

## ГЕОМЕХАНИКА

**УДК 550.372: 624.131.5**

**С. М. Простов, О. В. Герасимов, Н. Ю. Никулин, Д. А. Зубов**

### **ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ, СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

Подповерхностное радиолокационное (электромагнитное) зондирование основано на генерации импульсов электромагнитных колебаний в диапазоне частот 50–3000 МГц, приеме сигналов, отраженных от границ слоев зондируемой среды с различными электрофизическими свойствами [1].

Величина принимаемого отраженного сигнала может быть определена из выражения [2]:

$$E_h = \frac{E_0 K_h}{2h} \exp(-2Ah) \prod_{i=1}^n (1 - K_i), \quad (1)$$

где  $E_h$  – величина сигнала, отраженного на глубине  $h$ ;  $E_0$  – величина зондирующего сигнала;  $K_h$  и  $K_i$  – коэффициенты отражения электромагнитной волны от границы основного слоя на глубине  $h$  и от промежуточных слоев ( $i = 1 \dots n$ );

$$K = \frac{\sqrt{\varepsilon_i} - \sqrt{\varepsilon_{i+1}}}{\sqrt{\varepsilon_i} + \sqrt{\varepsilon_{i+1}}};$$

$A$  – удельное затухание сигнала в проводящей немагнитной среде

$$A = \frac{a}{\rho - \sqrt{\varepsilon}};$$

$a$  – постоянная, зависящая от рабочей частоты и времени установления поляризации среды;  $\rho$  – эффективное удельное электросопротивление среды;  $\varepsilon$  – эффективная абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Техническая реализация георадиолокационных исследований включает следующие основные операции:

- формирование зондирующего сигнала, представляющего собой импульс с длительностью, определяемой 1,5–2 периодами колебаний рабочей частоты, и наносекундным фронтом;

- возбуждение электромагнитного поля в массиве излучающей антенной;

- прием отраженного сигнала и его преобразование, включающее трансформацию в область звуковых частот путем стробоскопической обработки и сжатие динамического диапазона путем широкополосного усиления с автоматической регулировкой во времени;

- измерение временных интервалов между от-

раженными сигналами, формирование и визуализация радарограмм.

Основными функциональными характеристиками георадарных устройств являются глубинность и разрешающая способность зондирований.

Глубинность зондирования  $H$  определяется рядом факторов, описываемых уравнением

$$P_0 N K_h^2 (1 + K_0)^2 \left( \frac{C}{f_0} \right)^2 \left[ \frac{L(\beta H)}{4H^2} \right] = 64 \pi K T \Delta f, \quad (2)$$

где  $P_0$  – излучаемая мощность;  $N$  – число накоплений при регистрации полезного сигнала;  $K_0$  – коэффициент отражения от границы "порода–воздух";  $C$  – конструктивная постоянная, определяющая эффективную площадь антennы;  $f_0$  – центральная рабочая частота;  $L(\beta H)$  – функционал, определяющий потери на поглощение электромагнитной энергии за счет токов проводимости;  $\beta$  – коэффициент поглощения, рассчитываемый на основе дисперсионной частотной зависимости поляризуемости диэлектриков

$$\beta = \frac{60\pi \cdot 1.13\sigma}{\sqrt{\varepsilon_0}} + \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\tau\omega^2 \cdot 10^{-8}}{\sigma\sqrt{\varepsilon_0}},$$

$\sigma$  – проводимость;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_\infty$  – диэлектрическая проницаемость при  $f = 0$  (статическая) и  $f \rightarrow \infty$  (оптическая);  $\omega = 2\pi f_0$  – круговая частота;  $\tau$  – интервал времени поляризации;  $4KT\Delta f$  – мощность собственных шумов приемника;  $K$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $\Delta f = 0,7f_0$  – полоса пропускания приемного устройства.

