

УДК 550.857 : 624.130

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИ УКРЕПЛЕНИИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КУЗБАССЕ

Простов Сергей Михайлович¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: psm.kem@mail.ru

Никулин Николай Юрьевич²,

канд. техн. наук, e-mail: n.y.nikulin@mail.ru

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²ООО «НООСТРОЙ» Россия, 650056, Кемерово, ул. Ворошилова, 30

Аннотация. Существующие методики георадиолокации не в полной мере обеспечивают рациональные режимы и требуемую информативность при интерпретации радарограмм, не адаптированы к решению задач локации ослабленных зон в естественных и техногенных массивах и оценки качества их укрепления физико-химическими методами. Цель работы: обоснование и разработка методического обеспечения георадиолокационного мониторинга укрепляемых оснований горнотехнических сооружений, обеспечивающего повышение информативности локации ослабленных зон и контроля процессов укрепления массива для снижения затрат на проведение горно-строительных работ. Методы исследований: классические методы электродинамики и электrorазведки, лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород, производственные геолого-маркшейдерские и геофизические исследования, включающие георадиолокационный мониторинг, камеральную обработку данных, статистический анализ баз данных. Поскольку глубинность и разрешающая способность зондирования, нелинейно зависящие от удельного электрического сопротивления ρ и относительной диэлектрической проницаемости ϵ , убывают с ростом частоты, в качестве критерия эффективности режима георадиолокации целесообразно использовать функцию F , учитывающую оба этих фактора. Частота зондирования, соответствующая экстремуму функции F , нелинейно зависит от отношения ρ/ϵ . Подбор центральной частоты антенного блока геолокатора в диапазоне 80–240 МГц с помощью разработанного циклического алгоритма обеспечивает повышение информативности мониторинга до 30 %. Повышение точности георадиолокационного мониторинга укрепляемых оснований сооружений достигается построением интегрированных радарограмм, аналогичных геоэлектрическим разрезам, с помощью алгоритма, включающего разбиение поля на элементы заданных размеров и суммирование измеренных сигналов в пределах этих элементов, а также комплексным алгоритмом, включающим зональную частотную фильтрацию, определение истинной глубины зондирования, формирование поглубинных срезов, вертикальных и горизонтальных геоэлектрических разрезов и объемных моделей ослабленных зон на основе данных геолого-геофизического мониторинга. На примерах мониторинга техногенных оснований надшахтного сооружения, железнодорожного пути, галереи обогатительной установки, тоннеля глубокого заложения установлено, что основными причинами формирования ослабленных зон являются разуплотнение насыпных грунтов и их локальное влагонасыщение. Данные зоны диагностируются по радарограммам с использованием следующих методик: фиксированием дополнительных зон проникновения инъекционного раствора как электрически контрастной среды; построением погоризонтных срезов и геоэлектрических разрезов путем совмещения с результатами инверсии ВЭЗ и статических зондирований; построением трёхмерных моделей по нескольким срезам. Полученная информация является эффективным дополнением традиционного геолого-геофизического мониторинга, при этом необходимый объем буровых работ может быть снижен на 10–15 %. При обосновании оптимальных режимов укрепления ослабленных грунтов методами электрохимического закрепления и напорной инъекции цементных растворов контролируют размеры зон закрепления и электрические свойства грунтов, взаимосвязанные с их физико-механическими свойствами, в пространстве и во времени на начальных стадиях горностроительных работ. Использование в качестве критериев интенсивности процессов закрепления грунтов средних значений амплитуд сигналов в пределах аномальных зон интегрированных радарограмм позволяет повысить точность контроля и снизить расход укрепляющего раствора на 15–30 %. Результаты исследований реализованы в форме рекомендаций по ликвидации аварийного состояния 7 горнотехнических объектов в Кузбассе.

Ключевые слова: георадиолокация, укрепление грунтов, электромагнитные свойства, напорная инъекция, электрохимическое закрепление.

Повышение эффективности применения технологий напорной инъекции (НИ) и электрохимического закрепления (ЭХЗ) требует непрерывного мониторинга состояния и свойств массива грунтов на всех стадиях укрепления, основными из которых являются следующие: определение геометрических параметров аномальных неустойчивых зон; контроль процессов обработки массива; оценка соответствия реальных механических свойств укрепленного массива проектным требованиям [1–3].

Решение данной проблемы путем развития методов электромагнитного контроля привело к созданию теоретической, методической и аппаратурной базы георадиолокации. Принцип работы георадара основан на приеме и компьютерной обработке электромагнитного сигнала, отраженного от границ сред с различными электрофизическими и диэлектрическими свойствами в радиоволновом диапазоне частот. Штатное программное обеспечение, включающее корректирование амплитуды и спектра, фильтрацию сигнала, разного рода преобразования и графическое редактирование, обеспечивает построение радарограммы, структура и цветовая палитра которой отражает структуру, строение и электромагнитные свойства среды [4–7].

