

# ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

---

---

УДК 550.8.028

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В КОМПЛЕКСНОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ОПОР РАЗЛИЧНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ШИЛИН А. А., КИРИЛЕНКО А. М., КАПУСТИН В. В., ЗНАЙЧЕНКО П. А.

*В статье рассмотрен опыт применения комплексных скважинных геофизических исследований для определения типа и состояния фундаментов под опорами моста. Работы проводились в рамках диагностического обследования конструкций моста «Царицынская плотина» историко-культурного музея «Царицыно» (Москва). Использование в исследованиях скважинных приборов позволило с достаточной степенью достоверности определить тип и глубину заложения фундаментов под опорами моста. Комплексное использование георадара и скважинных акустических методов (потенциальный и дифференциальный каротаж, межскважинное прозвучивание) позволило составить план ремонтно-восстановительных мероприятий.*

*Ключевые слова:* георадиолокационный метод; гидроволны; комплексные исследования; объемные волны; сейсмоакустический метод.

Один из самых крупных проектов воссоздания исторических и архитектурных памятников последнего времени – масштабная реконструкция дворцово-паркового ансамбля «Царицыно», расположенного на юге Москвы, в результате которой восстановлены многочисленные архитектурные объекты.

Предположительное время сооружения моста «Царицынская плотина» – конец XVIII–начало XIX века. На момент обследования конструкции моста находились в предаварийном состоянии. Диагностика потребовала применения разных методов неразрушающего контроля.

Работы по диагностике строения и состояния фундаментов и основания моста потребовали проведения геофизических изысканий с бурением скважин и применением скважинных исследований. Комплексные геофизические наблюдения в скважинах проводились двумя методами: сейсмоакустическим и георадиолокационным.

Скважинная сейсмоакустика выполнялась в водонаполненных скважинах, пробуренных вблизи мостовых опор. Для работ использованы одноканальная сейсмоакустическая аппаратура GEONT 13 и электроискровой источник колебаний типа Sparker. Наблюдения проводились по следующим методикам:

– измерения при фиксированном положении источника на забое и непрерывном перемещении приемника вдоль скважины (потенциальный каротаж);

---

**Шилин Андрей Александрович** – доктор технических наук, профессор, генеральный директор. 123308, г. Москва, просп. Маршала Жукова, 6/2, ЗАО «Триада-Холдинг».

**Кириленко Алексей Михайлович** – кандидат технических наук, руководитель департамента. 123308, г. Москва, просп. Маршала Жукова, 6/2, ЗАО «Триада-Холдинг».

**Капустин Владимир Викторович** – кандидат физико-математических наук, технический директор. 111024, г. Москва, 2-я ул. Энтузиастов, 5, строение 39, ГК «Логис-Геотех».

**Знайченко Павел Александрович** – начальник отдела. 123308, г. Москва, просп. Маршала Жукова, 6/2, ЗАО «Триада-Холдинг». E-mail: znajchenko@triadaholding.ru

– измерения при фиксированном положении *источник–приемник* (на расстоянии 1 м) и перемещении всей установки вдоль скважины (дифференциальный каротаж);

– межскважинное акустическое прозвучивание при параллельном перемещении источника и приемника.

Возбуждение акустических колебаний производится электрическим разрядом, подаваемым от блока возбуждения на электроды, находящиеся в водонаполненной скважине. При этом генерируются упругие волны двух типов – объемные и гидроволны. На скорость распространения объемных волн оказывает влияние прочность окружающих скважину грунтов. Гидроволны являются волнами поверхностного типа, распространяющимися вдоль ствола скважины, поэтому их скорость в большей степени определяется сдвиговой характеристикой околоскважинного пространства. Как известно из теории упругости [1], для линейно-упругих сред (волн малой амплитуды) скорость распространения продольных и поперечных волн связана с упругими константами следующим образом:

$$v_p = \sqrt{E(1-\nu) \frac{1}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}; \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

где  $E$  – модуль Юнга, Па;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – модуль сдвига, Па.

Отношение поперечных и продольных волн в однородной изотропной среде зависит только от коэффициента Пуассона:

$$\frac{v_s}{v_p} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}}$$

Скорость распространения гидроволны в основном определяется динамическим модулем сдвига:

$$v_g = C_0 \left( 1 + \frac{\rho_0 C_0^2}{\mu} \right)^{-1/2},$$

где  $\rho_0$  – плотность раствора в скважине, кг/м<sup>3</sup>;  $C_0$  – скорость звука в жидкости, м/с.