Поскольку основная часть геолокационных исследований ведется в дальней радиоволновой зоне, разрешающая способность метода полностью определяется длиной волны  $\lambda$ . Так в диапазоне  $f_0 = 50$ –3000 МГц разрешающая способность, оцениваемая как  $\lambda/2$ , составляет 1–100 см.

Из уравнения (2) следует, что для увеличения глубины зондирования  $H$  необходимо:

- увеличивать мощность  $P_0$ ;
- увеличивать число накоплений  $N$ ;
- снижать частоту  $f_0$ .

Поскольку увеличение  $N$  ограничивается техническими возможностями аналого-цифровых преобразований и формирования зондирующих импульсов, а уменьшение частоты  $f < 50$  МГц ведет к недопустимому снижению разрешающей способности, реальным является только первый из выше указанных путей. Приближенная оценка показывает, что при  $P_0 = 200$  Вт,  $N = 10$ ,  $f_0 = 100$  МГц в слабопроводящем массиве ( $\epsilon_0 = 5$ ;  $\rho = 500$  Ом·м) максимальное значение  $H$  составляет  $H_{max} = 17$  м.

Для повышения информативности геолокации полученные при измерениях данные подвергают визуальной и компьютерной обработке, алгоритм которой включает следующие операции: ввод данных; предварительное редактирование; коррекция амплитуд; фильтрация; импульсная или предсказывающая деконволюция; подавление дефрагрированных волн; статические поправки; Гильберт-преобразование мгновенных амплитуд, частот и фаз; пикирование границ и объектов; смещение радарограмм с осями и топографическими планами. Результаты исследований представляют в виде радарограмм в форме вертикальных георадиолокационных профилей или горизонтальных сечений, на которых воспроизведены линии синфазности отклонений, соединяющие максимумы (минимумы) волн дифракции, или изоомы (линии равных удельных электросопротивлений).

Интерпретация георадиолокационных данных основана на взаимосвязи электрофизических свойств среды ( $\rho, \epsilon$ ) с пористостью и влажностью. Поскольку электрические свойства горных пород в диапазоне  $f_0 = 50-3000$  МГц практически не изучены, за основу могут быть приняты зависимости, полученные в более низкочастотном диапазоне [3].

Гидрогеологическая интерпретация радарограмм включает четыре основные этапа:

- установление соответствия линий синфазности или изоом границам аномальных зон в исследуемом массиве;
- выделение георадарных комплексов, т. е. основных элементов геологического разреза;
- анализ локальных аномалий внутри комплексов;
- построение глубинного геологического разреза, ограждающего инженерно-геологические и гидрогеологические особенности исследуемого объекта.

Анализ физических, методических основ и имеющегося опыта применения георадиолокационного метода для решения задач геомеханики и геотехнологии позволил сделать выводы:

- бескважинная георадиолокация является одним из наиболее технологически и информационно развитых методов геоконтроля, обеспечивающим детальное построение геоэлектрических разрезов на глубину до 30 м, определение с учё-

том взаимосвязи электрических и физических свойств грунтового массива расположения границ слоев, ослабленных и влагонасыщенных зон;

- опробованные методики георадиолокационного контроля могут непосредственно применяться при укреплении неустойчивых зон, прогнозе свойств массива, что необходимо на стадии обоснования проектных решений;

- поскольку существуют способы отстройки от экранирующего влияния металлических конструкций при геолокации, нет принципиальных препятствий для применения этого метода на стадиях контроля процессов насыщения грунтов укрепляющим раствором и набора прочности укрепленным массивом.

Ниже приведены практические результаты, полученные при определении расположения и размеров неустойчивых обводненных зон в основании автомобильной дороги. В качестве основного метода комплексного мониторинга применялось электромагнитное сканирование.