Полученные результаты применения георадаров различного типа для решения практических задач открытой, подземной и строительной геотехнологии подтвердили достаточную глубинность, разрешающую способность и высокую оперативность георадиолокационного мониторинга [8–12]. Основные нерешенные проблемы в данной области состоят в следующем: не выявлены рациональные режимы применения радиолокации в составе систем комплексного геомониторинга; методы интерпретации радарограмм остаются в значительной степени субъективными; не обоснованы количественные критерии, обеспечивающие диагностирование неустойчивых зон, контроль

изменения физических свойств массива внутри этих зон в процессе технологического воздействия.

Анализ основных компонентов электромагнитных свойств среды – удельного электросопротивления (ρ) и относительной диэлектрической проницаемости ϵ , определяющих волновое число среды, показал, что в диапазоне частот $f = 50$ – 1000 МГц амплитуда полезного сигнала георадиолокации зависит от ϵ , а его затухание – от ρ . Обе величины нелинейно уменьшаются с возрастанием частоты до максимальной, при этом затухание сигнала нелинейно увеличивается с ростом влажности грунта (рис. 1).

Основные количественные параметры, определяющие эффективность георадиолокации, – глубина H и разрешающая способность Δ , убывают с ростом частоты, целесообразно в качестве комплексного критерия использовать функцию

$$F = H + \frac{L}{\Delta}, \quad (1)$$

где L – постоянная, принимаемая в зависимости от требуемой детальности геоконтроля в диапазоне $L = 3$ – 10 м²; H – глубина зондирования, м, определяемая по формуле [4]

$$H = \frac{K \sqrt{\rho}}{f^{1.5}}, \quad (2)$$

K – постоянная, комплексно учитывающая все неизменяемые параметры зондирования, для данного типа аппаратуры $K = 3.01 \cdot 10^{12}$ м·Гц^{1.5}·(Ом·м)^{-0.5}; Δ – разрешающая способность, м, определяется по формуле

$$\Delta = \frac{3c}{4f \sqrt{\epsilon}}; \quad (3)$$

c – скорость света, $3 \cdot 10^8$ м/с; f – центральная частота георадара, Гц; ϵ – относительная диэлек-

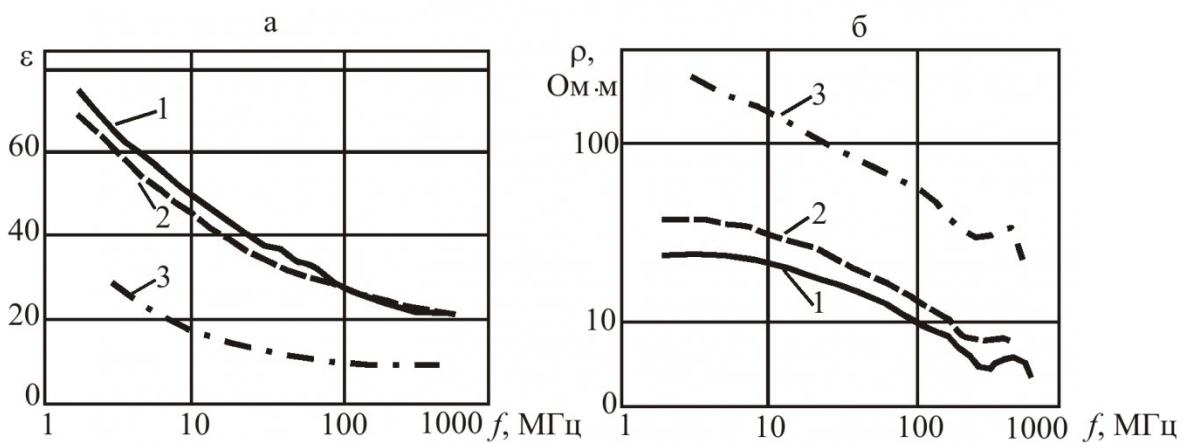


Рис. 1. Экспериментальные зависимости ϵ (а) и ρ (б) от частоты f и температуры t° при коэффициенте влагонасыщенности $k_n = 0,39$ и коэффициенте пористости $k_n = 0,4$ (по данным, приведенным в монографии [6]):
1 – $t^\circ = +24$ °C; 2 – $t^\circ = +8$ °C; 3 – $t^\circ = -17$ °C

трическая проницаемость зондируемой среды.

Рациональная частота f_p зондирования, соответствующая экстремуму функции F , находится в диапазоне 80–240 МГц:

$$f_p = \left(\frac{1,125c}{L} K \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon}} \right)^{0,4}. \quad (4)$$

С учетом статистически значимых изменений значений минимальной H_{min} , максимальной H_{max} фиксируемой глубины аномалии и ее эффективного радиуса R , определенных для 11 объектов мониторинга в Кузбассе, максимальная информативность георадиолокации составляет 4,3 бит, выбор рациональной частоты обеспечивает повышение информативности до 30 % (рис. 2).

Алгоритм подбора центральной частоты антенны георадара основан на пошаговом расчете центральной частоты, удовлетворяющей критериям $H_{min} \leq H < H_{max}$ и $\Delta \leq 0,1R$.

