

УДК 624:621.396.96

О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНО – ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ В ТОННЕЛЯХ

В. Б. Болтинцев¹, В. Н. Ильяхин¹, А. А. Черемисин¹, К. П. Безродный²

¹ ООО НПФ «ГЕОДИЗОНД», 196211, Санкт-Петербург, просп. Гагарина, д. 14, корп. 6,

² ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», 191002, Санкт-Петербург,
ул. Большая Московская, д. 2

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2019 г.

Аннотация. В данной работе обсуждается возможность применения метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования для оценки инженерно-геологических условий впереди забоя за щитом тоннелепроходческого механизированного комплекса (ТПМК). Предлагается применять метод ЭМИ СШП зондирования, используя ротор щита в качестве линзы для передающей микрополосковой антенны и генератора, изготовленного по технологии дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ), при излучении импульсного электромагнитного поля. Большая глубина распространения ЭМИ СШП сигнала за металлопластинчатой линзой основана на проявлении низкочастотной дисперсии относительной диэлектрической проницаемости среды, наличие которой обусловлено вызванной поляризацией с дипольно-релаксационным механизмом, под воздействием сильного ЭМИ СШП поля ($E \sim 100$ В/см, $H \sim 1.56$ А/см). Приведены результаты измерения поля на просвет через «пакет»: ротор щита + 28.8 м породы + 1.2 м бетона. Потери при использовании ротора щита в качестве металлопластинчатой линзы составляют 74 дБ. Перечислены 8 тоннелей и веток метро в РФ, где ЭМИ СШП зондирование выполнено впереди забоя ТПМК.

Ключевые слова: сверхширокополосный; дрейфовые диоды с резким восстановлением; уравнение (метод) Винера-Хопфа; георадиолокация; тоннелепроходческий механизированный комплекс.

Abstract. To assess the engineering and geological conditions ahead of the face (behind the tunnel boring mechanized complex shield), it is proposed to use the method of electromagnetic pulsed ultra-wideband (EMI UWB) sounding using the shield rotor as a metal plate lens for a transmitting microstrip antenna and a generator made by the technology of sharp recovery drift diodes (DSRD) when emitting a pulsed electromagnetic field. The large depth of propagation of the UWB EMP signal behind the metal plate lens is based on the manifestation of a low-frequency dispersion of the dielectric constant of the medium, the presence of which is caused by polarization with a dipole-relaxation mechanism, under the influence of a strong electromagnetic pulse field ($E \sim 100 \text{ V / cm}$, $H \sim 1.56 \text{ A / cm}$). The results of measuring the field to the clearance through the "package" are given: shield rotor + 28.8 m of rock + 1.2 m of concrete. Losses when using the shield rotor as a metal plate lens are 74 dB. 8 tunnels and metro lines in the Russian Federation are listed, where EMI UWB sounding is performed ahead of tunnel boring mechanized complex face.

Key words: Ultra Wide band - UWB; Drift Step Recovery Diodes; Wiener – Hopf equation (method); underground radar measurements; a tunnel boring mechanized complex.

В настоящее время основным способом проходки при строительстве метро - и ж/д тоннелей является использование ТПМК, в котором ротор щита своей режущей частью прижимается к забою.

На рис.1 представлена режущая поверхность ротора щита ТПМК Lovat на выходе проходческого комплекса в приемную камеру при строительстве тоннеля метрополитена. На аналогичном роторе щита осуществляются ЭМИ СШП измерения (зондирование) вперед забоев в процессе строительства подземных горных выработок.

Метод ЭМИ СШП зондирования [1] использует принцип работы импульсного радиолокатора-дальномера для сбора измерительной информации

и методику идентификации подповерхностных структур как набора динамических систем с переменными в пространстве параметрами.

Возможность разделения инженерно-геологических разностей основывается на использовании обнаруженных особенностей отклика ряда природно-технических сред и материалов на ЭМИ СШП возбуждение - это наличие характеристических частот в отклике и их связь с пространственной слоистой структурой исследуемых объектов, а двухканальный способ приема отраженных сигналов позволяет, опираясь на решение уравнения Винера-Хопфа [2], выявлять моменты появления новых частотных составляющих в сигнале и тем самым детализировать слоистую структуру объекта. При обработке данных ЭМИ СШП зондирования используется принцип максимальной энтропии, который является достаточно эффективным для решения уравнения Винера-Хопфа.