Автомобильная дорога "Бийск - Мартыново - Новокузнецк" проходит по территории Новокузнецкого района Кемеровской области и занимает одно из ведущих мест в осуществлении транспортных связей Алтайского края, Республики Алтай с Кемеровской областью и ранее классифицировалась как дорога республиканского значения. Техническое состояние рассматриваемого участка дороги является неудовлетворительным. Наиболее сложным в отношении безопасности движения является перегон "Граница Алтайского края – Кузедеево", на котором имеются неустойчивые склоны естественного рельефа. Так на протяжении 15 лет происходят сезонные подвижки склона на 187 км рассматриваемой дороги. Дорожная одежда имеет большие деформации - продольные трещины, выбоины, разрушения кромок проезжей части, на отдельных участках покрытие разрушено полностью. Существующее земляное полотно на рассматриваемом участке выполнено по водоразделу в насыпи высотой до 1 м на протяжении 760 м и сложено суглинистыми грунтами твердой и полутвердой консистенции. На протяжении 270 м насыпь высотой до 6,5 м, проходящая по тальвегу лога с левой стороны и крутого склона - с правой, подвержена оползневым явлениям. Для разработки мероприятий по укреплению основания автодороги необходимо было определить местонахождение в плане и по глубине фильтрационных коллекторов.

Возможность локализации обводненных грунтов обусловлена тем, что активность флюидальных агентов существенно изменяет их электрическое сопротивление. При насыщении водой многие грунты становятся существенно более электропроводящими, удельное электросопротивление относительно пресных приповерхностных вод может изменяться в широких пределах от 1 до 1000 Ом·м, а грунтов при нормальной влажности

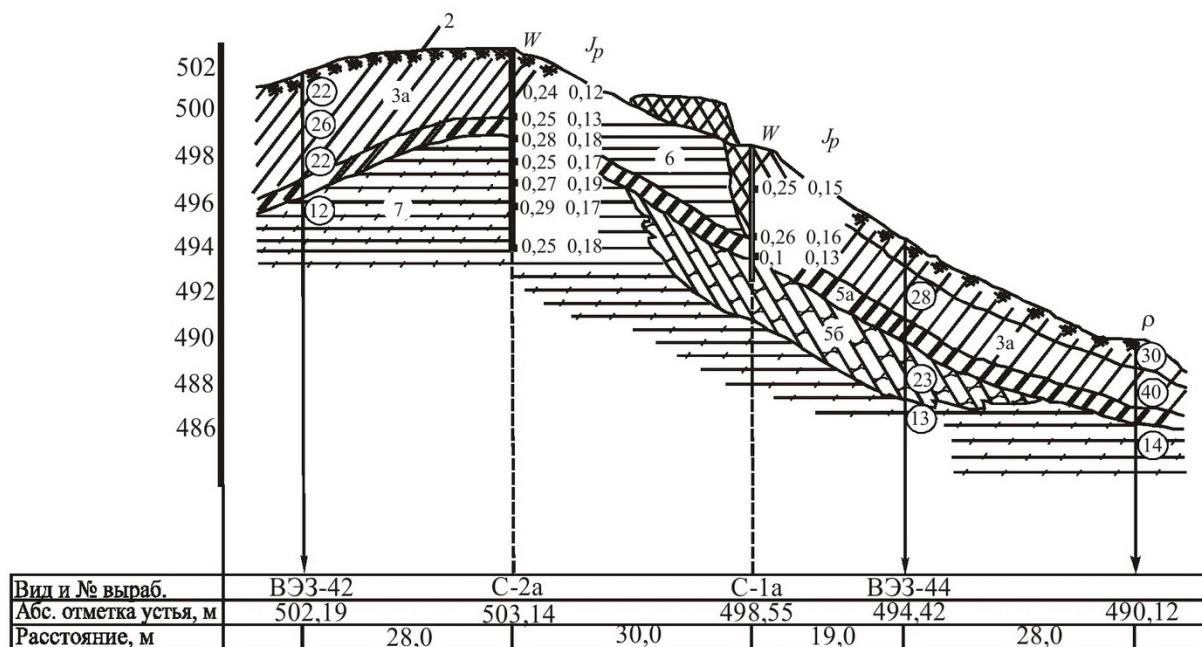


Рис. 1. Геологический разрез:

*C-1a, C-2a – скважины; 2–7 – геологические элементы; W – природная влажность; J<sub>p</sub> – число пластичности; ρ – УЭС; ВЭЗ – точки электроразондирований*

от 20 до 100 Ом·м. При полном заполнении порового пространства водой сопротивление обводненного грунта может понизиться до единиц Ом·м. Эти предпосылки обуславливают целесообразность использования электромагнитного сканирования для обнаружения аномальных влагонасыщенных зон.