Построение интегрированных радарограмм, приближенных по виду к геоэлектрическим разрезам, обеспечивается с помощью циклического алгоритма, включающего разделение поля исход-

ной радарограммы на элементы с заданными размерами и суммированием положительных значений амплитуд отраженных сигналов, соответствующих всем пикселям в пределах этих элементов.

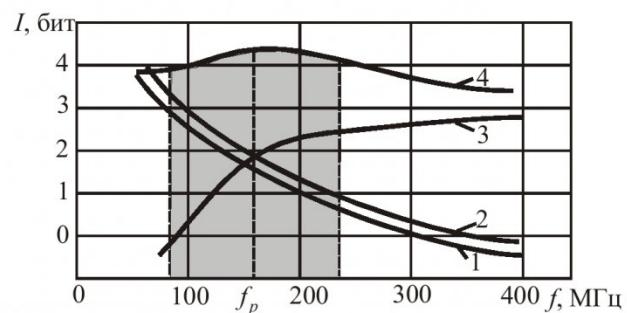


Рис. 2. Зависимость количества информации I георадиолокационного мониторинга от частоты f :

1 – I_1 для H_{max} ; 2 – I_2 для H_{min} ; 3 – I_3 для R ;
4 – $I_1 + I_3$

Алгоритм комплексной интерпретации радарограмм включает: зонную частотную фильтра-

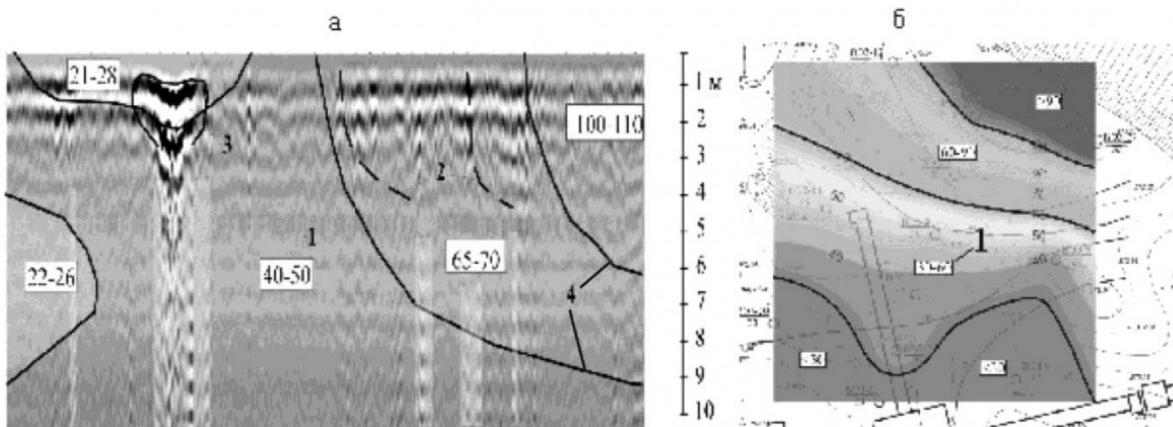


Рис. 3. Радарограмма (а) и горизонтальный геоэлектрический разрез, построенный по результатам ВЭЗ для разноса $AB = 22$ м (б): 1 – диапазон УЭС; 2 – трещины отрыва; 3 – зона интенсивного разуплотнения; 4 – граница геоэлектрических слоев

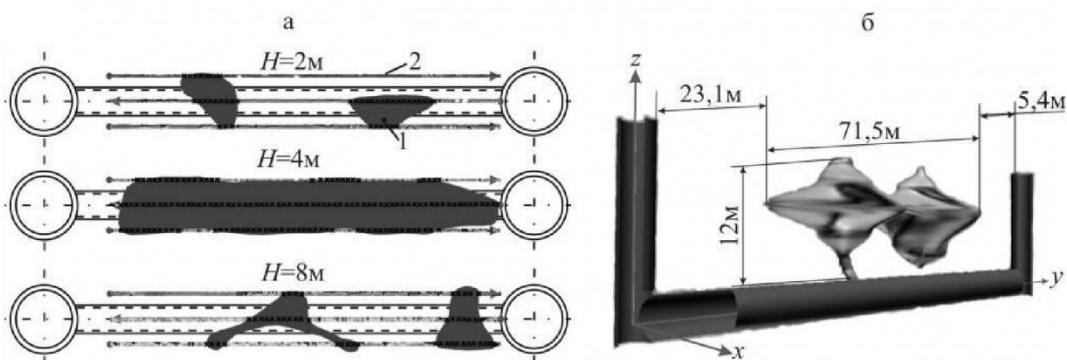


Рис. 4. Погоризонтные срезы на различных глубинах H (а) и трехмерная модель зоны распространения влагонасыщенных грунтов (б): 1 – зона распространения водонасыщенных грунтов; 2 – погоризонтный срез радарограммы; xxx – границы распространения водонасыщенных грунтов на погоризонтном срезе радарограммы

цию сигнала от металлических элементов по данным технической документации объекта; определение истиной глубины зондирования подбором эффективного значения относительной диэлектрической проницаемости среды ϵ по аналогичным геоэлектрическим разрезам и справочным данным; формирование поглубинных срезов и объёмной модели ослабленной зоны с учетом данных гидрогеологических изысканий и статического зондирования.