При генерации излучаемых импульсов данный метод использует достижения в области сильноточного формирования наносекундных импульсов напряжения. Серия таких генераторов разработана в России на основе полупроводниковых размыкающих ключей, изготовленных по технологии дрейфовых диодов с резким восстановлением [3].

Для полевых измерений используется малогабаритный наносекундный сильноточный генератор импульсов, имеющий пиковую амплитуду от 5 до 10 кВ при длительности фронта ~ 1 нс и длительности импульса ~ 5 нс (параметры измерены осциллографами Agilent DSO81304B серийный № MY46000708; Tektronix DPO4104, серийный № B010234; аттенюатором Barth Electronix 142-NMFP-26B, серийный № 314). Общий вид комплекса ЭМИ СШП зондирования представлен на рис. 2.

Измерительный комплекс укомплектован метрологически аттестованными в полосе частот $0.2 \div 1200$ МГц передающей и приемными метрового (м-) и дециметрового (дм-) диапазонов длин волн широкополосными антеннами [4], имеющими согласование с подстилающей средой по коэффициенту стоячей волны по напряжению (КСВН) ≤ 1.85 в диапазоне частот

0.1÷700 МГц. Максимально возможный коэффициент прохождения волны достигается за счет реализации «ямы Брюстера» для излучаемой волны ($68^{\circ} \div 74^{\circ}$) [4]. Приемно-регистрирующий блок (осциллограф R&S RTH1004 с параметрами: амплитуда принимаемого сигнала от ± 150 В до ± 20 мВ; 10-ти разрядное АЦП; накопление во временной точке 8000 измерений; разрешающая способность во времени – 10000 отсчетов на канал; полоса частот по уровню -3 дБ – 500 МГц, по уровню -6 дБ – 800 МГц; время нарастания переходной характеристики < 700 пс; 5 млрд.отсчет/с) обеспечивает качественную запись принимаемых сигналов в полевых условиях на флеш-карту.



Рис. 1. Вид на режущую часть ротора щита ТПМК Lovat.

Такие параметры приёмно-передающей аппаратуры позволяют обследовать различные природно-технические объекты до глубины 100 метров

и более, при этом устанавливаются не только их геометрические размеры, но и производится идентификация элементов разреза. Точность определения границ природно-технических объектов составляет менее 1.5% от истинной глубины их залегания. Такая точность определяется значениями диэлектрической проницаемости первого слагающего слоя подстилающей среды, которая может быть определена в лабораторных условиях по взятому грунту с помощью векторного анализатора цепей ZVA24 фирмы Rohde&Schwarz и пробника spег ДАК-12 [5].