Для проведения исследований использовался сканирующий измерительный комплекс "Импульс-Д", предназначенный для исследования

терретного комплекса приведены в табл. 1.

Для проведения ЭМ-сканирования необходимо знать физико-механические свойства пород слагающих массив. Все необходимые данные были получены в результате проведения инженерно-геологических изысканий. На рис. 1 изображен инженерно-геологический разрез по линии 3–3.

По данным инженерно-геологических изысканий строение массива следующее.

Слой № 2 – почвенно-растительный, пред-

Таблица 1. Техническая характеристика измерительного комплекса "Импульс-Д"

Параметры, режимы	Величина
Количество каналов	1
Диапазон времени регистрации, с	$125 \cdot 10^{-9} \div 1$
Динамический диапазон, дБ	140
Системный блок	FLOW – архитектура
Емкость накопителя, не менее	32 МБ
Количество точек временной шкалы	$2^{20}$
Скорость сканирования, м/с	0,5–1,5
Привязка траектории сканирования	GPS
Амплитуда П-образного тока, А	Стабилизирована на уровне 0,5–5
Амплитуда первого вступления тока осциллятора, А	До 5
Максимальная частота кадров в секунду	6
Блок питания	До 12В/3А
Устройство визуализации и управления	Жидкокристаллический графический модуль и клавиатура

труднодоступных ограниченных территорий в пешеходном варианте. Аппаратура дает возможность измерения в движении и с фиксацией антенн. Глубинность исследований ограничивается выбором приемно-генераторной конструкции. Основные технические характеристики измери-

ставленный почвой суглинистый черного цвета, высокопористой, сильноожимаемой, с корнями травянистой и древесной растительности. Распространен практически повсеместно, за исключением трассы автодороги и участков, где проводились земляные работы.

