

Прогноз механических свойств грунтов на оползневом склоне по данным электротомографии и статического зондирования

В. В. Оленченко* (ИНГГ СО РАН), П. С. Осипова (ИНГГ СО РАН), И. С. Соколов (ГеоИнжСервис), Н. Г. Волков (ГеоИнжСервис)

Введение

Предпосылками для оценки механических характеристик грунтов по электроразведочным данным является зависимость удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов от влажности, литологического состава, плотности сложения, пористости (при условии низкой и постоянной минерализации поровой влаги). Эти же параметры определяют модуль деформаций (E), угол внутреннего трения (ϕ) и коэффициент сцепления (C). Связь механических и электрических свойств известна достаточно давно [4]. Опыт комплексирования статического зондирования и электротомографии показывает, что геофизические исследования действительно позволяют интерполировать ограниченные скважинные результаты и, таким образом, обеспечивают более экономичный и расширенный результат, чем только данные бурения [5, 6, 8-11]. Возможность прогноза механических свойств грунта по данным электротомографии показаны в работах [7].

Мы применили комплекс электротомографии и статического зондирования в Ядринском районе республики Чувашия на правом берегу р. Сура при изучении склона, на котором развиваются оползни. Вдоль этого склона проходит автодорога М-7 Москва-Казань. Её функционирование началось в середине прошлого века, и, с течением времени, на участке вдоль р. Сура начали развиваться деформации дорожного полотна. Причиной выхода из строя дороги являются активные оползневые процессы [2]. В настоящее время участок автодороги на склоне находится в стадии реконструкции. Главной целью наших исследований являлось локализация участков повышенной оползневой опасности. Основными задачами были установление корреляционных связей между электрическими и геотехническими свойствами грунтов, построение двумерных и трёхмерных геоэлектрических моделей и их пересчёт в модели механических свойств. Геологическими задачами были определение глубины залегания потенциальной поверхности скольжения оползней, выявление слабых грунтов.

Характеристика объекта

Характеристика участка исследований приведена по [2]. Оползневой склон располагается в северной части Приволжской возвышенности на стыке двух плато, границей между которым является река Сура. Это верхняя часть давнеоползневого склона высотой до 100 м. При относительной высоте до 105 м и заложении 840 м средняя крутизна склона около 7° . В верхней его половине прослеживаются активные оползни на протяжении 150-200 м. На плато под почвенно-растительным слоем мощностью 0,4 м залегают покровные делювиальные суглинки, подстилаемые лёссовыми суглинками мощностью от 2 до 14 м. Для давнеоползневого склона долины р. Сура характерно ступенчато-волнистое залегание кровли средне-верхнеюрских толщ, в которых формировались оползни скольжения и течения. Значительная часть участка исследований сложена оползневыми накоплениями мощностью от 2-3 м в языках молодых оползней до 10-16 м в валах выдавливания старых оползней. Дорожная насыпь мощностью до 11 м состоит из насыпных грунтов, представленных глинами и суглинками различной консистенции, глинистыми песками. Они располагаются на головных частях давних и современных оползней. В разрезе плато присутствует безнапорный водоносный горизонт. Он приурочен к подошве покровных лёссовидных суглинков и к кровле средне-верхнеюрских глин, а также к современным оползневым образованиям.

Методы

Электроразведочные работы методом электротомографии (ЭТ) выполнены в профильном и площадном вариантах. Профили начинались на приводораздельном аккумулятивном плато, пересекали автодорогу и спускались по оползневому склону. Длина профилей от 355 до 655 погонных метров. Шаг измерений по профилям составил 5 м. Участок площадных исследований располагался в районе проектируемого сооружения подпорной стенки вдоль автодороги. На площадке проектируемого строительства зондирования выполнены на 11 профилях длиной по 115 м общей. Расстояние между профилями составляло 25 м. Шаг измерений по профилям – 5 м. Измерения выполнены многоэлектродной многоканальной электроразведочной станцией «Скала-48к12», разработанной в ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) и произведённой серийно ООО «КБ Электротометрии» (г. Новосибирск). Последовательность подключения электродов соответствовала прямой и встречной трёхэлектродной установке, а также симметричной установке Веннера. Глубинность исследований трёхэлектродной установкой составила не менее 40 м. Двумерная и трёхмерная инверсия электроразведочных данных проводилась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv.