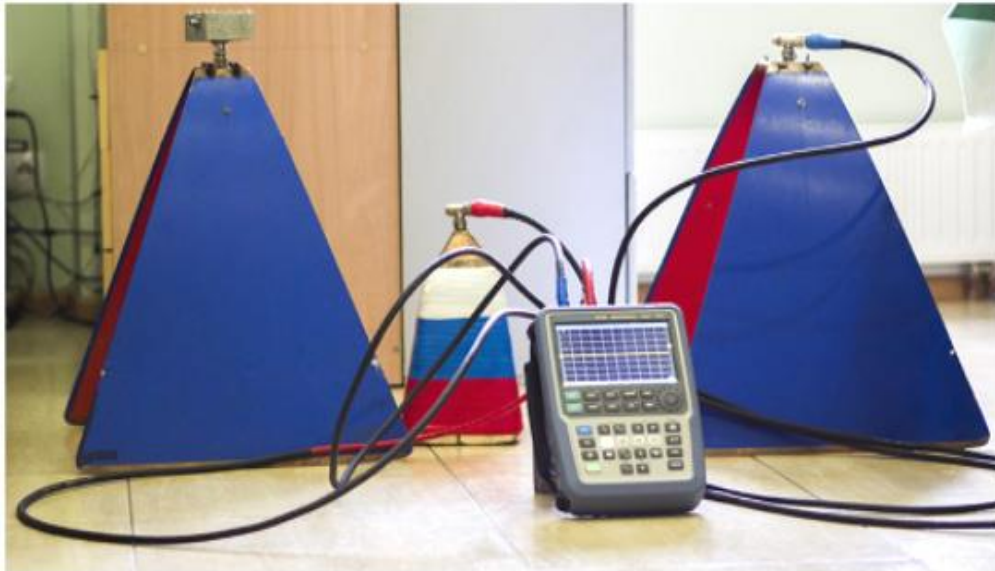


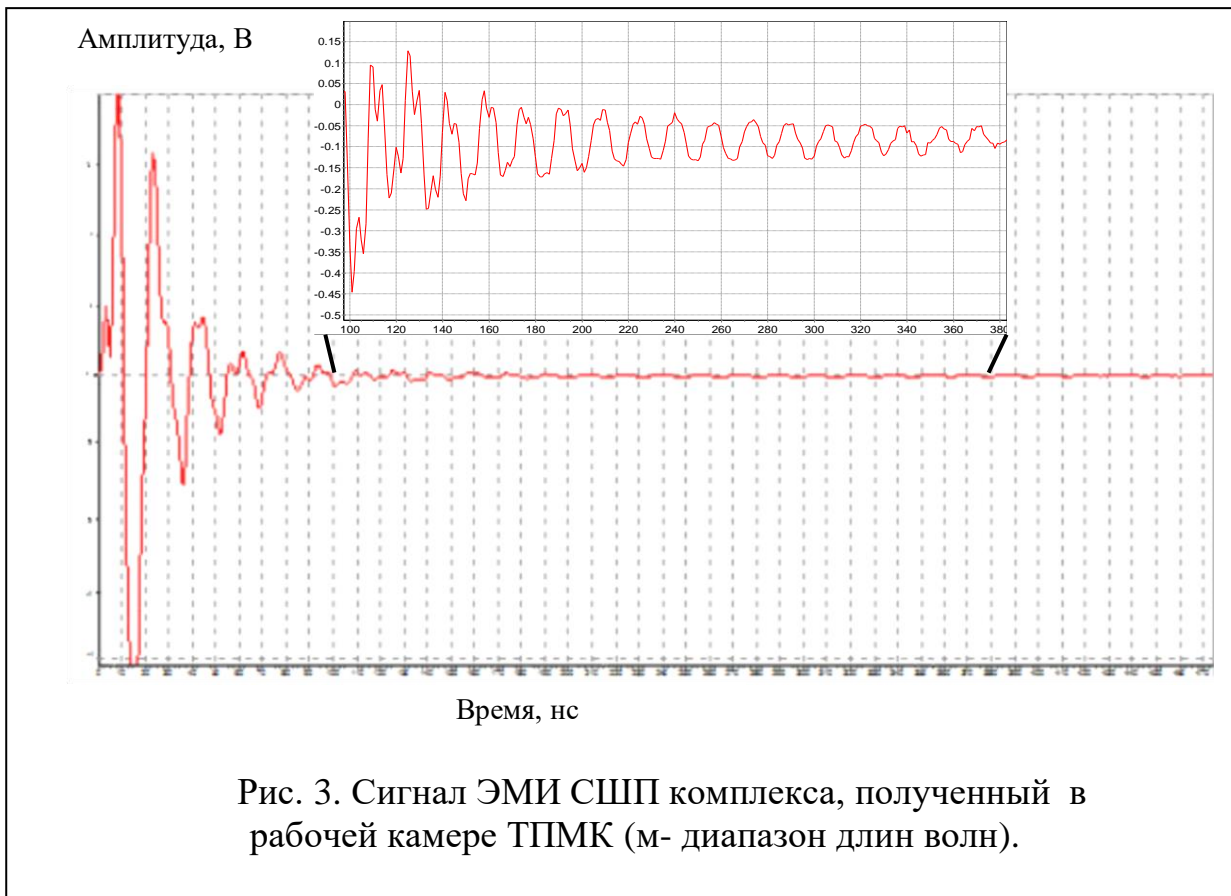
Рис. 2. Общий вид комплекса ЭМИ СШП зондирования: передающая микрополосковая антенна с ДДРВ - генератором (слева), далее - приёмные антенны дециметрового (дм-) и метрового (м-) диапазонов длин волн, приёмник – цифровой осциллограф R&S RTH1004.