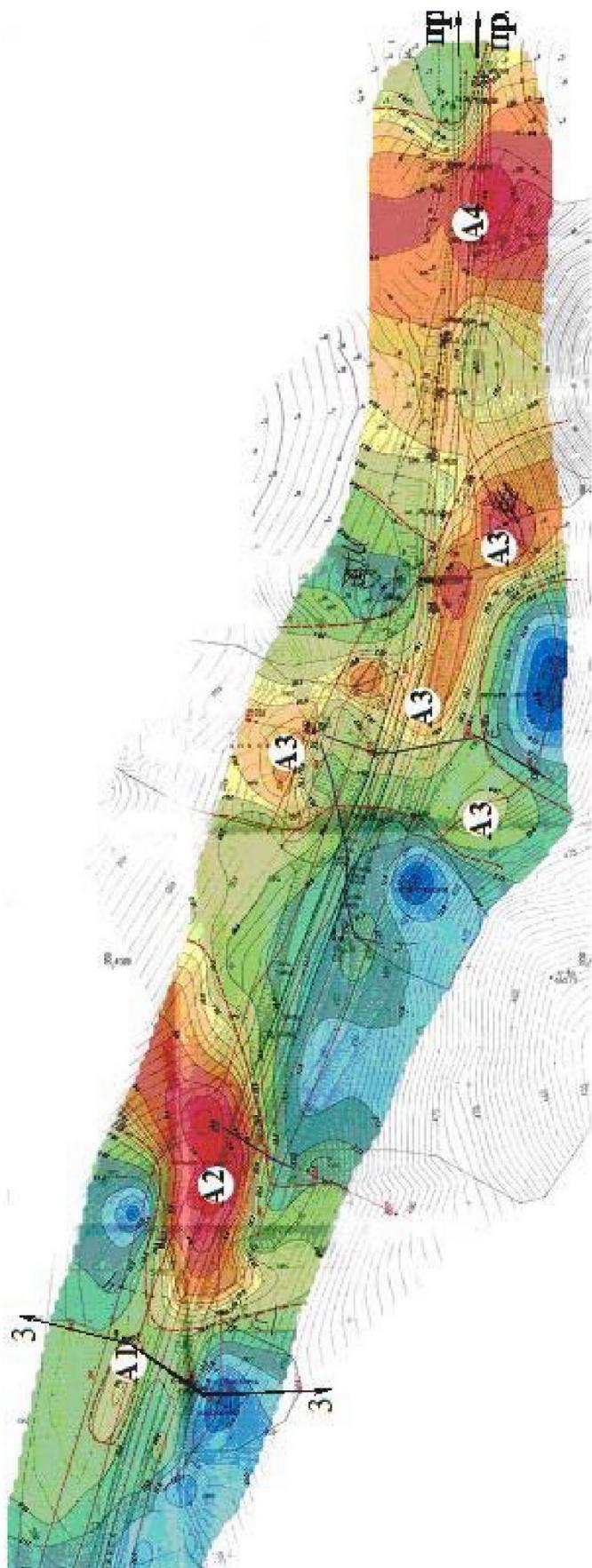


Рис. 2. Результаты ЭМ-сканирования в плане:  
3-3 – линия разреза; пр. 209, пр. 201 – продольные профили вдоль которых производилось ЭМ-сканирование

Элемент За – суглинок тяжелый делювиальный пылеватый бурого цвета, полутвердой конси-

стенции. Распространен в основном по склонам логов.

Слой № 4 – отложения еловской свиты – суглинок темно-серого цвета иловатый, с включением неразложившихся древесных остатков, полу-

профиля, пройденного по линии геологического разреза 3–3,55 м. Рабочий временной диапазон измеряемого сигнала был выбран 7–500 мкс, что

Таблица 2. Физико-механические свойства пород

№ скважины	Глубина отбора об-разца	Классификация грунта по ГОСТ 25-100-95	Природная влажность, $W$	Характеристика пла-стичности		Плотность			Пористость $n$ , %	Угол внутреннего трения, град	
				Влажность на границе текучести, $W_t$	Влажность на границе пла-стичности, $W_p$	Число пла-стичности, $J_p$	Плотность минеральной части $\gamma_s$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта $\gamma_d$ , г/см <sup>3</sup>		
1а	2	суглинок тяжелый пылеватый	0,25	0,4	0,25	0,15	2,73	1,95	1,56	42,9	15
	4		0,26	0,42	0,26	0,16	2,73	1,93	1,53	44	17
	5		0,25	0,38	0,25	0,13	2,73	2,15	1,95	28,6	
	6		0,24	0,33	0,21	0,12	2,72	1,95	1,57	42,3	22
2а	2	глина	0,25	0,34	0,21	0,13		1,83	1,46	46,5	22
	3		0,28	0,47	0,29	0,18	2,73	1,92	1,5	45,1	26
	4		0,25	0,45	0,28	0,17	2,73	1,93	1,54	43,6	37
	5		0,27	0,5	0,31	0,19	2,73	1,94	1,53	44	32
	6		0,29	0,52	0,35	0,17	2,73	1,9	1,47	46,2	36
	7		0,25	0,45	0,27	0,18	2,73	1,94	1,55	43,2	33

твердой консистенции.

Слой № 5 – суглинок элювиальный пестроцветный тяжелый, пылеватый, местами с примесью дресвы и щебня коренных пород, от твердой до мягкопластичной консистенции. По физико-механическим свойствам в слое выделены два инженерно-геологических элемента.