Испытание грунтов методом статического зондирования (СЗ) проводилось по ГОСТ 19912-2012 [1] установкой на базе автомобиля «Урал». Погружение зонда в грунт производилось с постоянной скоростью 1 м/мин $\pm 30\%$ при помощи силовой установки с синхронной записью показания приборов на персональный компьютер. Глубина зондирования достигала 40 м. В результате определялось: лобовое сопротивление, q_c (МПа), локальное трение по муфте, f_s (МПа), поровое давление, u_2 (МПа), удельная электропроводность грунта, σ (См/м). Измерения выполнены более чем в 10 точках, однако в связи со сложным рельефом местности не было возможности расположить точки зондирования точно на профилях электротомографии. Лишь несколько точек попало на геофизические профили и это дало возможность увязать электрические и геотехнические свойства грунтов.

Результаты

На рисунке 1 показан фрагмент геоэлектрического разреза и график лобового сопротивления под конусом (q_c) в точке статического зондирования на пикете 40 м. Сопоставление двумерной резистивной модели разреза и графика показало q_c , что слой с аномально низким УЭС (менее 9 Ом·м) обладает пониженным лобовым сопротивлением под конусом (менее 2,5 МПа). В тех грунтах на разрезе, где параметр q_c увеличивается до 4–6 МПа, электросопротивление разреза по данным ЭТ возрастает до 18–20 Ом·м. Таким образом, грунты с аномально низким УЭС (менее 10 Ом·м) обладают слабой несущей способностью, вероятно, мягкопластичны. Как правило, оползень формируется по переувлажнённым грунтам, имеющим низкие прочностные характеристики. Исходя из этого мы предполагаем, что аномалии низкого электрического сопротивления будут соответствовать участкам потенциального образования оползней.

Для увязки УЭС грунтов с их механическими характеристиками был проведён анализ данных статического зондирования в двух точках профиля электротомографии и построены корреляционные зависимости q_c и УЭС блоков восстановленной двумерной геоэлектрической модели. Для построения зависимости из анализа исключены высокие значения УЭС техногенных грунтов, аллювиальных песков, грунтов нарушенного сложения и сезонномёрзлых. Каждой точке зависимости соответствуют усреднённые значения q_c в i -том слое геоэлектрической модели мощностью h_i и сопротивлением ρ . Таким образом, q_c и ρ связаны следующим эмпирическим соотношением ($R^2 = 0,99$):

$$q_c = 0,24 \cdot \rho - 0,52 \quad (1)$$

Найденное соотношение позволяет прогнозировать параметр q_c по геоэлектрическим разрезам участка исследований.

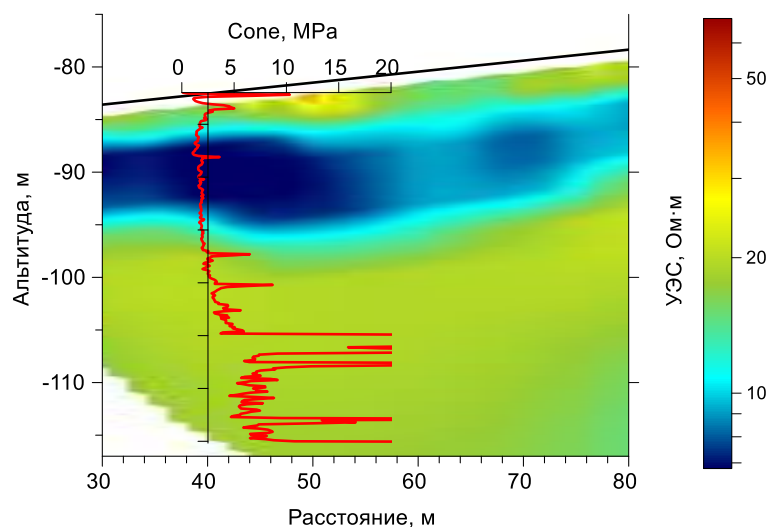


Рисунок 1. Фрагмент геоэлектрического разреза по профилю и график лобового сопротивления под конусом на пикете 40 м.