Скорость поперечной волны может быть определена по значению скорости гидроволны из следующего соотношения:

$$v_s = C_0 v_g \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho(C_0^2 - v_g^2)}}$$

Следовательно, при определении значений скоростей продольных, поперечных волн и гидроволн и при известном значении плотности могут быть получены основные динамические константы  $E$ ,  $\mu$  и  $\nu$ .

При проведении сейсмоакустических наблюдений по методике потенциально-го каротажа вблизи вертикального контакта (мостовой опоры) при соотношении скоростей  $v_{\text{опоры}} > v_{\text{среды}}$  в первых вступлениях регистрируемого волнового поля наблюдается преломленная волна, скользящая вдоль границы мостовой опоры (рис. 1, *a*), в последующих вступлениях регистрируются прямая объемная волна

и гидроволна, распространяющиеся во вмещающей среде. При проведении наблюдений по методике дифференциального каротажа при соблюдении условия  $d < x_0$  (где  $d$  – расстояние источник–приемник;  $x_0$  – координата появления головной волны, определяемая из условия критического угла падения волны) в первых вступлениях наблюдается объемная волна, распространяющаяся во вмещающей

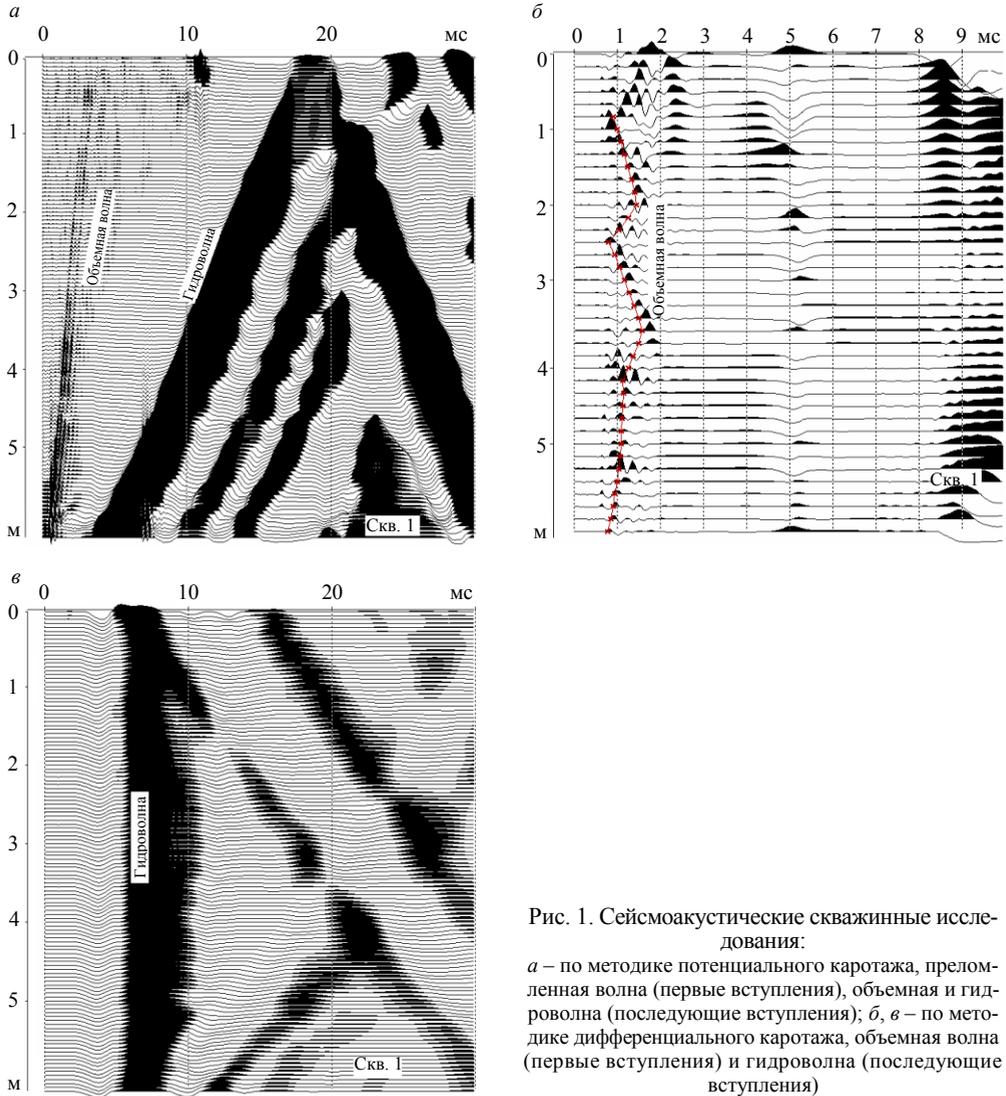


Рис. 1. Сейсмоакустические скважинные исследования:  
 а – по методике потенциального каротажа, преломленная волна (первые вступления), объемная и гидроволна (последующие вступления); б, в – по методике дифференциального каротажа, объемная волна (первые вступления) и гидроволна (последующие вступления)