Физике взаимодействия электромагнитного поля (ЭМП) и металла посвящен целый ряд работ, авторами которых являются: Шубников Л.В., де Гаас В., Гантмахер В. Ф., Канер Э.А., Скобов В.Г., Веденов А.А., Чернов А. С., Фисуненко А. Л., Демиховский В. Я., Протогенов А. П., Бурдов В. А. и др. В работе [6] приведено 7 типов электромагнитных волн, возникающих при

взаимодействии ЭМП и металла, в учебном пособии «Классическая электродинамика» [7] это подтверждено, там же указано, что «...число колебательных мод в среде в магнитном поле огромно, и не все они в достаточной степени изучены». В [8] сказано, что «...металл в магнитном поле может оказаться прозрачным для электромагнитного излучения, а в ряде случаев вообще ведёт себя как диэлектрик».

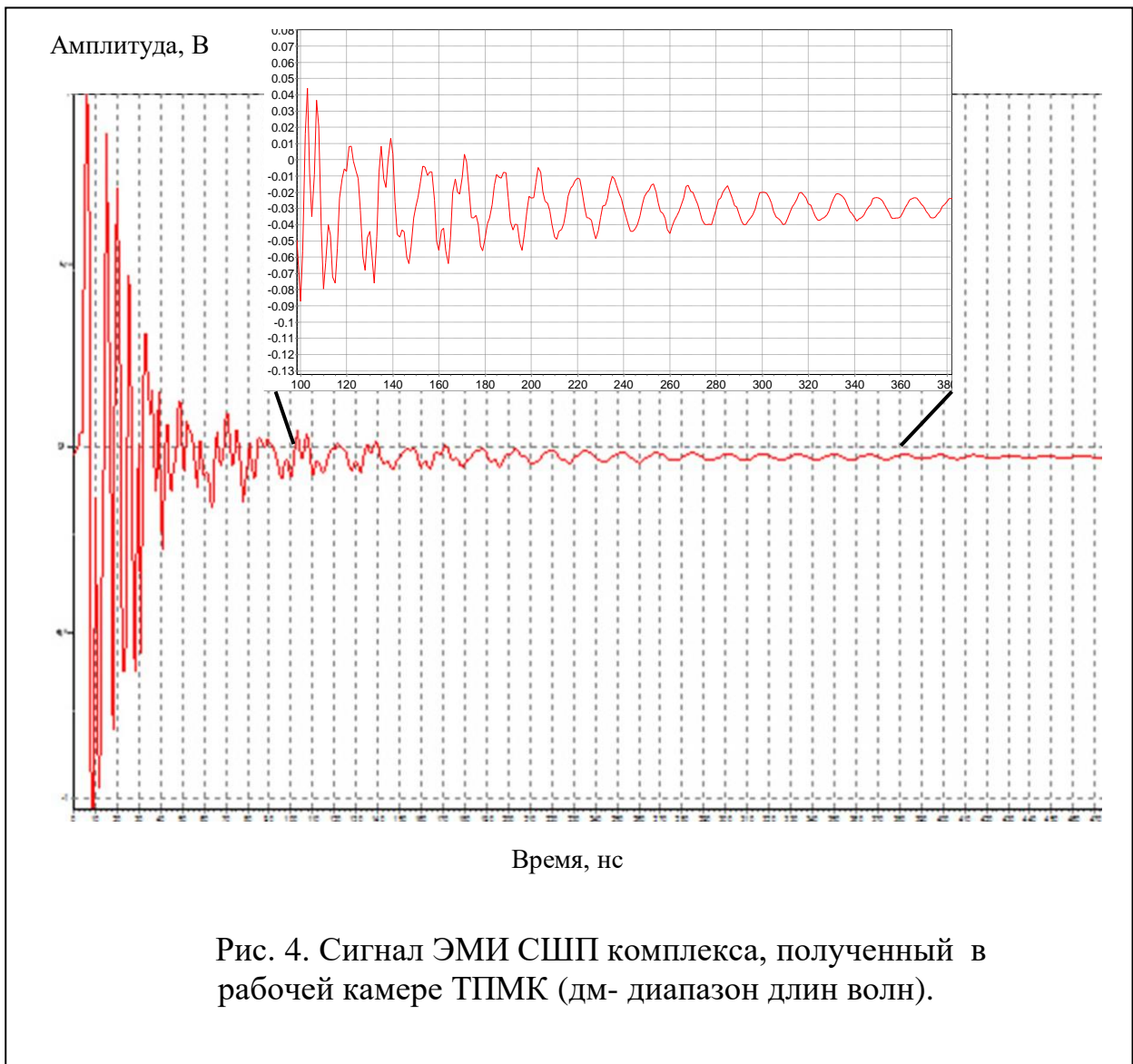
Конструктивные особенности ротора щита ТПМК, на поверхности которого выполняются ЭМИ СШП измерения (рис.1), сходны с формой проводящего листа со сквозными отверстиями. В этом случае задача сводится к задаче дифракции m -й волны Бриллюэна на крае резонатора [9], или «излучение открытого резонатора (§ 12.7)».