Слой № 5а – глина легкая пылеватая элювиальная, красновато-бурового цвета, ненабухающая, твердой и полутвердой консистенции. При дополнительном водонасыщении снижает прочностные свойства. При проектировании рекомендуется пользоваться показателями для водонасыщенного состояния.

Слой № 5б – отложения кочковской свиты, представленные глинами легкими пылеватыми пестроцветными, аргиллитоподобными, в основном красновато-бурыми, твердой и полутвердой консистенции. При дополнительном водонасыщении глина снижает прочностные свойства.

Грунтовые воды в период производства изысканий были встречены на глубине 4,2–5,7 м от поверхности земли.

Физико-механические свойства пород, отобранных в скважинах 1а и 2а на разной глубине, приведены в табл. 2.

ЭМ-сканирование выполнялось по системе продольных и поперечных профилей. Ниже приведены результаты георадарных исследований по наиболее значимым продольным профилям 201 и 209 и поперечному профилю, пройденному по линии геологического разреза 3–3. Расположение профилей в плане приведено на рис. 2.

Длина профилей 201 и 209 составила 660 м, а

обеспечило глубинность зондирования не менее 15 м. Обработка полученных материалов проводилась методом одновременной инверсии для коаксиальных приемно-генераторных конструкций в программе ABCWIN.

Результаты георадарного сканирования представлены в виде вертикальных разрезов и поглубинных срезов удельного электрического сопротивления, являющегося функцией физического состояния грунтов: водонасыщенности, пористости, их минерального, гранулометрического состава. На рис. 2 приведены результаты ЭМ-сканирования в плане на глубине  $H = 5$  м, а на рис. 3 – вертикальный разрез по линии 3–3.

Анализ приведенных данных показывает, что разрезы в полученном диапазоне глубин слабо-контрастные по электросопротивлению ( $\rho = 8$ –14 Ом·м) и не имеют отчетливых субгоризонтальных границ разделения слоев.

На участке можно выделить несколько зон пониженного сопротивления  $\rho = 6$ –10 Ом·м: A1, A2, A3, A4. Область A1 с сопротивлением  $\rho = 9$ –10,5 Ом·м имеет сложный характер залегания и протяженность в плане около 50 м в приповерхностной части ( $H < 5$  м). На профилях 209, 201 аномалия прослеживается на глубинах не более 6 м. Аномалия A2 имеет локальный приповерхностный характер с протяженностью 100 м и прослеживается до глубины 10 м. Аномалия A3 имеет наибольшее распространение по площади съемки и сложную конфигурацию в плане и в разрезе. Данная зона обусловлена суммой природных и техногенных факторов. Границы области наименьших сопротивлений в пределах данной зоны