Установленные закономерности изменения электромагнитных параметров укрепляемых зон грунтовых оснований, разработанные алгоритмы и методики интерпретации георадарограмм позволили перейти к мониторингу ослабленных зон и контролю процессов укрепления методами ЭХЗ и НИ.

На разрезе Краснобродский в результате комплексного мониторинга основания железнодорожного пути на участке «Угольная-Тырган» протяженностью 5,5 км установлено, что причинами оползнеобразования насыпи и значительных деформаций в сторону откоса лога явилось влагонасыщение грунтов под насыпью грунтовыми водами. Влагонасыщенные зоны диагностированы по отрицательным аномалиям на графиках вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) на верховом и низовом откосах. Комплексная интерпретация радарограмм позволила по погоризонтным срезам на глубинах от 1 до 3 м установить расположение и размеры зон влагонасыщенных, разуплотненных грунтов и зон пучения. Для устранения причин оползней предложены системы дренажных траншей и понижение отметки водопропускной трубы.

В насыпном грунтовом массиве основания га-

лерей обогатительной установки на Краснобродском разрезе по радарограммам установлены границы геоэлектрических слоёв, диагностированы зоны разуплотнения и трещин отрыва. Путём совмещения радарограмм и результатов инверсии ВЭЗ построены вертикальные геоэлектрические разрезы (рис. 3, а) и погоризонтные срезы на глубинах 1; 3,6 и 7,3 м, на которых зоны с УЭС $\rho_k < 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ интерпретируются как разуплотненные водонасыщенные зоны (рис. 3, б). Для устранения деформаций основания предложены устройство контрфорсов для укрепления откоса насыпи и инъекционное упрочнение ослабленных зон под фундаментами.

При ликвидации аварии тоннеля глубокого заложения на ЗСМК (г. Новокузнецк) диагностировано формирование слоя суглинков, насыщенного грунтовой водой и утечками из подземных коммуникаций, что привело в результате оседаний к провалу на земной поверхности глубиной до 1,2 м и диаметром до 6 м. Построены карты распространения водонасыщенных грунтов на глубинах 2, 4, 8 м (рис. 4, а) и трехмерная модель аномальной зоны (рис. 4, б). По результатам мониторинга разработан проект укрепления ослабленной зоны грунтов методом напорной инъекции.

При экспериментальном ЭХЗ грунтов обеспечивается повышение сцепления грунта в 2,1 раза при применении двухрастворной схемы и 6,3 раза – однорастворной схемы, модуль деформации грунтов при этом может возрасти в 3,9 раза. Результаты электрообработки в значительной степени зависят от выбранного режима (плотность и объемное соотношение компонентов, плотность тока, время обработки, шаг установки электродов), а также от особенностей строения и свойств

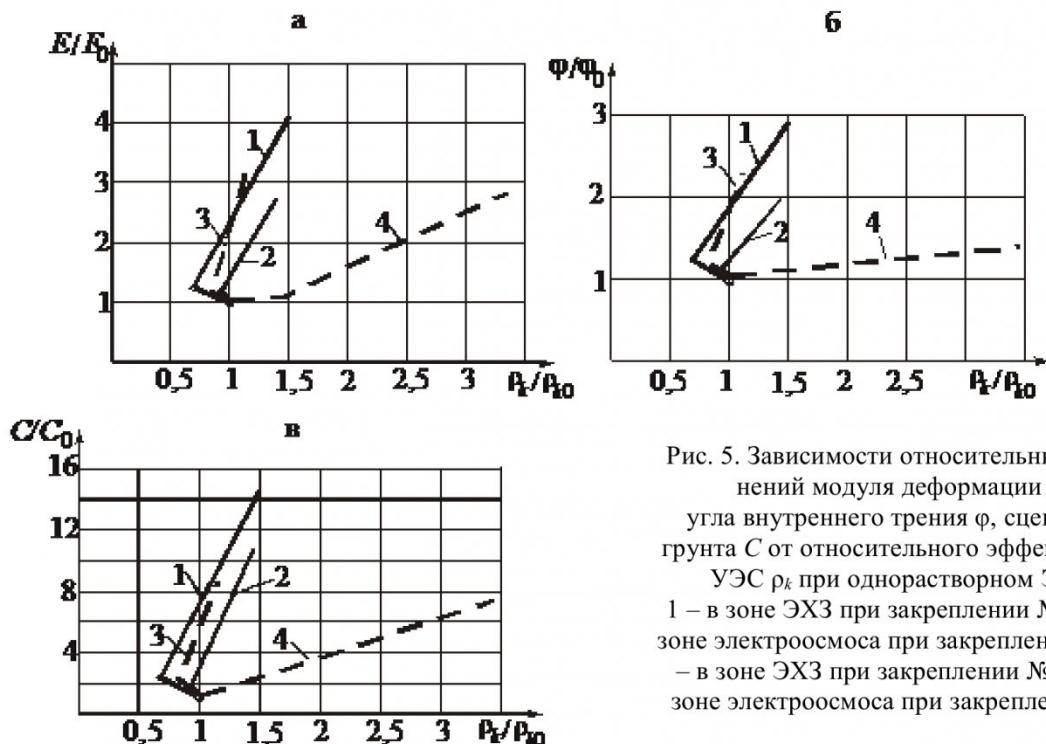


Рис. 5. Зависимости относительных изменений модуля деформации E ,

угла внутреннего трения φ , сцепления грунта C от относительного эффективного

УЭС ρ_k при однорастворном ЭХЗ:

