

## Влияние плотностных свойств глинистых грунтов на скорости распространения упругих волн

*Пиоро Екатерина Владимировна\**, *Тырина Татьяна Сергеевна*  
МГУ имени М.В.Ломоносова, [piorok@yandex.ru](mailto:piorok@yandex.ru), [tyrinats@gmail.com](mailto:tyrinats@gmail.com)  
\*ООО «Петромоделлинг ЛАБ»

### Influence of density properties of clay soil on speeds distributions of elastic waves

**Ekaterina Pioro, Tyrina Tatiana**

#### Аннотация

Изучением влияния плотностных свойств на скорости распространения в них упругих волн занимаются довольно давно, однако преимущественно для образцов скальных грунтов. В данной работе предпринята попытка изучения влияния плотностных свойств глинистых грунтов, в том числе модельных, на скорости распространения в них упругих волн.

#### Annotation

In studying of influence of density properties for speed of distribution to them elastic waves are engaged for a long time, however mainly for samples of rocky soil. In this work attempt of studying of influence of density properties of clay soil, including modeling, for speed of distribution to them elastic waves is undertaken.

**Ключевые слова:** глинистые грунты, плотность, плотность скелета, пористость, скорость продольных волн, скорость поперечных волн

Плотностные характеристики грунта – одни из основных в инженерной геологии, они закладываются в основу практически всех расчетов. Определение плотности грунтов в естественном сложении производится в образцах прямыми методами, однако, в ряде случаев (песчаные грунты, слабые глинистые грунты) весьма перспективны для этих целей сейсмические методы, поскольку они позволяют определять свойства грунта дистанционно, в массиве, не нарушая его сложение.

В качестве объектов исследования на первом этапе изучения были взяты модельные грунты. Они формовались из перемолотого моренного суглинка ( $gQ_{ids}$ ), отобранного на территории г. Москвы, с добавлением среднеспесчаной фракции флювиогляциального песка в количестве 0, 10, 25, 35 % по массе. Таким образом, были получены четыре различных по дисперсности модельных грунта (M1, M2, M3, M4 соответственно), которые соответствовали суглинкам легким пылеватым (M1 и M2), супесям пылеватым (M3) и супесям песчанистым (M4) (по ГОСТ 25100-95). Грунты формовались при различной влажности и нагрузке уплотнения.

На втором этапе исследования проводились на природных глинистых грунтах - суглинках донской морены ( $gQ_{ids}$ ) и юрских глинах ( $J_{3ox}$ ) ненарушенного сложения, из которых режущим цилиндром были вырезаны образцы высотой около 70 мм, и диаметром 38 мм.

На всех образцах производилось измерение скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн по методике прямого просвечивания на переменной базе: излучатель и приемник располагались на противоположных гранях образца на одной оси, при этом образец несколько раз укорачивался. Это позволяло построить годограф – зависимость времени прихода волны от пройденного расстояния, по наклону которого и рассчитать скорость поперечных волн. Такой метод существенно повышает точность расчета скорости  $V_s$ , так как

по единичному измерению не всегда удается выделить вступление S-волны в интерференционной картине.

Диапазоны изменения основных изучаемых параметров физических свойств образцов глинистых грунтов приведены в таблице.

Таблица. Диапазоны изменения показателей физических свойств грунтов

Образцы	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Влажность $\omega$ , %	Пористость $n$ , %	Коэффициент пористости $e$ , отн.ед.
Модельные	1,54-2,30	1,42-2,13	4-15	20-47	0,25-0,88
Природные gQ <sub>1</sub> dns	2,02-2,25	2,69-2,85	11-14	29-37	0,42-0,58
Природные J <sub>30x</sub>	1,66-1,83	1,28-1,41	24-39	50-57	0,98-1,33

Скорости продольных волн  $V_p$  у модельных грунтов менялись от 450 до 1960 м/с, у природных от 1350 до 2000 м/с, скорости поперечных волн  $V_s$  у модельных грунтов от 160 до 580 м/с, у природных от 130 до 700 м/с.

По результатам исследований модельных глинистых грунтов получен график взаимосвязи скоростей продольных волн и плотности (рис. 1а). Для модели М1 (суглинки легкие пылеватые) получено линейное уравнение связи  $V_p=2120\rho-3036$ , с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0,82$  и степенное уравнение связи  $V_p=71,2\rho^{3,91}$  с  $R^2=0,83$ . Для модели М2 (суглинки легкие пылеватые) линейное уравнение связи имеет вид  $V_p=2550\rho-3820$  величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,70$ , степенное уравнение  $V_p=86,4\rho^{3,83}$  с  $R^2=0,67$ . Известно, что с повышением плотности грунта увеличивается количество и прочность контактов, а значит и скорости продольных волн повышаются. При этом вид уравнения связи зависит от типа грунта. Для модельных образцов тип грунта определяется преимущественно дисперсностью (разным количеством песчаных, пылеватых и глинистых частиц) и характером структурных связей, контактов между частицами. Следует отметить, что в модельных грунтах присутствуют коагуляционные и точечные контакты, соотношение между которыми зависит от влажности.

