

УДК 624.131.5: 624.131.32

С.М. Простов, О.В. Герасимов, Е.А. Мальцев

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ БУРОНАБИВНЫХ, БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ

При укреплении оснований эксплуатируемых горнотехнических сооружений зачастую отсутствует документация о характеристиках свайного поля. При строительстве промышленных и гражданских объектов на ранее подготовленных фундаментах необходимо осуществление оценки величины заглубления отдельных свай для определения соответствия проектным требованиям<sup>1</sup>.

Использование эхолокации

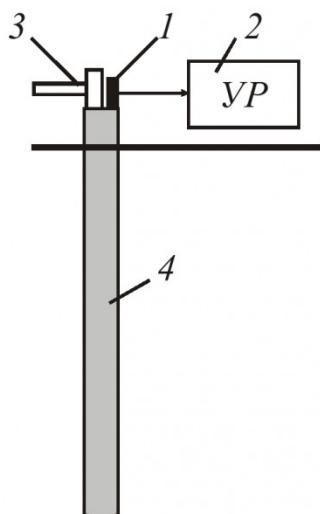


Рис. 1. Схема акустического зондирования сваи в грунте:  
1 – акселерометр, 2 – устройство регистрации, 3 – молоток, 4 – свая

для зондирования свай, находящихся в грунте, осложнено сильным затуханием акустического импульса. В Институте горного дела СО РАН разработан и апробирован опытный образец аппаратуры для определения длины свай в грунте акустическим методом. Прибор

обеспечивает усиление, запись исходного ударного импульса и эхо-сигнала. Обработка первичной информации осуществляется на компьютере методом спектрально-резонансного анализа. Разность частот соседних пиков регистрируемых колебаний связана с продольным размером объекта [1].

Схема установки акустического зондирования представлена на рис. 1.

Возбуждение колебаний происходит ударом ручного молотка 3 вдоль оси сваи 4. Акселерометр 1 воспринимает колебания торца сваи, преобразуя их в электрический сигнал, который записывается устройством регистрации 2. Затем полученные данные в лабораторных условиях оцифровываются и обрабатываются на компьютере спектрально-резонансным методом.

На рис. 2, а представлен график изменения ускорения на торце набивной сваи диаметром 0,4 м после удара, записанный в полевых условиях. Этот сигнал содержит собственные высокие и низкие спектры частот, показанные на рис. 2, б.

Длина сваи  $L$  при известной скорости распространения звука  $C$  вычисляется по формуле:

$$L = \frac{C}{2f_0}, \quad (1)$$

где  $f_0$  – низкая резонансная частота.

Величина  $f_0$  вычисляется как среднее арифметическое частотных интервалов между соседними значениями резонансных частот:

$$f_0 = \overline{\Delta f} = \frac{1}{(m-1)} \sum_{n=1}^{m-1} \Delta f_n. \quad (2)$$

где  $\Delta f_n = \overline{f_{n+1}} - \overline{f_n}$ ;  $\overline{f_n}$  – частота резонансного пика, усред-

ненная по данным многократных измерений;  $n$  – порядковый номер резонансного пика;  $m$  – количество резонансных частот в исследуемом интервале.

Использование акустического зондирования для определения длины сваи осложнено возникновением слабозатухающих резонансных колебаний в выступающей из грунта свободной части сваи, амплитудой изгибных колебаний, возникающих при ударе, несоосном с центром сваи. Вследствие этого погрешность определения длины сваи, находящейся в грунте, составляет  $\pm 4\%$ .

Проходящая по всей длине сваи стальная арматура, обладающая высокой электропроводностью, позволяет считывать сваю проводящим телом (заземлителем) и обосновать применение электромагнитных методов для определения заглубления сваи. Величина измеряемого сигнала будет зависеть от длины забитой части сваи и геологического строения вмещающих пород.

В институте геофизики СО РАН под руководством проф. Ю. А. Дащевского разработан способ определения длины забитой сваи на основе применения электромагнитных методов и последующего решения обратной задачи электромагнитных зондирований. Схема измерений представлена на рис. 3. Для каждого значения разноса  $r$  проводится два измерения: при подключении генератора тока к арматуре и при подключении тока к единственному электроду, что позволяет определить удельные сопротивления и мощности слоев грунта.