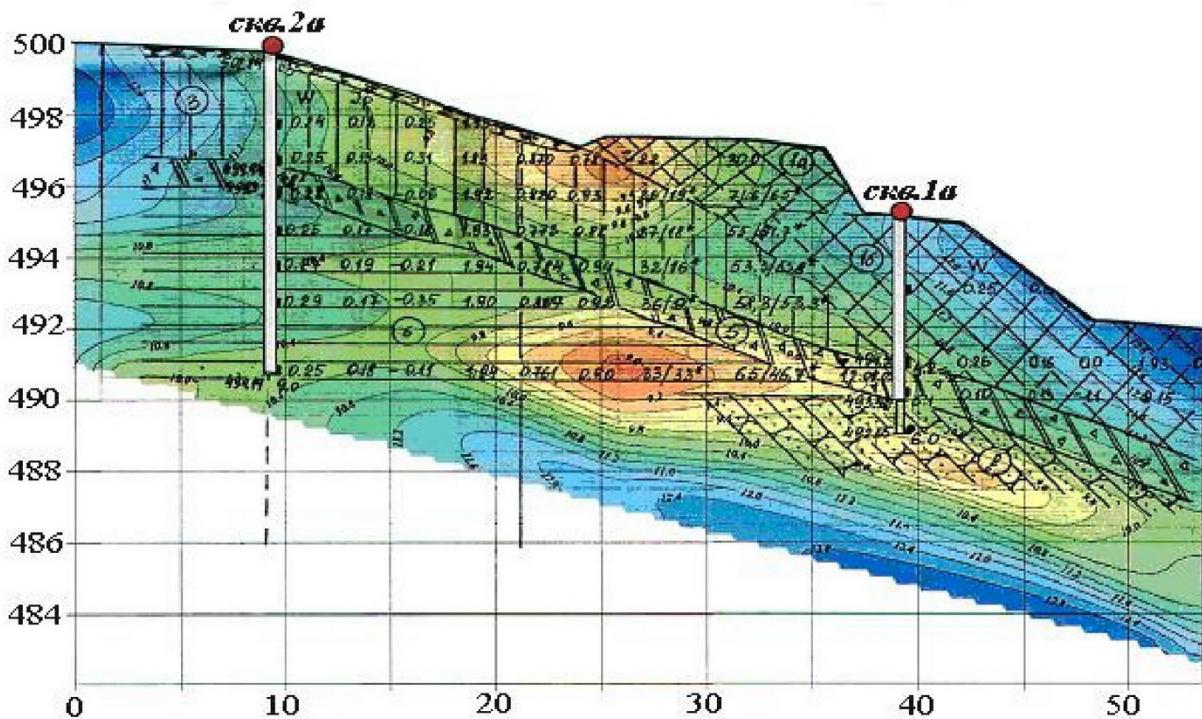


Рис. 3. Результаты ЭМ-сканирования по линии 3-3: скв. 1а, скв. 2а – скважины

$\rho = 6-8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  имеют резко выраженный градиентный характер, что позволяет связать особенности этого участка с влиянием техногенных проводящих объектов (металлические ограждения). Аномалия A4 имеет приповерхностный характер с протяженностью 150 м и прослеживается до глубины 8 м относительно дневной поверхности. Так наиболее вероятное расположение влагонасыщенных зон соответствует аномалиям A2 и A4.

Проведенные электромагнитные исследования позволили установить расположение по глубине и в плане основных фильтрационных коллекторов и перейти к разработке технических проектов по укреплению основания автодороги.

При проработке вариантов ликвидации оползневых явлений рассмотрены два варианта.

Первый вариант предусматривает:

- смещение трассы влево по ходу пикетажа с целью удаления от правого неустойчивого склона;
- понижение проектных отметок продольного профиля дороги с целью разгрузки поверхности оползневых участков от давления насыпного грунта, достигающего в отдельных местах 6 м;
- закрепление неустойчивого склона методом высоконапорной инъекции;
- проведение дренирования грунтов;
- устройство временного объезда на период строительства по существующей дороге.

Второй вариант предусматривает:

- прокладку трассы по существующей дороге;
- понижение проектных отметок продольного

профиля дороги с целью разгрузки оползневого склона (как и в 1-м варианте);

- закрепление откосов дороги подпорными стенками из свай с обеих её сторон на участке оползней и инъекционное укрепление грунтов;
- проведение дренирования грунтов;
- устройство временного объезда на период строительства справа от существующей дороги.

Понижение отметок продольного профиля в обоих вариантах продиктовано необходимостью уменьшения постоянной нагрузки на оползневой склон, уменьшения протяженности неустойчивых участков дороги, а также уменьшения длины и сечения свай.

Понижение профиля дороги до отметок грунтов устойчивого горизонта не представляется возможным. Т.к. это вызывает ухудшение безопасности движения за счет уменьшения радиусов вертикальных кривых и увеличивает глубину выемок в неустойчивых грунтах. Вариант № 1 предусматривает закрепление сваями оползневого склона на участке оползня с дополнительным занятием земель лесного фонда, что увеличивает затраты и ухудшает экологию за счет вырубки леса. Закрепление сваями откосов насыпи по варианту № 1 невозможно по условиям залегания грунтов устойчивого горизонта, поэтому был принят вариант № 2. Результаты инженерно-геологических изысканий, геофизического и электромагнитного контроля были использованы для обоснования параметров технологии укрепительных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтov, A. B. Георадиолокационные исследования верхней части разреза: учеб. пособие / A.