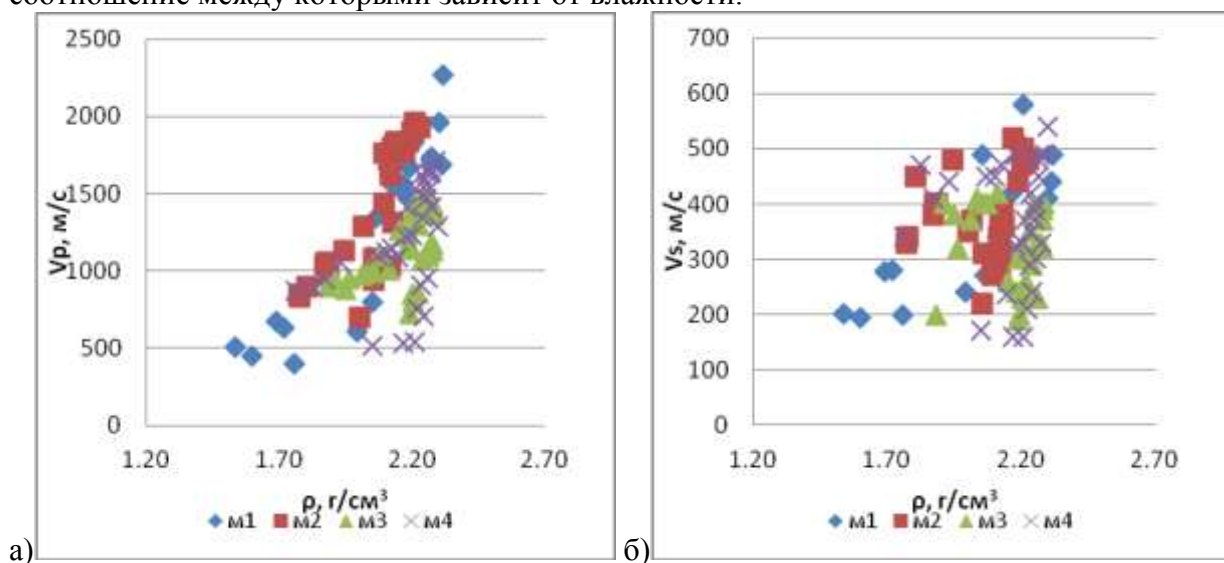
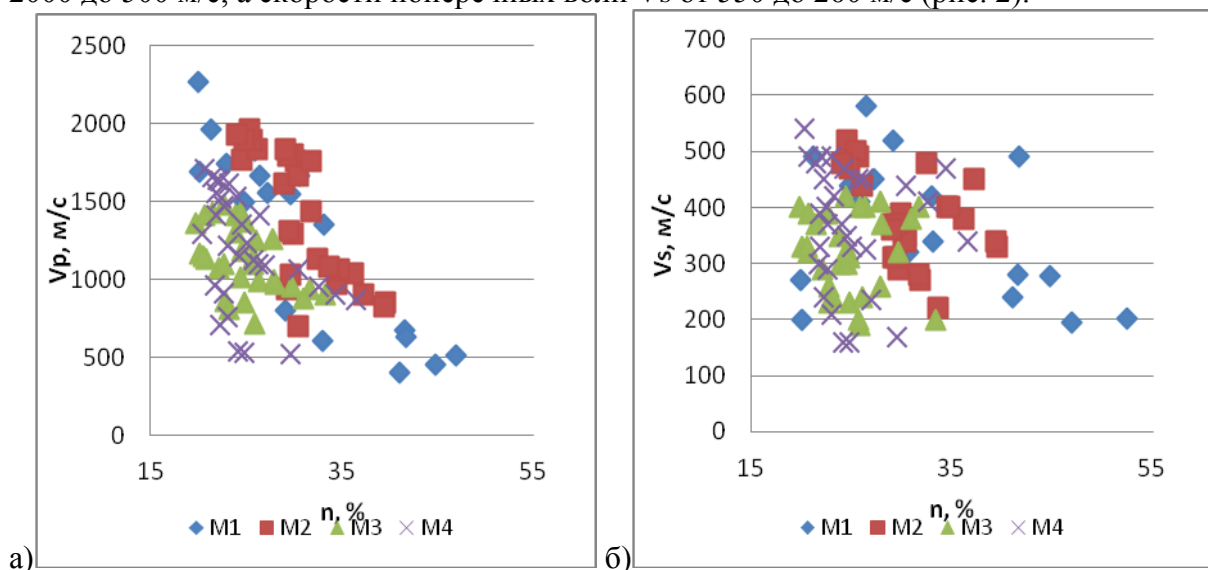


Рис. 1. Взаимосвязи скоростей: а) продольных волн  $V_p$ ; б) поперечных волн  $V_s$  и плотности модельных глинистых грунтов М1-М4

Скорости поперечных волн  $V_s$  также увеличиваются с ростом плотности грунта (рис. 1б). Повышение скоростей  $V_s$  связано с увеличением количества, площади и прочности контактов, что приводит к росту сдвиговых характеристик.