Результаты измерений, полученные при подключении к электроду, в форме графика

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 05-05-64100

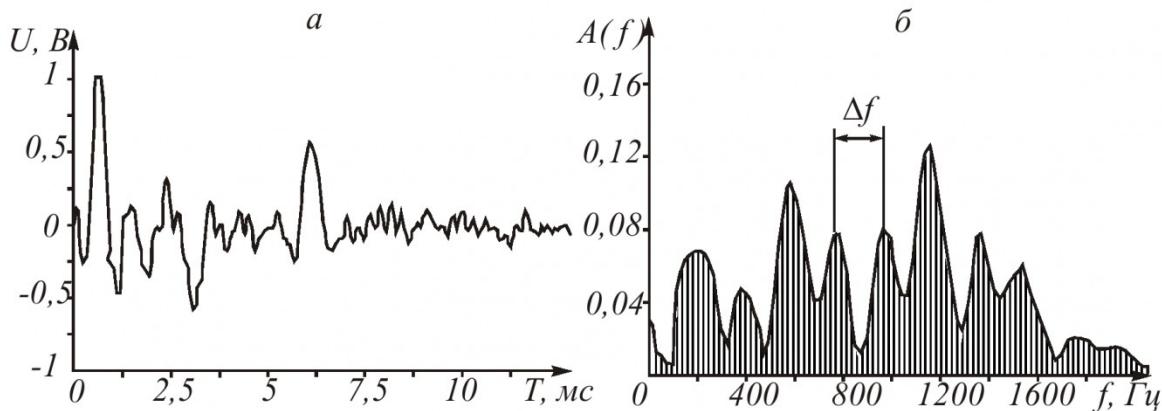


Рис.2. График изменения во времени  $T$  ускорения торца скважины в форме электрического сигнала  $U$  (а), спектр сигнала (б)

$\rho_k(r)$  после обработки с помощью программного продукта SONET, позволяют определить параметры среды. Экспериментальные значения электрическо-

фундамента во избежание гальванического контакта.

На первом этапе была построена трехслойная геоэлектрическая модель вмещающего разреза:  $h_1 = 1$  м,  $\rho_1 = 40$  Ом·м,  $h_2 = 12$  м,  $\rho_2 = 20$  Ом·м,  $\rho_3 = 100$  Ом·м (рис. 3).

На рис. 4. представлены результаты решения обратной задачи, позволившие определить глубину забитой части свай. По результатам измерений аппаратурой АНЧ-3 при разносе  $AB > 100$  м построены графики  $\rho_k(r)$ . Установлено, что глубина погружения свай составляет 10,5 м. При погрешности изме-

рений менее 15 % и точности теоретического решения не хуже 95 % суммарная погрешность прогноза не превышает 18 %.

Возможность использования метода каротажа сопротивлений для определения глубины залегания свай изучена на опытном участке ОАО "НООЦЕНТР-Д". Для определения чувствительности данного метода проведен эксперимент на земной поверхности. Схема подключения электродов при моделировании приведена на рис. 5, а. Труба, моделирующая сваю, располагалась горизонтально на поверхности земли,

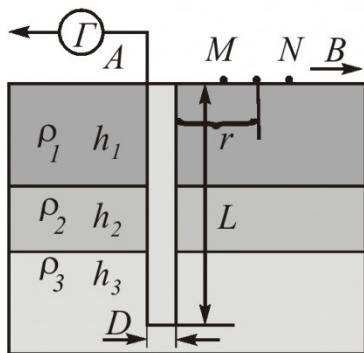


Рис. 3. Схема измерений:  $M$  – измерительные электроды;  $r$  – координата;  $\rho_1$  –  $\rho_3$ ,  $h_1$  –  $h_3$  – параметры геоэлектрического разреза

го поля, полученные при подключении генератора к свае, при использовании программного продукта PILE сравниваются с набором теоретических значений поля для предполагаемого диапазона возможных глубин. При наибольшем совпадении экспериментальных и теоретических зависимостей определяют глубину залегания свай  $L$ .