На рис.3 представлен сигнал ЭМИ СШП комплекса, полученный в рабочей камере ТПМК (м- диапазон длин волн), на рис.4 – дм - диапазон длин волн.



Сдвигение ТПМК «назад» до образования щели между поверхностью режущей части ротора и поверхностью забоя позволяет провести ЭМИ СШП

измерения через пакет «28.8 м породы + 1.2 м бетона», исключив ротор щита из измерений, и оценить потери сигнала в роторе щита ТПМК. Они составляют 74 дБ.



Мониторинг подземного пространства на участках тоннелей имеет ряд характерных особенностей:

- различные способы проходки тоннелей и штолен и, как следствие, разная оперативность в предоставлении прогноза развития ситуации вперёд забоя;

- существенные различия в геологических и природных факторах, влияющих на качество прогнозной геофизической информации: разная степень

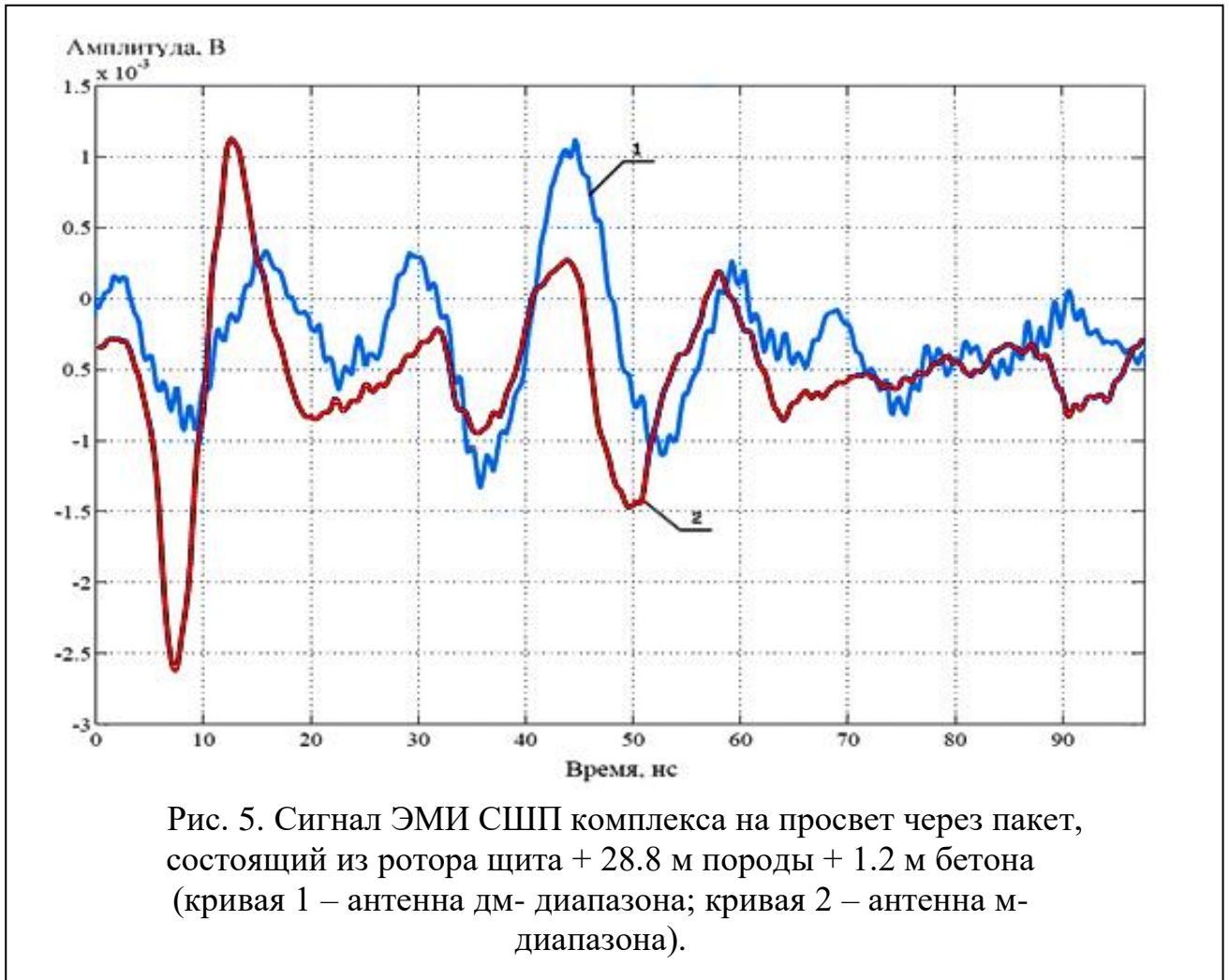
нарушенности горной породы впереди забоя; резкие изменения в характере атмосферных осадков и, как следствие, часто меняющийся водоприток в горных выработках; многообразие литологических разностей даже в пределах одной выработки;