- В. Старовойтов, М. Л. Владов. – М. : Изд-во МГУ, 1999. – 90 с.
2. Владов, М. А. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 134 с.
3. Простов, С. М. Геоэлектрический контроль зон укрепления глинистых горных пород / С. М. Простов, В. А. Хямляйнен, М. В. Гуцал и др.; РАЕН. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 127 с.

□ Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
– докт. техн. наук, проф.  
каф. теоретической и гео-  
технической механики

Герасимов  
Олег Васильевич  
– зам. директора по науке  
ООО "НОЦЕНТР-Д"

Никулин  
Николай Юрьевич  
– студент гр. ФП-021

Зубов  
Денис Александрович  
– студент гр. ФП-021.

**УДК 622.267.33**

**Ю.Ф. Глазков, С.М. Простов, Д.И. Рудковский**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ  
ВЫРАБОТОК ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ  
ГЛИНИСТЫХ НАНОСОВ**

В связи со сложными условиями строительства шахт в Кузбассе, актуальны новые методы и технологии закрепления обводненных грунтов. Одним из таких методов может стать электрохимическое закрепление (ЭХЗ). Он показал свою несомненную эффективность при использовании в гражданском и железнодорожном строительстве, однако опыт его применения в горной промышленности ограничен и мало применим к условиям проведения подземных выработок. Анализ перспектив применения данного метода показал, что разработанная технология электрохимического закрепления позволяет не только исключить вывалообразования и связанные с ними простой на ремонтные работы, но и облегчить крепи за счет учета совместной работы комбинированной системы «капитальная крепь-оболочка из закрепленных пород».

Основной целью определения применимости данного метода становится решение задачи расчета несущей способности системы «капитальная крепь-породная оболочка» (в дальнейшем К-О).

Горные породы, вмещающие выработку, представляют собой переувлажненные наносы

в виде слоев суглинков, глин и супесей различного гранулометрического состава. Необходимые сведения о свойствах наносов получают путем проведения инженерно-геологических исследований на трассе проектируемой выработки.

Закрепление массива наносов вокруг и внутри сечения выработки производится путем подачи в трубчатые электроды, помещенные в предварительно пробуренные скважины, водных растворов различных крепителей-электролитов и воздействия на массив постоянного электрического тока. Как показывают обширные результаты практического применения ЭХЗ глинистых грунтов, обработка приводит к значительным изменениям их механических свойств. Они состоят в том, что происходит одновременное осушение грунтов и образование минеральных частиц, служащих цементирующим веществом для исходного грунта [1, 2].

Анализ результатов закрепления глинистых грунтов электрохимическим способом, описанных разными авторами, показал, что вопрос нахождения необходимых для проектирования системы К-О расчетных характеристик закрепленных наносов остается в настоящее

время далеко не исчерпанным.

Так, почти все приведенные данные относятся к частным случаям инженерно-геологических условий и не обладают достаточной полнотой и надежностью. Их абсолютное большинство относится к закреплению глинистых грунтов, залегающих в поверхностных слоях под фундаментами наземных зданий.

Наибольшее количество сведений обзорного характера приведено в работах Г.Н. Жинкина [2-4]. Лишь в относительно небольшой их части приводятся численные значения основных механических характеристик закрепленных грунтов, таких как предел прочности при сжатии, сцепление.

Проведенный анализ позволил установить, что для оценки несущей способности породной оболочки из закрепленных наносов вокруг капитальной выработки необходим следующий минимум сведений о свойствах материала оболочки:

- прочностные свойства закрепленного материала, обычно представляемые в графической форме в виде огибающей предельных кругов Мора (паспорта прочности породы), включающие сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$ , прочность