Разработанная методика была реализована на опытном участке ООО "НООЦЕНТР-Д". Объектом исследования являлись две сваи крайнего ряда свайного поля. В ходе подготовки к измерениям сваи были отрезаны от остальных частей

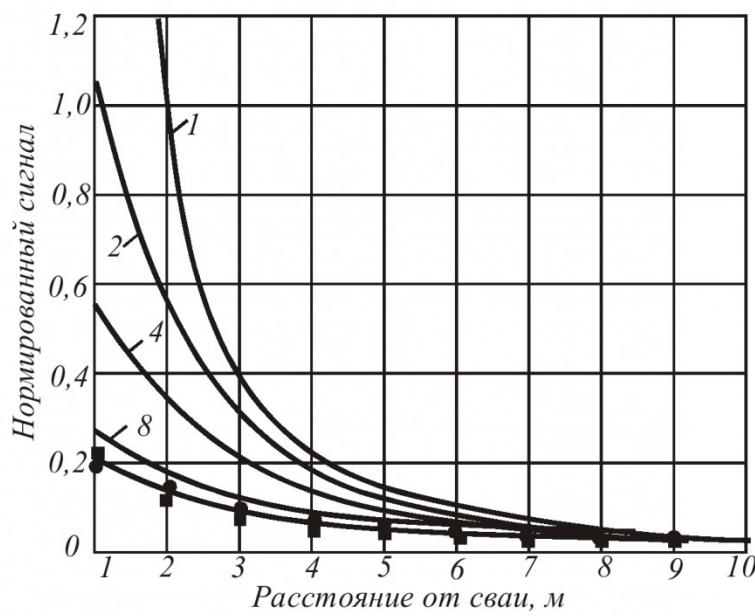


Рис. 4. Результаты эксперимента по определению фактической глубины забитых свай: 1, 2, 4, 8 – индекс  $L$  теоретических кривых, м; • – данные измерений для сваи № 1; ■ – данные измерений для сваи № 2

установку перемещали вдоль трубы. Различные схемы подключения электродов при моделировании применяли для повышения информативности эксперимента при определении нахождения модели. Результаты, полученные при схеме измерений А1,3М0,6Н, позволяют определить место расположение края трубы, моделирующей сваю, с достаточно высокой точностью.

По результатам проведенных измерений зондом А1,3М0,6Н с использованием аппаратуры АЭ-72, работающей на постоянном токе, получены графики, приведенные на рис. 6. Сопоставление полученных данных позволило установить, что по мере удаления измерительных электродов от трубы наблюдается выполнение графиков, что говорит о необходимости размещения электродов на расстоянии не более 1,5 м от оси исследуемого объекта.

С целью определения длины свай в свайном поле строящегося жилого дома выполнены геофизические работы установками различного типа с точечной регистрацией данных через 0,1 м. Каротаж проведен по скважине, пробуренной на расстоянии 1,5 м от исследуемой сваи, служащей опорой колонны. Результаты измерений, выполненных методом каротажа сопротивлений (КС), приведены на графиках: последовательным однополюсным градиент – зондом А1,3М0,7 Н с подключением электрода В на исследуемую сваю (рис. 7, а); зондом А40М0,7Н с подключением электрода В на сваю и заземлением электрода А в 40 метрах от сваи (в бесконечности) (рис.7, б).

На графиках КС при измерении зондом А40М0,7Н в зоне острия сваи ( $h = 11,5$  м) отмечается минимумом  $\rho_k$ , а в средней зоне имеет место переход от плюсовых значений к минусовым. Графики А40М0,7Н и А40М0,5Н практически совпадают.

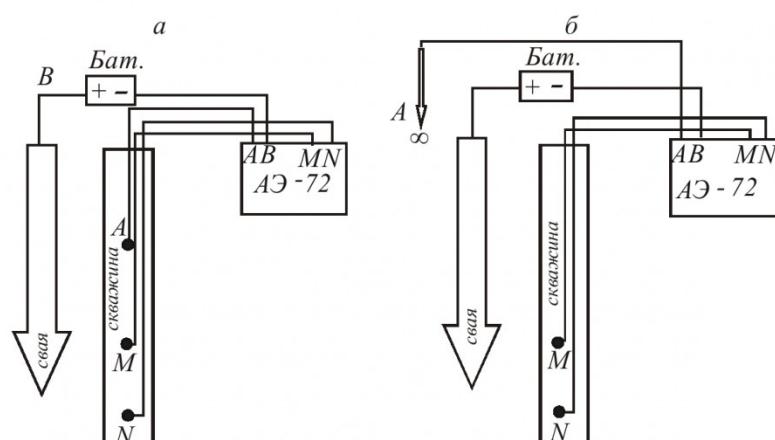


Рис. 5. Схема подключения электродов при моделировании способа определения глубины залегания свай установками А1,3М0,6Н (а) и А40М0,7Н (б)