Затем, согласно Приложению И СП11-105-97, Часть 1, [3] были найдены корреляционные зависимости между значениями лобового сопротивления конусу q_c , модулем деформаций, угла внутреннего трения (φ) и коэффициента сцепления (C). Для суглинков и глин с достоверностью аппроксимации $R^2 = 1$ установлено, что:

$$E = 7 \cdot q_c \quad (2).$$

Угол внутреннего трения для суглинков ($R^2 = 0,95$):

$$\varphi = 1,9 \cdot q_c + 16,6 \quad (3).$$

Угол внутреннего трения для глин ($R^2 = 0,97$):

$$\varphi = 1,9 \cdot q_c + 14,2 \quad (4).$$

Коэффициент сцепления для суглинков ($R^2 = 1$):

$$C = 6 \cdot q_c + 11 \quad (5).$$

Коэффициент сцепления для глин ($R^2 = 0,99$):

$$C = 5,26 \cdot q_c + 23,9 \quad (6).$$

Далее, используя связи 1 и 2-6, были найдены значения механических свойств грунтов, соответствующие их удельному электрическому сопротивлению. В результате были построены разрезы прогноза механических свойств грунтов по геофизическим профилям.

На рисунке 2 приведен разрез прогноза механических свойств грунтов вдоль профиля электротомографии. На разрезе выделяются локальные участки повышенной оползневой опасности, на которых обнаружены грунты с прогнозным модулем деформаций менее 10 МПа и пониженными значениями φ . То есть, при изменении экзогеодинамических условий в этих местах может произойти сход оползня.

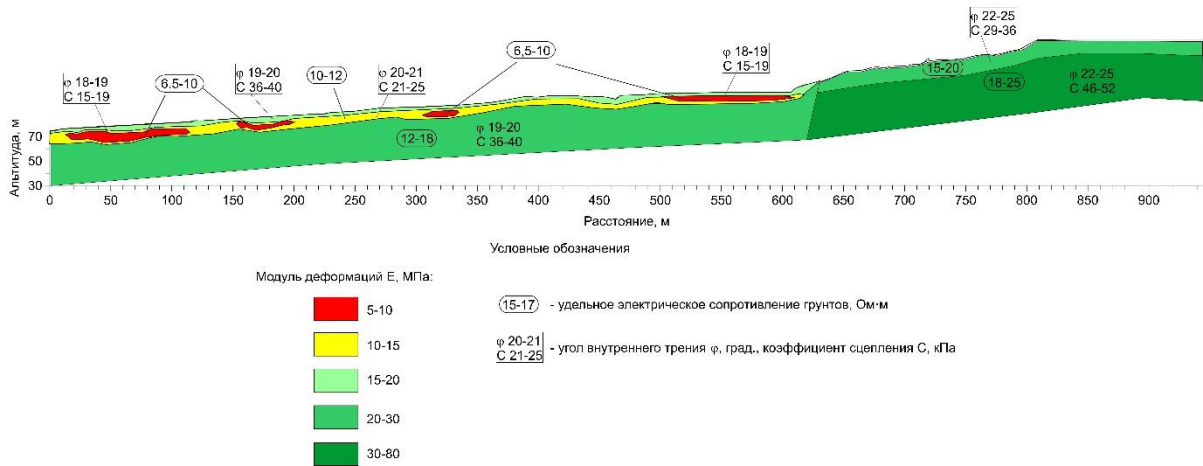


Рисунок 2. Прогнозный разрез механических свойств грунтов по геофизическим данным.

На участке сооружения подпорной стенки основной задачей электротомографии являлось выделение границы скольжения оползня. Для решения этой задачи была опробована трёхмерная инверсия данных на основе двумерных измерений (псевдотрёхмерная электротомография). По результатам инверсии строилась объёмная геоэлектрическая модель (рис. 3а), которая была пересчитана в деформативную модель (рис. 3б). Анализ объёмного распределения свойств показывает, что в массиве пород выделяется тонкий слой пониженного УЭС менее 10 Ом·м и пониженного значения модуля деформации (менее 10 МПа). Этот слой интерпретируется как пластичные грунты, по которым возможно скольжение оползня. Он имеет не сплошное распространение и отражает положение поверхности скольжения разных оползней. Первый оползень формируется в пределах действующей автодороги, его зеркало скольжения выделяется на глубине 2,5-4 м. Поверхность скольжения второго оползня, расположенного в границах проектируемой подпорной стенки, формируется на глубине 5-7 м. В настоящее время этот оползень стабилен, однако при подрезке склона или увеличении нагрузки на грунты возможна активизация оползня. На срезе трёхмерной модели УЭС показано предполагаемое положение поверхности скольжения оползней. Она проходит по слою пород с низким E.