1 – в зоне ЭХЗ при закреплении №1; 2 – в зоне электроосмоса при закреплении №1; 3 – в зоне ЭХЗ при закреплении №2; 4 – в зоне электроосмоса при закреплении №2

закрепляемого массива. Контроль изменения электропроводящих и акустических свойств массива традиционными геофизическими методами позволяет усреднено оценивать с помощью установленных зависимостей изменение физико-механических свойств массива, снижая требуемые объемы геологических изысканий и статического зондирования (рис. 5).

Использование интегрированных радарограмм позволяет значительно расширить возможности георадиолокационного мониторинга при решении подобных задач. В частности, на обработанных радарограммах с шагом интегрирования в диапазоне 0,08–0,16 м более четко диагностируются вертикальные границы зоны обработки, что недоступно при электрическом и акустическом зондировании/

При радиолокации целесообразно количественно оценивать свойства массива в пределах аномальных зон по суммарной величине A амплитуды отраженного сигнала и по интегральному параметру I_A , включающему площадь исследуемой зоны:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i; \quad (5)$$

$$I_A = \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^{-1} \times \sum_{i=1}^n A_i S_i, \quad (6)$$

где A_i , S_i – соответственно амплитуда сигнала и площадь i -го элемента интегрированной радарограммы в пределах аномальной зоны; n – число элементов.

При применении технологии однорастворного

ЭХЗ эти параметры изменяются в диапазонах $A/A_0 = 0,79–1,05$; $I_A = 19–22,5$ В.

При экспериментальном укреплении грунтов методом НИ объем песчано-цементного раствора по 4 инъекторам изменялся в диапазоне от 0,15 до 0,45 м³. Установлено, что наибольшее увеличение сопротивлений внедрению зонда q_c и повороту фрикционной муфты f_s , полученных при статическом зондировании, соответствует объему закачки $V = 0,25$ м³, несущая способность свай P здесь увеличилась в 2,6 раза при среднем увеличении в 1,7 раза (рис. 6). Традиционные геофизические методы, основанные на сейсмическом и электрическом зондировании, позволяют качественно и количественно контролировать в пространстве и во времени стадии первоначального гидроразрыва грунта, последующее заполнение пустот и набор прочности укрепленной зоны.

Использование относительных значений эффективного и истинного УЭС массива, полученного в результате инверсии ВЭЗ, позволяет реализовать двумерный мониторинг, при этом диапазоны изменения этих параметров составили: уменьшение на 18–21 % на начальной стадии и увеличение на 10–15 % на стадии твердения. Для введенных на их основе интегральных показателей эти диапазоны составили соответственно 19–23 % и 5–17 %, что превышает величину коэффициента вариации параметра до инъекции в 2,9–3,6 раза. Применение интегрированных радарограмм дает следующие диапазоны изменения параметров: 2–13 % на начальной стадии и 5–41 % на стадии набора прочности массивом, что соответствует превышению значения коэффициента вариации параметра в 1,4–11,7 раза (рис. 7).