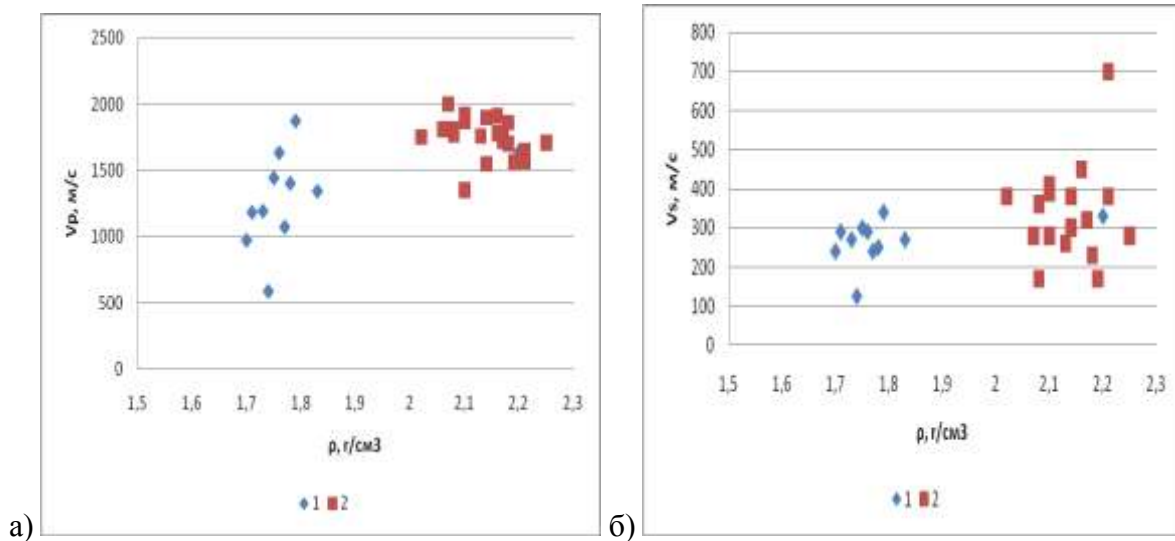
Графики изменения скоростей в зависимости от плотности скелета грунта аналогичны графикам изменению плотности. Из этого можно сделать вывод о том, что влажность модельных грунтов в исследованном диапазоне оказывает относительно малое влияние на распространение в них упругих волн по сравнению с факторами, определяющими характер сложения (плотность скелета, пористость).

С увеличением пористости модельных грунтов от 20 до 45 % (и ростом коэффициента пористости от 0,25 до 0,88 соответственно) скорости продольных волн  $V_p$  снижаются от 2000 до 500 м/с, а скорости поперечных волн  $V_s$  от 550 до 200 м/с (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменение скоростей: а) продольных волн  $V_p$ ; б) поперечных волн  $V_s$  при изменении пористости

Для природных грунтов общий характер зависимостей  $V_p(\rho, \rho_d)$ ,  $V_s(\rho, \rho_d)$  сохраняется: скорости продольных и поперечных волн увеличиваются с ростом плотности (рис. 3) и плотности скелета грунтов. Приведенный рисунок показывает, что разные типы природных глинистых грунтов формируют в координатном поле разные совокупности точек. Вариации скоростей упругих волн для юрских глинистых грунтов оксфордского яруса при небольшом интервале плотностей зависят от доли прочных цементационных контактов между структурными элементами. В четвертичных моренных суглинках, имеющих матричную микроструктуру (песчаные и пылеватые зерна в высокодисперсной глинистой матрице), плотность и плотность скелета в меньшей степени влияют на скорости продольных волн (волн растяжения-сжатия), в большей – поперечных (волн сдвига) (см. рис. 3), что подтверждает ведущую роль характера строения этих грунтов, при однотипных связях и контактах между частицами.



**Рис. 3.** Соотношения скоростей: а) продольных  $V_p$ ; б) поперечных волн  $V_s$  и плотности грунтов природного сложения: 1- глины ( $J_{30x}$ ); 2 - суглинки ( $gQ_{1dns}$ )

С ростом пористости и коэффициента пористости природных грунтов также происходит закономерное снижение скоростей продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн.

### Выводы

По результатам анализа полученных данных можно сделать следующие выводы.

1. Зависимости скоростей упругих волн от плотностных свойств модельных и природных глинистых грунтов имеют схожий характер и наглядно показывают роль природного сложения и структурных связей в формировании сейсмических свойств.
2. Скорости продольных и поперечных волн возрастают с ростом плотности и плотности скелета грунта и убывают с ростом пористости и коэффициента пористости.
3. Изменение скоростей продольных волн с ростом плотности модельного грунта можно аппроксимировать линейной или степенной функцией, однако, уравнения связи зависят от типа грунтов (состава, дисперсности, прочности структурных связей и контактов между частицами).

**Итоговая версия опубликована:** Труды XXIII молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти члена-корреспондента АН СССР К.О.Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и экологии». Петрозаводск, 2012. С. 109-111.