среде (рис. 1, б), в последующих вступлениях – гидроволна, также распространяющаяся во вмещающей среде (рис. 1, в). Особенностью динамики возбуждаемых электроискровым источником волн является сильное различие в амплитудах объемных волн и гидроволн. Гидроволны – высокоамплитудные и низкочастотные, объемные волны – низкоамплитудные и высокочастотные. В связи с этим для регистрации волнового поля требуется измерительная аппаратура с большим динамическим диапазоном, а для корреляции волн требуется применение таких методов обработки, как пространственная фильтрация и вейвлет-анализ.

В результате обработки данных наблюдений определены скорости распространения продольных волн в береговых опорах в интервале от уровня лотка бетонного водосброса (нулевой уровень) до конца подземной части опоры. Значе-

ния предела прочности на сжатие материала опор рассчитаны по полученным скоростям на основании обобщенного уравнения регрессии [2] с коэффициентом корреляции 0,89 (рис. 2):

$$\lg R_{\text{сж}} = 0,255 v_p + 1,708.$$

Для бетона лотка водосброса получены значения скоростей продольных волн 3300–3400 м/с, что соответствует прочности бетона около 18 МПа.

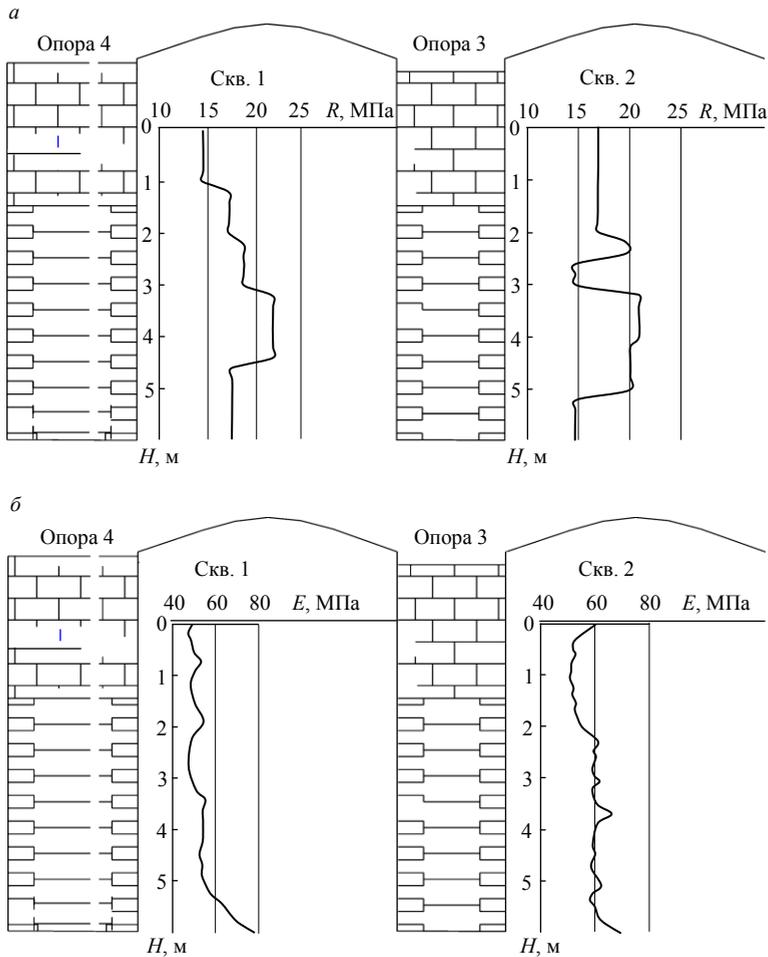


Рис. 2. Распределение предела прочности при сжатии  $R$  по глубине опор –  $a$  и модуля деформации  $E$  вмещающих грунтов по глубине –  $b$