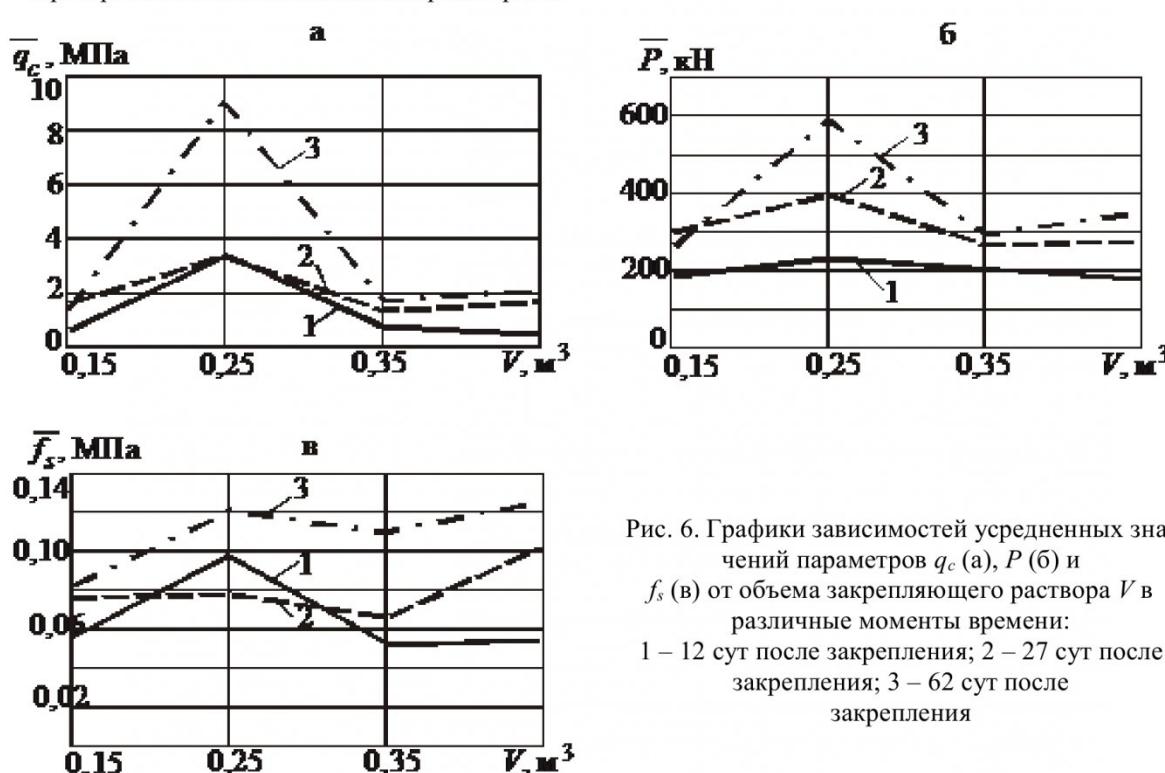


Рис. 6. Графики зависимостей усредненных значений параметров q_c (а), P (б) и f_s (в) от объема закрепляющего раствора V в различные моменты времени:
1 – 12 сут после закрепления; 2 – 27 сут после закрепления; 3 – 62 сут после закрепления

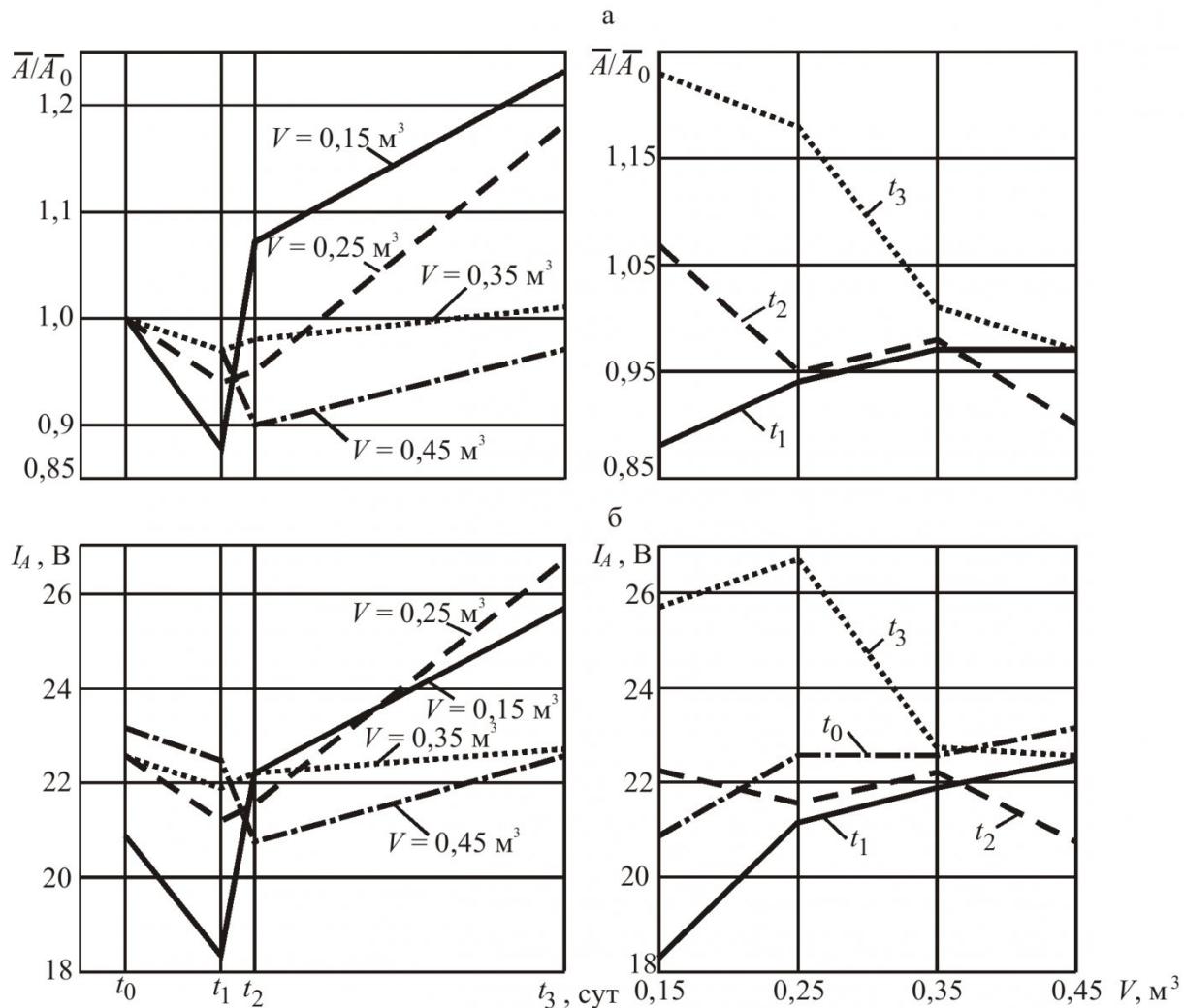


Рис. 7. Изменение среднего относительного значения A (а) и интегрального показателя I_A (б) в зависимости от стадии НИ и расхода закрепляющего раствора: t_0 – до проведения НИ; t_1 – через 1 сут после НИ; t_2 – через 7 сут после НИ; t_3 – через 62 сут после НИ