- на целом ряде объектов отмечается несоизмеримость площади забоя выработки с площадью, доступной для проведения измерений - характерно для проходки щитом.

Для обеспечения горнопроходческих подразделений прогнозной информацией о тектонических и гидрогеологических условиях впереди забоев строящихся горных выработок в г. Сочи, на площадках тоннельных комплексов №№1, 3, 5 и в железнодорожных тоннелях №№2, 4, 6 были организованы постоянные ЭМИ СШП наблюдения. Ниже, на примере одного из этапов обследования, выполненного на трассе штольни №1 одноименного тоннельного комплекса на участке от ПК 163+36.0 до ПК 163+64, приведены результаты ЭМИ СШП измерений в том виде, в каком они оперативно, в течение 8-12 часов после проведения полевых измерений, направлялись на участок проходки. При приближении ТПМК к конечной отметке интервала, на который уже имелся прогноз геологических условий, выполнялся следующий этап ЭМИ СШП измерений, обеспечивающий, как правило, “перекрытие” с предыдущим интервалом от 2 до 7 м. Таким образом, на участках строительства тоннелей совмещенной дороги Адлер – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» были выполнены 583 этапа геотехнического мониторинга.

На рис.5 представлен сигнал ЭМИ СШП комплекса, полученный на просвет через «пакет», состоящий из ротора щита + 28.8 м породы + 1.2 м бетона.

Для сравнения согласования антенн на рис. 6 показан процесс измерения КСВН микрополосковой антенны м- диапазона длин волн в рабочей камере ТПМК, на рис. 7 - результаты измерений КСВН антенны, стоящей на песке (кривая 1), и упирающейся в поверхность ротора щита ТПМК (кривая 2). КСВН антенны, измеренный на роторе, не хуже КСВН антенны, стоящей на песке.



Как следует из графических материалов, составленных по обследованному участку трассы (рис. 8), были выделены интервалы горного массива, на которых прогнозировались средне трещиноватые породы, ожидалось прослои обводненных геологических разностей и карстовые полости между ПК 163+40.5 – ПК 163+41.5 и между ПК 163+56.7 – ПК 163+58.0



Рис. 6. Процесс измерения КСВН микрополосковой антенны м-диапазона длин волн.