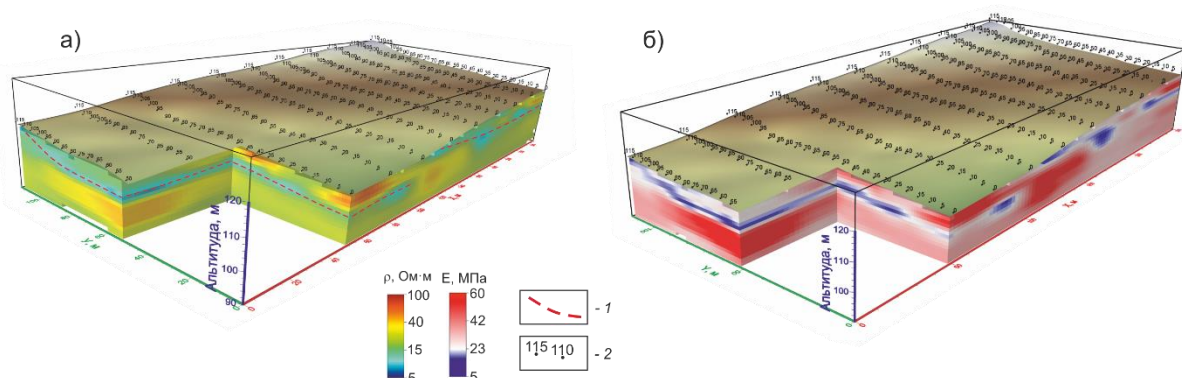


Рисунок 3. Объёмная геоэлектрическая модель (а) и прогноз распределения модуля деформаций E (б) на участке сооружения подпорной стенки: 1 – предполагаемая поверхность скольжения оползня, 2 – пикет профиля.

Выводы

В результате геофизических исследований методом электротомографии получены данные об особенностях геоэлектрического строения разрезов на оползневом склоне. Данные электроразведки сопоставлены с результатами статического зондирования, установлены корреляционные связи между электрическими и механическими свойствами пород, что дало возможность дать прогноз деформативных и прочностных характеристик грунтов.

Сопоставление данных электротомографии и статического зондирования показало, что грунты с аномально низким УЭС (менее 10 Ом·м) обладают малыми значениями лобового сопротивления под конусом и трения боковой поверхности зонда. Вероятно, такие грунты мягкопластичны и по ним возможен сход оползня.

Анализ геоэлектрических разрезов оползневого склона показал, что аномальные по электрическим параметрам грунты установлены в пределах полотна автодороги и прилегающей территории на расстоянии до 40 м. В основном оползневая поверхность находится в стабильном состоянии, а локальные потенциально опасные участки расположены на удалении от инженерных объектов.

По эмпирической связи электрических и механических свойств прогнозируется, что модуль деформаций грунтов в потенциально опасных участках склона составляет 7 МПа, угол внутреннего трения 18 град., а коэффициент сцепления 36 кПа.

На участке проектируемого сооружения подпорной стенки установлены две предполагаемые границы скольжения оползней. Первая граница выявлена в границах активного оползня на полотне автодороги на глубине 2,5-4 м. Вторая потенциальная граница скольжения установлена в основании древнего стабильного оползня, расположенного ниже автодороги.