На основании полученных в результате скважинных наблюдений и межскважинного прозвучивания скоростей продольных волн и гидроволн во вмещающей среде рассчитаны основные упругие характеристики геологической среды: модуль сдвига; коэффициент Пуассона; модуль деформации (рис. 2). Для расчета модуля деформации использовалась универсальная зависимость:

$$E_d = 0,099 v_p + 2,34 v_s - 332.$$

Георадиолокационный метод основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромаг-

нитных волн в геологическую среду и приеме сигналов, отраженных от границ раздела геологических слоев, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела могут быть, например, контакт сухих и влагонасыщенных грунтов – уровень грунтовых вод, контакт пород разного литологического состава, породы и материала искусственного происхождения, мерзлых и талых грунтов, коренных и осадочных пород и т. д. [3].

С целью определения глубины подземной части мостовых опор и выяснения электрофизических свойств вмещающих грунтов в скважинах проведены георадиолокационные исследования. Для наблюдения использовался скважинный вариант георадара «ОКО» с направленной приемно-излучающей антенной системой с центральной частотой 700 МГц. Измерения проводились по двум методикам: непрерывное георадиолокационное профилирование вдоль оси скважины с различной ориентацией антенного блока; круговое сканирование на фиксированной глубине.

В скважинах выполнялось профилирование вдоль продольной оси с ориентацией антенны по направлению к мостовой опоре. При ориентации антенны в направлении к опоре на записи прослеживается граница контакта подземной части опоры с вмещающим грунтом. При проведении георадиолокационных наблюдений зафиксирована отражающая граница, соответствующая контакту *фундамент–грунт*.

Таким образом, в результате геофизических исследований основания сооружения и фундаментной части опор моста определено их состояние, получены приблизительные значения предела прочности при сжатии материала опор по всей глубине; определена величина их заглубления; косвенно подтверждено наличие укрепляющих конструкций в грунтовом массиве между опорами (с высокой степенью вероятности, деревянных свай); при сопоставлении акустических и георадиолокационных исследований сделан вывод о том, что непосредственно под опорами моста сваи отсутствуют.

Полученные в результате диагностики данные использованы при реконструкции сооружения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
2. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / под ред. Н. Н. Горяинова. М.: ВСЕГИНГЕО, 1992. 264 с.
3. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Георадиолокационные исследования верхней части разреза. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1999. 91 с.

Поступила в редакцию 8 июля 2015 г.

#### GEOPHYSICAL METHODS IN COMPLEX SOLUTION OF DIAGNOSTIC PROBLEMS OF VARIOUS CONSTRUCTIONS UNDERGROUND PART OF SUPPORTS CONDITION

Shilin A. A., Kirilenko A. M. – Triada-Holding, Moscow, the Russian Federation.

Kapustin V. V. – Logis-Geotekh, Moscow, the Russian Federation.

Znaichenko P. A. – Triada-Holding, Moscow, the Russian Federation. E-mail: znaichenko@triadaholding.ru

The article examines the experience of complex well geophysical investigations application to determine the type and condition of foundations under a bridge supports. Works is fulfilled within diagnostic inspection of "Tsaritsynskaia plotina" bridge construction in historical and cultural museum "Tsaritsyno" (Moscow). The application of well devices allows, with a sufficient degree of reliability, determine the type and depth of laying the foundation under the bridge supports. Complex application of georadar and well acoustic methods (potential and differential logging; crosswell acoustic measurements) allows making up the plan of maintenance and repair actions.

**Key words:** georadar method; hydro waves; complex investigations; body waves; seismic-acoustic method.

## REFERENCES

1. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaia fizika. Teoriia uprugosti* [Theoretical physics. Elasticity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 248 p.
  2. *Primenenie seismoakusticheskikh metodov v gidrogeologii i inzhenernoi geologii. Pod red. N. N. Goriainova* [The application of seismic-acoustic methods in hydrogeology and engineering geology. Edited by N. N. Goriainov]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1992. 264 p.
  3. Vladov M. L., Starovoitov A. V. *Georadiolokatsionnye issledovaniia verkhnei chasti razreza* [Georadar investigations of the upper part of an open pit]. Moscow, Izd-vo Moskov. un-ta Publ., 1999. 91 p.
-