29 – ПК 49+44, капеж и слабые течи на участке ПК 49+44 – ПК 49+55.</p>
<p align="center"><b>ПК 50+11 – ПК 50+81</b></p> <p>А) Сильно трещиноватые породы на участках ПК 50+19 – ПК 50+33 и ПК 50+60 – ПК 50+72. На остальных участках породы слабо трещиноватые. Б) Влажные породы на участке ПК 50+30 – ПК 50+47.</p>	<p>А) Порода трещиноватая и слабо трещиноватая. Б) Влажная порода на участке ПК 50+35 ÷ ПК 50+42</p>
<p align="center"><b>ПК 50+96 – ПК 51+66</b></p> <p>А) Породы слабо трещиноватые. Единичные маломощные (мощностью до 1 м) зоны сильно трещиноватой породы на участке ПК 51+00 – ПК 51+32. Б) Влажные породы – эпизодические на участке ПК 51+40 ÷ ПК 51+60.</p>	<p>А) Порода трещиноватая и слабо трещиноватая. Б) Порода влажная на участке ПК 51+26 – ПК 51+66.</p>

<p style="text-align: center;"><b>ПК 53+20 – ПК 53+90</b></p> <p>А) На участках ПК 53+20 – ПК 53+40 в 3,5<sup>-х</sup> м ниже свода тоннеля выявлены редкие маломощные зоны сильно трещиноватой породы. Такая же степень трещиноватости породы установлена на участке ПК 53+60 – ПК 53+80 только в правой верхней части тоннеля, что может быть отнесено к полого падающей тектонической трещине.</p> <p>Б) Влажные, водонасыщенные породы не установлены.</p> <p style="text-align: center;"><b>ПК 54+09 – ПК 54+79</b></p> <p>А) Породы слабо трещиноватые. Сильно трещиноватые породы в левой половине тоннеля на участке ПК 54+10 – ПК54+28.</p> <p>Б) Влажные и водонасыщенные породы на участке ПК 54+36 – ПК 54+56.</p> <p style="text-align: center;"><b>ПК 55+11 – ПК 55+81</b></p> <p>А) Мощные зоны – от 5 до 25 м – сильно трещиноватой породы практически на всем обследованном участке.</p> <p>Б) Локальные фрагменты (мощностью от 2 до 4м) влажной породы.</p>	<p>А) Порода монолитная. Отмечаются отдельные пологие трещины.</p> <p>Б) Влажность пород, капез и течи отсутствуют.</p> <p>А) Породы слабо трещиноватые.</p> <p>Б) Влажные породы, капез и слабые течи на участке ПК 54+12 – ПК 54+67.</p> <p>А) Сильно трещиноватые породы. Тектонические зоны мощностью 0.5-1.5м ограничивают блоки сильно трещиноватых пород.</p> <p>Б) Капез и течи на участке ПК 55+50 – ПК 55+ 80, преимущественно – в своде.</p>
--	---

Представленное в табл. 3 сравнение результатов опережающего ЭМИ СШП зондирования и последующей проходки свидетельствует об их высокой сходимости. Это касается многих участков тоннеля, в частности интервалов между пикетами ПК 49+29 – ПК 49+9, ПК 55+11 – ПК 55+81, ПК 53+20 – ПК 53+90; ПК 54+09 – ПК 54+79. На рис.21 приводится графическое отображение сопоставительного анализа одного из указанных выше участков – между ПК 55+11 – ПК 55+81.

Сверка исполнительной документации горнопроходческих работ и итоговых материалов геофизического прогноза инженерно-геологических и гидрогеологических условий впереди забоев по трассе строящегося тоннеля №1 вблизи пос. Магри на перегоне Туапсе-Адлер, выполненного методом ЭМИ СШП зондирования, выявила следующие результаты:

– прогнозные границы между геологическими разностями с различными прочностными характеристиками были достоверно выделены в разрезах горного массива, что подтверждено геологическим описанием результатов проходки;