Библиография

1. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – 2012.
2. Петров Н. Ф. и др. Оползни на автомобильной дороге М–7 «Волга» (Москва-Казань, 583-584 км) в правобережье Р. Сура в Чувашской Республике //Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №. 6. – С. 625-625.
3. СП 11-105-97. «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. «Общие правила производства работ» / Госстрой России. – М.: Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) Госстроя России, 1997.
4. Тархов А. Г. (ред.). Электроразведка: Справочник геофизика. – Недра, 1980.
5. Dahlin T., Schälín D., Tornborg J. Mapping of quick clay by ERT and CPT-R in the Göta Älv river valley //Landslides in Sensitive Clays. – Springer, Dordrecht, 2014. – С. 217-228.
6. Donohue S. et al. Multi-method geophysical mapping of quick clay //Near Surface Geophysics. – 2012. – Т. 10. – №. 3. – С. 207-219.
7. Lavalle L. V. A., Bortolozzo C. A., Pacheco T. C. K. F. Evaluation methodology for obtaining geotechnical parameters using electrical resistivity //First Break. – 2018. – Т. 36. – №. 8. – С. 55-59.
8. Malehmir A. et al. Geophysical assessment and geotechnical investigation of quick-clay landslides – a Swedish case study //Near Surface Geophysics. – 2013. – Т. 11. – №. 3. – С. 341-350.

9. Shan C. et al. Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden //Geophysics. – 2014. – Т. 79. – №. 4. – С. EN61-EN75.
10. Solberg I. L. et al. Geophysical and geotechnical studies of geology and sediment properties at a quick-clay landslide site at Esp, Trondheim, Norway //Engineering Geology. – 2016. – Т. 208. – С. 214-230.
11. Sulistijo B., Anwar A. S. K. Integrated site investigation method to analyze subsurface condition for the belt conveyor //Procedia Earth and Planetary Science. – 2013. – Т. 6. – С. 369-376.

References

1. GOST 19912-2012. [2012] Grunty. Metody polevyh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniem. MNTKS.
2. Petrov, N. F., Pavlov, A. N., Nikonorova, I., YAKovlev, E., & Aleksandrov, A. [2012]. Opolzni na avtomobil'noj doroge M-7 «Volga» (Moskva-Kazan', 583-584 km) v pravoberezh'e R. Sura v Chuvashskoj Respublike. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, (6), 625-625.
3. SP 11-105-97. [1997] «Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. CHast' I. «Obshchie pravila proizvodstva rabot». Gosstroj Rossii. Proizvodstvennyj i nauchno-issledovatel'skij institut po inzhenernym izyskaniyam v stroitel'stve (PNIIS) Gosstroya Rossii.
4. Tarhov, A. G. (Ed.). [1980]. *Elektrozvedka: Spravochnik geofizika*.
5. Dahlin, T., Schälin, D., & Tornborg, J. [2014]. Mapping of quick clay by ERT and CPT-R in the Göta Älv river valley. In *Landslides in Sensitive Clays* (pp. 217-228). Springer, Dordrecht.
6. Donohue, S., Long, M., O'Connor, P., Eide Helle, T., Aspö Pfaffhuber, A., & Rømoen, M. (2012). Multi-method geophysical mapping of quick clay. *Near Surface Geophysics*, 10(3), 207-219.
7. Lavalle, L. V. A., Bortolozzo, C. A., & Pacheco, T. C. K. F. [2018]. Evaluation methodology for obtaining geotechnical parameters using electrical resistivity. *First Break*, 36(8), 55-59.
8. Malehmir, A., Bastani, M., Krawczyk, C. M., Gurk, M., Ismail, N., Polom, U., & Persson, L. [2013]. Geophysical assessment and geotechnical investigation of quick-clay landslides—a Swedish case study. *Near Surface Geophysics*, 11(3), 341-350.
9. Shan, C., Bastani, M., Malehmir, A., Persson, L., & Engdahl, M. [2014]. Integrated 2D modeling and interpretation of geophysical and geotechnical data to delineate quick clays at a landslide site in southwest Sweden. *Geophysics*, 79(4), EN61-EN75.
10. Solberg, I. L., Long, M., Baranwal, V. C., Gylland, A. S., & Rønning, J. S. [2016]. Geophysical and geotechnical studies of geology and sediment properties at a quick-clay landslide site at Esp, Trondheim, Norway. *Engineering Geology*, 208, 214-230.
11. Sulistijo, B., & Anwar, A. K. [2013]. Integrated site investigation method to analyze subsurface condition for the belt conveyor. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 369-376.