Зафиксированные максимальные значения параметров A и I_A соответствуют инъекторам с наибольшей конечной прочностью массива (объем закачанного раствора $V = 0,15\text{--}0,25 \text{ м}^3$). Таким образом, применение георадиолокационного мониторинга за счет повышения эффективности технологии НИ обеспечивает снижение расхода материалов в 1,5–3 раза.

Рекомендации, разработанные по результатам комплексного мониторинга, включая георадиолокационный, использованы на 7 объектах горной и металлургической промышленности Кузбасса: машинное здание ствола «Клетьевской» Казского рудника; строительство ОФ «Каскад», разрез «Ви-

ноградовский»; главный корпус закладочного комплекса «Таштагольского рудника»; участок насыпи железнодорожного пути на «Краснобродском угольном разрезе»; строительство ОФ на разрезе «Талдинский»; строительство ОФ на разрезе «Каснобродский», поле «Вахрушевское»; тоннель глубокого заложения, ОАО «ЗСМК».

Применение разработок способствовало устраниению аварийного состояния объектов. При этом обеспечено снижение объемов буровых работ, необходимых для комплексного мониторинга, на 10–15 % и объемов закрепляющего раствора при применении технологии НИ на 15–30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ибрагимов, М. Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. – Москва : АСВ, 2012. – 256 с.
2. Простов, С. М. Электрохимическое закрепление грунтов / С. М. Простов, А. В. Покатилов, Д. И.

- Рудковский. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. – 294 с.
3. Вартанов, А. З. Физико-технический контроль и мониторинг при освоении подземного пространства городов. – Москва : Горная книга, 2013. – 548 с.
4. Старовойтов, А. В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза / А. В. Старовойтов, М. Л. Владов. – Москва : МГУ, 1999. – 90 с.
5. Владов, М. А. Введение в георадиолокацию / А. В. Старовойтов, М. Л. Владов. Москва: МГУ, 2004. – 134 с.
6. Изюмов, С.В. Теория и методы георадиолокации / С.В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. – Москва : Горная книга, МГГУ, 2008. – 196 с.
7. Основы георадиолокации. – Москва : НПЦ «Геотех», 2006. – 58 с.
8. Старовойтов, А.В. Выделение пустот методом георадиолокации. / А.В. Старовойтов, А. М. Пятилова [и др.] // Инженерные изыскания, 2013. – С. 26–33.
9. Старовойтов, А. В. Возможности георадиолокации при изучении ослабленных зон в верхней части разреза / А. В. Старовойтов, , А. М. Романова, А. Ю. Калашников // Инженерные изыскания, 2011. – С. 62–70.
10. Анур, А. Опыт применения георадиолокации для выявления зон развития провалов в городе / А. Анур, А. В. Старовойтов, М. Л. Владов // Вестник МГУ, сер. Геология. – 1999. – С. 55–57.
11. Набатов, В. В. Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса / В. В. Набатов, Р. М. Гайсин, И. И. Гараньков // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2011. – С. 202–211.
12. Набатов, В. В. Георадиолокационное обследование массивов горных пород вблизи эксплуатирующихся коллекторов с целью выявления областей разуплотнения / В. В. Набатов, Р. М. Гайсин // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2012. – С. 60–68.

Поступило в редакцию 09.07.2015

UDC 550.857 : 624.130

GPR MONITORING WHILE BUILDING SOIL BASES MINING WORKS IN KUZBASS

Prostov Sergey M.¹,
Dr. Sc. . (Engineering), Professor
Nikulin Nikolai Yu.²,
C.Sc. (Engineering)