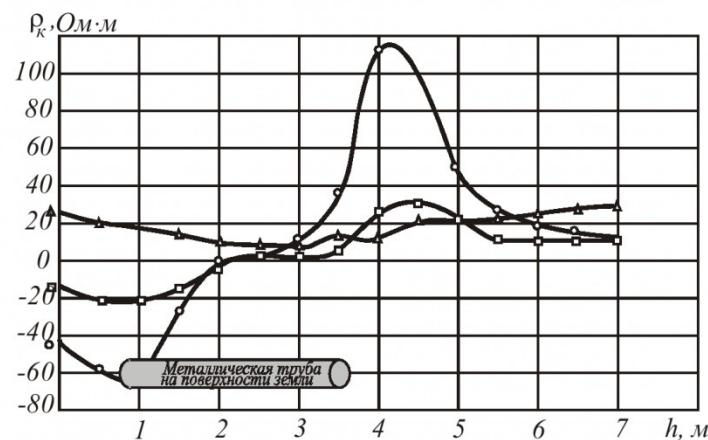


Рис. 6. Результаты эксперимента на поверхности методом каротажа сопротивлений (КС): ○ – расстояние от трубы до MN – 1 м; □ – 2,5 м; △ – 4 м

дают, что говорит о высокой воспроизводимости результатов измерений. Для более точной оценки проведен каротаж зондами А1,3М0,7Н, при этом острье сваи также отмечается началом возрастания значений  $\rho_k$ . Аналогичные результаты получены на втором опытном участке.

По результатам каротажа и анализа имеющейся информации об инженерно-геологическом строении участка массива глубина погружения свай находится в интервалах: для сваи № 1  $L = 10,5-11,5$  м (рис. 7, а); для сваи № 2  $L = 6,5-7,5$  м (рис. 7, б).

Бурение скважины и особенно поддержание ее целостности в неустойчивых глинистых грунтах в ряде случаев требует значительных затрат.

Кроме того, обеспечение электрического контакта электродов зонда со стенками скважины затруднено вследствие их неровности. Указанное заставляет отдавать предпочтение бесскважинным методам электрофизического контроля с земной поверхности.

Физические основы бесскважинного экспресс-метода заключаются в том, что ввиду высокой проводимости арматуры железобетонная свая представляет собой заземлитель, весьма близкий по параметрам к стержневому. Как показывает опыт геоэлектрических изысканий, при глубине погружения сваи  $h < 20$  м относительные вариации  $\Delta\rho_k = 20-30\%$ , т.е. массив можно считать квазиоднородным по электрическим свойствам. Геоконтроль погру-

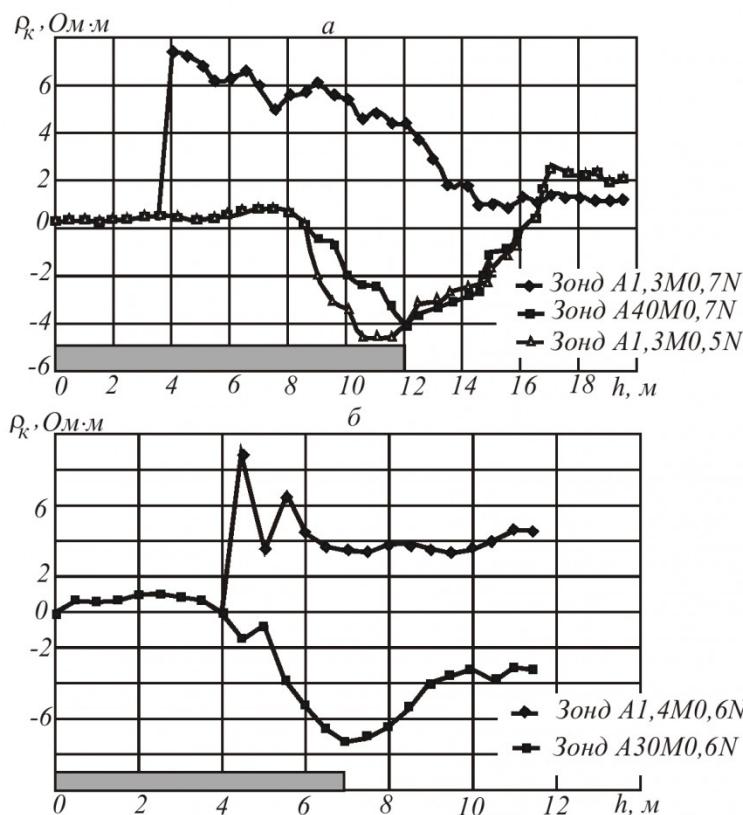


Рис. 7. Результаты определения глубины залегания сваи методом КС на периметре здания (а), на его выступающей части (б)

жения сваи может быть реализован 2-электродным методом (рис. 8).