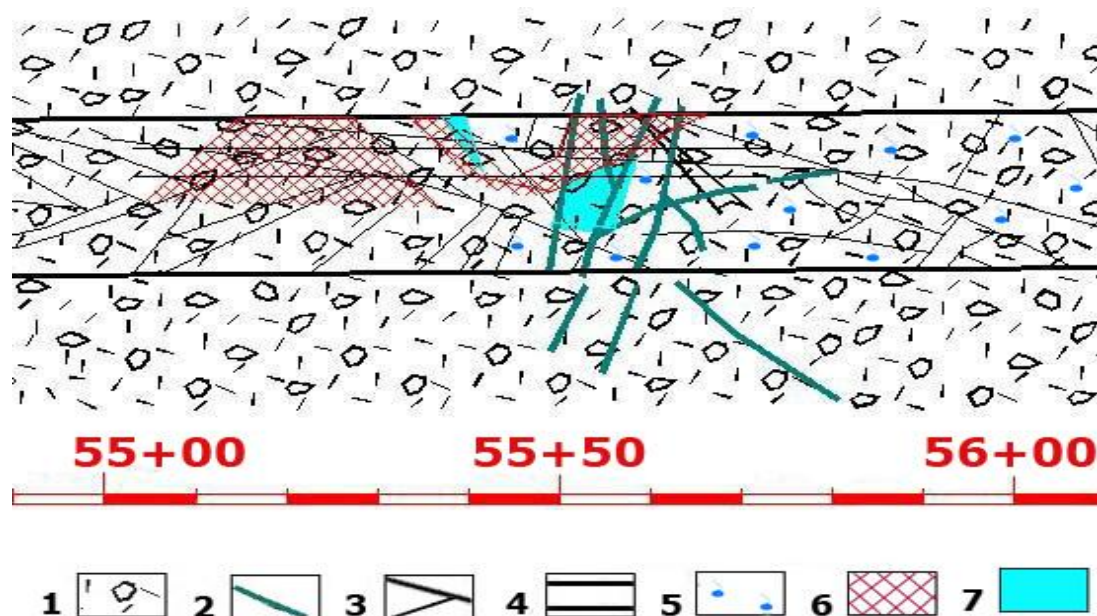


Рис. 21 - Фрагмент графического сопоставления прогнозных данных ЭМИ СШП обследования и результатов фактической проходки между ПК 55+11 – ПК 55+81 в разрезе Лагар-Аульского ж/дорожного тоннеля. 1 - литотуфы и туфобрекчии риолитовых порфиров; 2 - маломощные жильные породы основного состава; 3 - тектонические нарушения; 4 – тоннель; 5 - порода влажная или напитанная водой; 6 - тектонические нарушения по данным ЭМИ СШП зондирования; 7 - трещиноватые влажные породы по данным ЭМИ СШП зондирования

– зоны нарушенных пород, выделенные по данным ЭМИ СШП зондирования, подтвердились последующей проходкой;

– прогнозные интервалы влажных пород в разрезе массива были указаны достоверно и в целом согласуются с гидрогеологической характеристикой пород при проходке тоннеля. Определенные расхождение данных прогноза



и проходки обусловлены различными метеоусловиями на момент времени проведения геофизических измерений и последующих горнопроходческих работ (задержка проходки относительно проведенных измерений ~ 3 суток и более).

Представленное в табл. 3 сравнение данных фактической проходки тоннеля №1 и опережающего геофизического обследования на участке трассы между ПК 50+38.2 - ПК 52+60 и между ПК 54+56.0 - ПК 55+68 позволяют говорить об эффективности использования ЭМИ СШП зондирования в качестве метода, сопровождающего строительство горных выработок, при решении вопросов, связанных с прогнозной оценкой инженерно-геологических и гидрогеологических условий на трассах строящихся тоннелей, что способствует безопасному ведению горнопроходческих работ.

### **Заключение**

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), при строительстве комплекса Сочинских авто- и ж/д. тоннелей, где при прогнозе проходки использовались данные непрерывного мониторинга ЭМИ СШП зондирования, погиб один человек. Т.о., 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 лед, 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. Вид распространяющегося импульса (рис. 13) 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.