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

²LLC «NOVOSTROY» Voroshilova str., 30, Kemerovo, 650056, Russian Federation

Abstract: Existing methods of GPR do not fully provide the RA-tional modes and the desired information content in the interpretation of GPR data, not adapted to the solution of problems of the location of the weakened zones in natural and techno-genetic arrays and evaluate the quality of their strengthening physico-chemical methods. Objective: rationale and development of the methodical providing of georadiolocation innovative monitoring strengthening of the bases of mining works, ensure to give effect to the increase of informativity locations weakened zones and control processes of strengthening of the array to reduce the costs of conducting mining operations. Research methods: classical methods of electrodynamics and electrorate key laboratory study of physico-mechanical properties of rocks, productive geological survey and geophysical studies, including GPR monitoring, data processing, statistical analysis of databases. Because the depth and resolution sensing, nonlinear dependent electrical resistivity ρ and the relative dielectric constant ϵ , decrease with increasing frequency, as the criterion of the efficiency of the mode of GPR, it is advisable to use a function F that takes into account both these factors. The probing frequency corresponding to the extremum of the function F , the nonlinear depends on the ratio ρ/ϵ . The selection of the center frequency of the antenna unit of geolocator in the range of 80-240 MHz using the cyclic algorithm provides a more informative monitoring up to 30 %. Improving the accuracy of GPR monitoring strengthen the foundations of structures is achieved by building an integrated GPR data, similar to the geoelectric sections, using an algorithm that includes the partitioning field on the elements of a predetermined size and the summation of the measured signals within these elements, as well as a complex algorithm that includes zonal frequency filtering, determination of true depth sensing, formation pogrebennih

sections, vertical and horizontal geoelectric sections and three-dimensional models of the weakened zones on the basis of geological and geophysical monitoring. Examples of monitoring of technogenic grounds aboveground structures, railroad tracks, galleries enrichment plant, tunnel deep under the surface it is established that the main causes of the formation of the weakened zones are unzipping on bulk soils and their local blagoveshchenie. These zones are diagnosed on the GPR data using the following techniques: fixation of additional zones of penetration of the injection solution as electrically contrasting environments; the structure of slices and slice geoelectric sections by combining with outcomes inversion of VES and static data; constructing a three-dimensional model delay across multiple slices. The information obtained is the effective addition of traditional geological and geophysical monitoring, the necessary volume of drilling can be reduced by 10-15 %. At a substantiation of optimum modes of strengthening weakened soils electrochemical methods of fixation and high-pressure injection of cement mortar control the sizes of the zones of hook-ing and electrical properties of soils are related to their physico-mechanical properties, in space and in time in the initial stages of construction works. Using the criteria of intensity of processes of solidification of the average values of the amplitudes of signals within anomalous zones integrated GPR data can improve the accuracy of control and reduce the consumption of brandy solution of 15-30 %. The research results are implemented in the form of recommendations to eliminate an emergency condition 7 Goretex technical facilities in Kuzbass.

Keywords: GPR, consolidation of soils, electromagnetic properties, pressure injection, electrochemical fixation.

REFERENCES

1. Ibragimov, M. N. Zakreplenie gruntov in#ekciej cementnyh rastvorov / M. N. Ibragimov, V. V. Semkin. – Moskva : ASV, 2012. – 256 s.
2. Prostov, S. M. Jelektrohimicheskoe zakreplenie gruntov / S. M. Prostov, A. V. Pokatilov, D. I. Rudkovskij. – Tomsk : Izd-vo Tom. un-ta, 2011. – 294 s.
3. Vartanov, A. Z. Fiziko-tehnicheskij kontrol' i monitoring pri osvoenii podzemnogo prostranstva gorodov. – Moskva : Gornaja kniga, 2013. – 548 s.
4. Starovojtov, A. V. Georadiolokacionnye issledovaniya verhnej chasti razreza / A. V. Starovojtov, M. L. Vladov. – Moskva : MGU, 1999. – 90 s.
5. Vladov, M. A. Vvedenie v georadiolokaciju / A. V. Starovojtov, M. L. Vladov. Moskva: MGU, 2004. – 134 s.
6. Izjumov, S.V. Teoriya i metody georadiolokacii / S.V. Izjumov, S. V. Druchinin, A. S. Voznesenskij. – Moskva : Gornaja kniga, MGGU, 2008. – 196 s.
7. Osnovy georadiolokacii. – Moskva : NPC «Geoteh», 2006. – 58 s.
8. Starovojtov, A.V. Vydenie pustot metodom georadiolokacii. / A.V. Starovojtov, A. M. Pjati-lova [i dr.] // Inzhenernye izyskanija, 2013. – C. 26–33.
9. Starovojtov, A. V. Vozmozhnosti georadiolokacii pri izuchenii oslablennyh zon v verhnej chasti razreza / A. V. Starovojtov, , A. M. Romanova, A. Ju. Kalashnikov // Inzhenernye izyskanija, 2011. – C. 62–70.
10. Anur, A. Opyt primenenija georadiolokacii dlja vyjavlenija zon razvitiya provalov v gorode / A. Anur, A. V. Starovojtov, M. L. Vladov // Vestnik MGU, ser. Geologija. – 1999. – C. 55–57.
11. Nabatov, V. V. Opyt georadiolokacionnogo obsledovanija massiva dlja prognozorovaniya uslovij shhitovoj prohodki kollektorov v uslovijah megapolisa / V. V. Nabatov, R. M. Gajsin, I. I. Garan'kov // Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten', 2011. – C. 202–211.
12. Nabatov, V. V. Georadiolokacionnoe obsledovanie massivov gornyh porod vblizi jekspluati-rujushchihsja kollektorov s cel'ju vyjavlenija oblastej razuplotnenija / V. V. Nabatov, R. M. Gajsin // Gor-nyj informacionno-analiticheskij bjulleten', 2012. – C. 60–68.

Received 09 July 2015