Для стержневого заземлителя диаметром  $d$  и с глубиной погружения  $l$  электросопротивление сваи составит [2]

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4l}{d}\right) = \frac{K_3 \rho}{2\pi l}, \quad (3)$$

где  $K_3$  – коэффициент завися-

щий от формы дополнительного электрода (при  $d = 0,015$  м,  $l = 0,5$  м,  $K_3 = 4,88$ ; при  $l = 1$  м  $K_3 = 5,58$ ).

Электросопротивление сваи составит

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{D}\right) = \frac{K_c \rho}{2\pi L}, \quad (4)$$

где  $K_c$  – коэффициент, зависящий от формы сваи (при  $D = 0,3$  м и  $L = 6-8$  м  $K_c = 3,5-4,5$ ).

По первому способу сначала измеряют методом тока электросопротивление при двух стержневых заземлителях  $R_1 = 2R_3$  и определяют  $\rho = \pi \cdot l \cdot R_1 / K_3$ . Затем аналогичные измерения проводят в цепи "свая-заземлитель":

$$R_2 = R_c + R_3 = R_c + \frac{R_1}{2}.$$

Величину  $L$  определяют из уравнения (4) или по графикам на рис. 9 по соответствующему значению  $D$  или  $K_c \approx 4$  и отношению

$$R_c / \rho = \frac{1}{\rho} (R_2 - R_1 / 2).$$

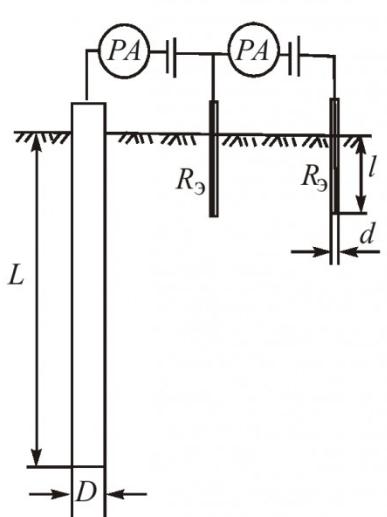


Рис. 8. Схема контроля методом тока заземлителей

По второму способу, считая, что  $K_3 \approx K_c$ , из уравнений для  $R_1$  и  $R_2$  можно получить

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{2L}{L+l},$$

откуда

$$L = l \frac{R_1}{2R_2 - R_1}. \quad (5)$$

Погрешность контроля данным методом – 8–12 %.

В случае, когда применяют составные сваи с глубиной до 16 м (при строительстве высотных зданий и сооружений), ни один из предыдущих методов не может быть уверенно применен, поскольку происходит нарушение механической и электрической связи между верхней и нижней частями сваи. В данных условиях единственным методом контроля является бесконтактный индукционный каротаж (ИК) из скважины, параллельной свае. При неустойчивых грунтах контрольную скважину обсаживают трубой из непроводящего материала (полиэтилен, пластик, асбест).

Использование метода ИК обосновано тем, что свая представляет собой железобетонную конструкцию, причем железная арматура достаточна по длине и площади сечения, чтобы оказывать влияние на измеряемый сигнал ИК. При проведении измерений методом ИК можно изучить геологическую структуру массива, и сопоставить с результатами измерений вблизи с исследуемой сваей [3].

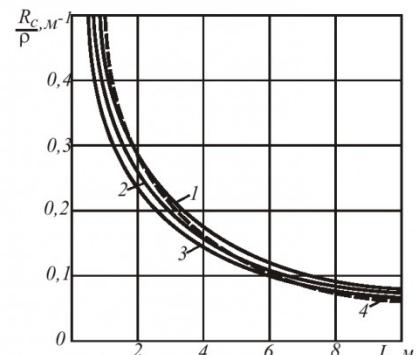


Рис. 9. Графики для определения глубины  $L$  сваи: 1 –  $D = 0,2$  м; 2 –  $D = 0,3$  м; 3 –  $D = 0,4$  м; 4 –  $K_c = 4$

Проведены полевые испытания данного метода на участке закладки фундамента здания. Были пробурены 2 контрольные скважины диаметром 250 мм глубиной 15,5 и 8,5 м вплотную к свае (в сухих суглинках скважины были доступны для измерений более месяца). Исследовалась глубина погружения сваи, состоящей из нижней типа С7-30НЦ и верхней С8-30ВЦ (СТУ67982-88).