4. 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.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грехов И. В., Месяц Г. А. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов // УФН, июль 2005, т. 175, № 4. с. 735 – 744.
2. Панченко Б.А., Нефёдов Е. И. Микрополосковые антенны.– М.: Радио и связь, 1986. -145 с.
3. Lectures on Cauchy's problem, N. Y., 1923; Cours d'analyse, t. 1-2, P., 1927-30; Selecta. Jubilé scientifique, P., 1935.

4. Еникеев Б. Н. Моделирование в петрофизике (решения, проблемы, перспективы) – 4// Геологические, геофизические исследования и аппаратура. № 1, 2010.
5. Березин П. Н., Кипнис В. М. О механизме формирования естественных электрических полей и их влияния на почвенные процессы. – Вестник МГУ, сер. Почвоведение, 1978, № 2, с. 15 – 19.
6. Гедройц К. К. Почвенный поглощающий комплекс, растение и удобрение. – М. -Л. : Сельхозгиз, 1935. – 343 с.
7. Кипнис В. М., Максютя В. Н., Азовцев Т. В. Электрокинетический потенциал некоторых почв Нижнего Поволжья. – Почвоведение, 1977, № 11, с. 62 -68.
8. Ковда В. А. Основы учения о почвах. – М.: Изд-во Наука, 1973. - 447 с.
9. Зимовец Б. А., Хитров Н. Б. /Б.А. Зимовец, А.Г. Бондарев, И.П. Айдаров, В.Я. Григорьев, И.И. Судницын, Н.П. Чижикова, Н.Б. Хитров, А.И. Корольков, Т.И. Королькова. Экологические требования к орошению почв России (Под общ. ред. Б.А. Зимовца и Н.Б. Хитрова) // М., Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1996. -72 с.
10. Гедройц К. К. Избранные научные труды. – М. : Наука, 1975, с. 260–354.
11. Михайличенко В. Н. Галогенез и осолонцевание почв равнин Северного Казахстана. - Алма – Ата: Изд – во Наука Каз. ССР, 1979. – 170 с.
12. Воронин А. Д. Поверхностные явления в почвах и направленное изменение свойств почв. - Научные доклады Высшей школы, биологические науки, 1975, № 12, с. 7 -15.
13. Витязев В. Г., Кауричев И. С., Рабий А. Влияние состава поглощённых катионов на удельную поверхность почв. – Почвоведение, 1980, № 9, с. 31-41.

14. Ткаченко Ю. Г. Исследование электрических свойств некоторых типов почв Европейской части СССР в диапазоне прочносвязанной влаги . : Автореф. дисс. .. канд. биол.наук. – М., Изд-во МГУ, 1972, -27 с.
15. Лебедев Т. С., Шепель С. И. Электрические свойства пород повышенной проводимости в глубинных термобарических условиях. – Геофизический журнал, 1980, т.2, № 6, с. 54 -68.
16. Раисов О. Ж. Зависимость удельного сопротивления лугового – серозёмного солончака от температуры. – Вестник МГУ. Сер. Биология и почвоведение, № 3, 1973, с. 118 – 121.
17. Перфильева В. Д. Природа релаксационных максимумов поглощения почвой электромагнитной энергии /Тезисы докладов VI съезда Всесоюзного общества почвоведов, кн. 1- Тбилиси, 1981, с.32.
18. Финкельштейн М.И. Радиолокация слоистых земных покровов/ М. И. Финкельштейн, В.Л. Мендельсон, В. Л. Кутев - М.: Сов. радио. 1977. - 216 с.
19. Владов М. Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. - М., Изд - во МГУ , 2004. -153 с.
20. Сараев Д.В. Диэлектрическая спектроскопия в исследовании структурной организации нефтяных дисперсных систем /Д. В. Сараев, И. В. Лунёв, Т. Н. Юсупова, М. И. Тагирзянова, Мю Р. Якубов, Ю. А. Гусев, Г. В. Романов // Нефтегазовое дело, 2005, <http://www/ogbus.ru>, - 5с.
- 21.Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение (геокриология) / В. А.Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Н. Н. Романовский, К. А. Кондратьева, В. Г. Меламед// М., Изд - во МГУ, 1978, 464 с.
22. Фролов А. Д. Электрические и упругие свойства мёрзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. -607 с.