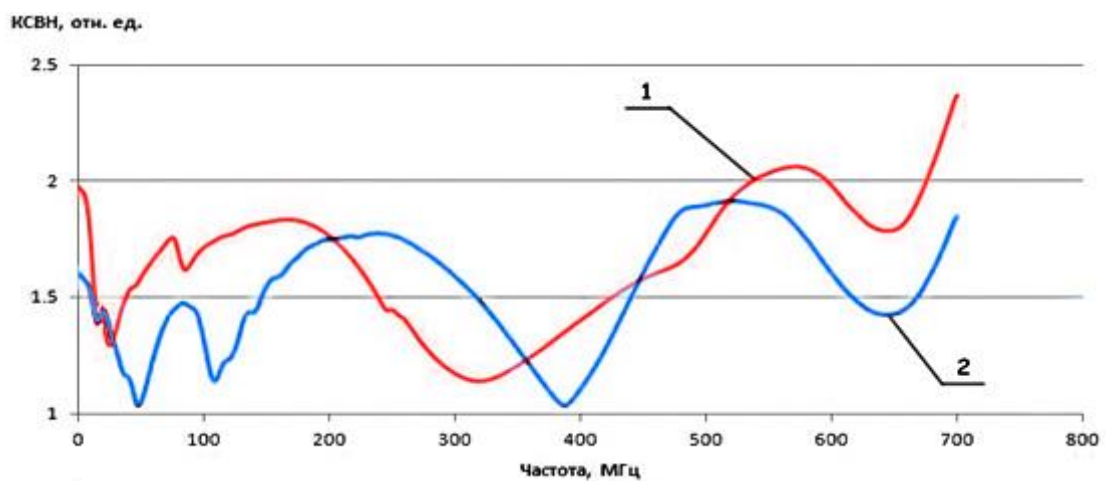
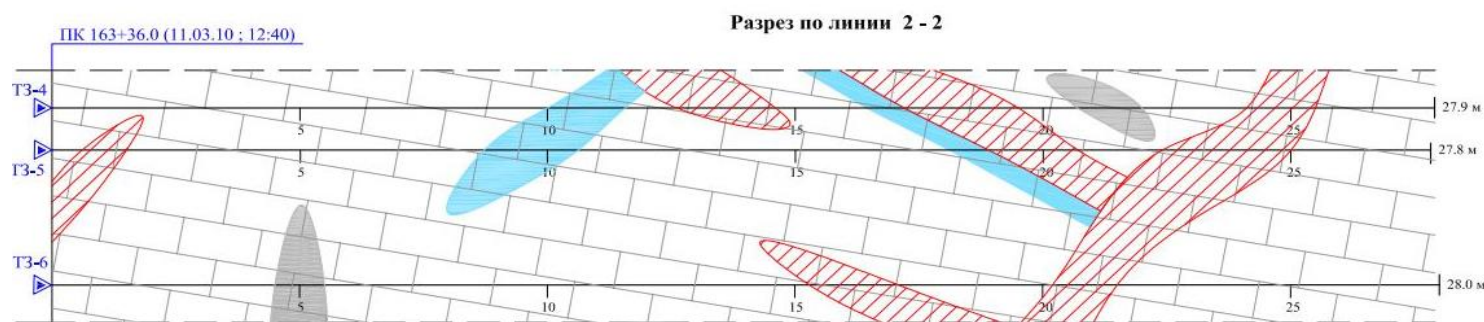
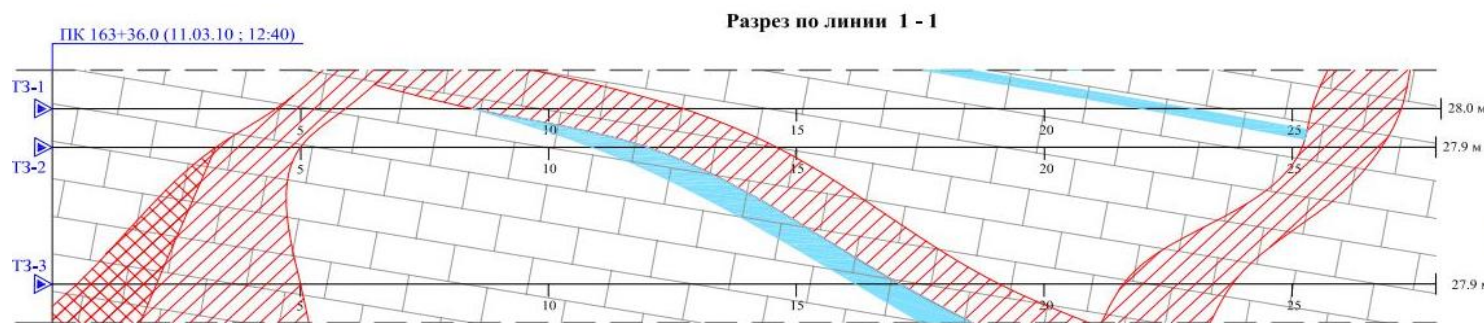


Рис.7. КСВН микрополосковой антенны м-диапазона длин волн: кривая 1 – измерения на песке; кривая 2- на поверхности ротора щита.