До скважинных измерений была проведена оценка чувствительности индукционного датчика в воздухе, для чего его перемещали поступательно параллельно оси сваи в осевом и радиальном направлении. По-

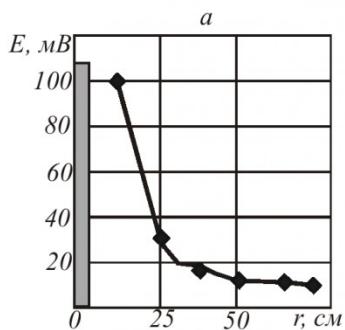


Рис. 10. Графики изменения сигнала  $E$  индукционного метода в радиальном (а) и осевом при  $r = 25$  см (б) направлениях:

$r$  – расстояние от поверхности сваи;  $x$  – расстояние от центра чувствительности датчика до торца сваи

лучены осевой и радиальный графики изменения сигнала  $E$ , представленные на рис. 10.

Из графиков следует, что влияние проводимости армату-

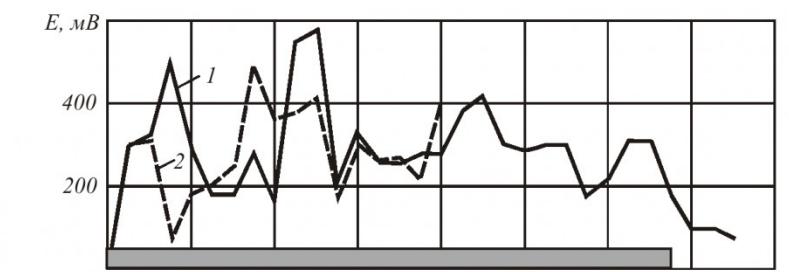
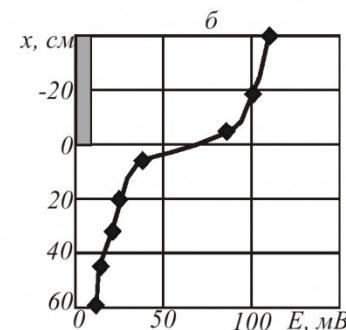


Рис. 11. Графики индукционного геоконтроля:  
1 – скважина №1; 2 – скважина №2

ры сваи приводит к увеличению сигнала датчика на величину  $\Delta E > 100$  мВ.

Затем были проведены измерения в контрольных скважинах, при этом индукционный датчик перемещали непосредственно по стенке скважины, при-



чина сигнала  $E$  изменяется в диапазоне  $E = 200–400$  мВ, что обусловлено влиянием проводимости грунтового массива. При достижении датчиком конца сваи величина  $E$  упала до 100 мВ, причем  $\Delta E > 100$  мВ соответственно осевому графику. Таким образом, уверенно зафиксирована величина  $L = 13,5$  м.

#### ВЫВОДЫ

1. Для бесскважинного экспресс-контроля глубины погружения буронабивных, буровинекционных и железобетонных свай целесообразно использовать двух- и четырехэлектродные схемы и соответствующий расчетный аппарат. Погрешность бесскважинного прогноза составляет 15–18 %.

2. При использовании скважинного каротажа, контактного и бесконтактного индукционного, погрешность контроля для одиночных и составных свай составляет  $\pm 0,5$  м.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белобородов, В. Н. Контроль длины бетонных свай в грунте методом акустического зонирования / В. Н. Белобородов, Т. Г. Глотова, А. Л. Исаков, А.К. Ткачук // ФТПРПИ. – 2002. – № 5. – С. 116–120.
- Дахнов, В. Н. Электрические и магнитные методы исследования скважин. – М.: Недра, 1981. – 344 с.
- Простов, С. М. Электромагнитный бесконтактный геоконтроль / С. М. Простов, В. В. Дырдин, В. А. Хямляйнен. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2002. – 132 с.

□Авторы статьи:

Простов  
Сергей Михайлович  
– докт.техн.наук, проф. каф.  
теоретической и геотехнической  
механики

Герасимов  
Олег Васильевич  
– заместитель директора по науке  
ОАО "НООЦЕНТР-Д"

Мальцев  
Евгений Анатольевич  
– канд.техн.наук, ст. преп. каф.  
теоретической и геотехнической  
механики