23. Цыдыпов Ч.Ц., Цыденов В.Д., Башкуев Ю. Б. Исследование электрических свойств подстилающей среды. – Новосибирск, «Наука», 1979. -170 с.
24. Справочник по элементам волноводной техники /А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В. И. Смирнов. – М.: Сов. радио, 1967. – 552 с.
25. Безродный К.П., Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Андрианов С.В. Мониторинг подземного пространства вперед забоя методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования на примере строящихся тоннелей в г. Сочи// Жилищное строительство. 2010, №12. – С.40-44.
26. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Мощный полупроводниковый генератор наносекундных импульсов / Приборы и техника эксперимента. -1986. - №1. -С.93-94.
27. 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.
28. 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.
29. Болтинцев В.Б., Лютынский И.Ю., Чапчай А.А. Применение вариационных задач для компенсации динамической погрешности информационно - измерительного комплекса // Проблемы машиностроения и автоматизации. -1990, № 6(36) - С.36-40.
30. Delaney A.J., Arcone S.A. Laboratory measurements of soil electric properties between 0.1 and 5 GHz/ USA CRREL. Rep. 82-10. 1982. 8 p.

31. Loon W.K.P. van. Heat and mass transfer in frozen porous media. Ph. D. Thesis, AUW. Netherlands. 1991. 200 p.
32. 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.
33. Фролов А. Д. Электрические свойства мёрзлых песчано – глинистых пород в переменных электромагнитных полях. – «Изв. Вузов. Геология и разведка», 1975, № 1, с. 119-122.
34. Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. – М.: Госэнергоиздат. 1959, 336 с.
35. Дебай П. Избранные труды. Л.: Наука . 1987 с. 264 – 316.
36. Челидзе Е.Л., Дервяненко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. –Киев: Наукова думка, 1977. 231 с.
37. Frohlich H. Theory of dielectrics. Oxford Univ. Press. 1986. p. 192.
38. Nippel A.R. Dielectrics and waves. N.Y. – London. 1954. 437 p.
39. Заборовский А. И., Семёнова С.Г., Фролов А. Д. К природе частотной дисперсии электрических свойств влажных осадочных пород // Вестн. МГУ. Сер. Геол. 1968. №4, с. 29-38.
40. Федюкин И.В. Зависимость диэлектрических параметров влагосодержащего песка от гранулометрического состава // Изв. Вузов. Геология и разведка. 1977. № 8, с. 124-127.
41. Адахов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. –М.: Изд-во стандартов. 1972. 412 с.
42. Тонконогов М.П., Векслер В.А., Биржанов К.Ж. Диэлектрическая релаксация в водных растворах и суспензиях // Изд. вузов. Физика. 1975. №2, с. 81-84.

43. Семихина Л. П. Возможности диэлектрического метода для анализа состояния водных систем после физических воздействий. Вестник ТюмГУ. № 2. 2000. С. 39–43.
44. Безродный К.П., Болтинцев В.Б., Ильяхин В. Н. Геофизическое обследование инъекционного закрепления заобделочного пространства методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования / К. П. Безродный, В. Б. Болтинцев, В. Н. Ильяхин, В. А. Шумков, С. В. Андрианов // Жилищное строительство. 2010, №5 – С.39-44.
45. Шеннон К. Математическая теория связи / В кн.: Работы по теории информации и кибернетике. -М.: Изд-во иностр. лит., 1963. -С. 243-332.
46. Джейнс Э.Т. О логическом обосновании метода максимальной энтропии. // ТИИЭР. -1982. Т.70, № 9, с. 33-51.
47. Стратонович Р. Л. Теория информации. - М.: Сов. радио, 1975. 424 с.
48. Колмогоров А. Н. «Доклады АН СССР», 1958, т. 119, № 5, с. 861 -864.