**Прогнозное положение участков нарушенных и водонасыщенных пород на трассе штольни
железнодорожного тоннеля №1 на совмещенной (автомобильной и железной) дороге
Адлер - горноклиматический курорт "Альпика-Сервис"
со стороны южного портала по данным ЭМИ СШП зондирования. Этап 46**

Масштаб 1:100



**Схема расположения точек
ЭМИ СШП зондирования
на забое штольни
железнодорожного тоннеля №1
ПК 163+36.0**

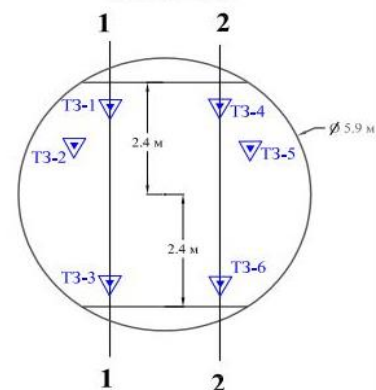


Рис. 8. Прогнозные результаты ЭМИ СШП измерений в штольне №1 на участке от ПК 163+36.0 до ПК 163+64.

Подобные измерения в тоннелях на предмет оценки инженерно-геологических условий впереди забоя выполнялись с 1998 года на многочисленных объектах РФ, среди которых можно выделить: автодорожный тоннель в районе поселка Мацеста (г. Сочи), автодорожный тоннель на 46-47 км автодороги Адлер – Красная Поляна, Северомуйский железнодорожный тоннель, тоннель №1 между станциями метро «Лесная» и «Площадь Мужества», тоннели на совмещенной (автомобильной и железной) дороге Адлер – горноклиматический курорт «Альпика - Сервис», тоннель между станциями «Ходынское поле» и «Петровский парк» третьего пересадочного контура Московского метрополитена, двухпутный тоннель Фрунзенского радиуса Санкт-Петербургского метрополитена за станцию «Международная» до станции «Южная», двухпутный тоннель Невско-Василеостровской линии метрополитена от станции «Приморская» до станции «Улица Савушкина» (ТПМК Herrenknecht AG диаметром 10.3 м) [10].

Материалы данной работы были представлены на XIII Всероссийской научно – технической конференции “Радиолокация и радиосвязь” [11].

Литература

1. Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Безродный К.П. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды. // Журнал радиоэлектроники. 2012. №1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan12/14/text.pdf>
2. Болтинцев В. Б. Обработка сигналов м-, дм- диапазонов длин волн при электромагнитном импульсном сверхширокополосном зондировании подстилающей среды // Журнал радиоэлектроники. 2013. №3. URL <http://jre.cplire.ru/jre/mar13/1/text.pdf>

3. Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф. и др. Мощный полупроводниковый генератор наносекундных импульсов // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – № 1. – С. 93-94.
4. 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>
5. Болтинцев В.Б. Влияние частотной дисперсии диэлектрической проницаемости подстилающей среды на проектирование проволочной антенны, предназначенной для ее зондирования // X Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2016. –Том I. - С.80-84.
6. Канер Э. А., Скобов В. Г. Электромагнитные волны в металлах в магнитном поле – УФН, 1966, июль, т.89, вып. 3, с. 367-408.
7. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика: учебное пособие / Под ред. И.Н. Топтыгина. – СПб: Издательство «Лань», 2003. – 400 с.
8. Канер Э. А., Гантмахер В. Ф. Аномальное проникновение электромагнитного поля в металл и радиочастотные размерные эффекты – УФН, 1968, февраль, т.94, вып. 2, с. 193-241.
9. Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / Пер. с англ. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 366 с.: ил.
10. Безродный К. П. Геотехническое обеспечение при строительстве двухпутного перегонного тоннеля с помощью ТПМК/ К. П. Безродный, М. О. Лебедев, В. А. Марков В. А., Старков А. Ю. // Метро и тоннели, 2015, №5.- С. 16-19.
11. Болтинцев В.Б. О некоторых возможностях метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно –

геологических изысканиях в тоннелях/В.Б. Болтинцев, В.Н. Ильяхин, М.А. Чайка, К.П. Безродный// XIII Всероссийская научно – техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: труды конф., – Москва: ИРЭ РАН, 2019. – С.83-88.

Для цитирования:

Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Черемисин А.А., Безродный К.П. О некоторых возможностях метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно – геологических изысканиях в тоннелях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/13/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.13