

УДК 624.131.43, 550.8.056

Е.А. Шумкин<sup>1</sup>

## ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ КОНСИСТЕНЦИИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ВОЛН

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1*

*Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Оценка водно-физических характеристик грунтов по косвенным геофизическим показателям проще и дает возможность характеризовать различные объемы изучаемой среды. Приводятся результаты определения кинематических параметров упругих волн в глинистых грунтах при разных значениях показателя текучести. При переходе от грунтов твердой консистенции к грунтам с полутвердой и тугопластичной консистенцией наблюдается корреляция между отношением значений скорости поперечных и продольных волн и значениями показателя консистенции глинистых грунтов.

**Ключевые слова:** глинистые грунты, показатель текучести, консистенция грунтов, скорость упругих волн, прогноз свойств.

Assessment of the water-physical characteristics of soils by indirect geophysical indicators is simpler. Indirect indicators provide an opportunity to characterize various volumes of the researched environment. The article presents the results of determining the kinematic parameters of elastic waves of clay soils at different values of the liquidity index. In the transition from soils of very stiff consistency to soils with stiff and firm-stiff consistency, a correlation is observed between the ratio of the secondary, primary wave velocities, and the values of the liquidity index of clay soils.

**Key words:** clay soils, liquidity index, consistency of soil, acoustic properties, elastic wave velocity, prediction of properties.

**Введение.** Кинематические параметры упругих волн, обусловленные характером распространения волн в глинистых грунтах, тесно связаны с вещественным составом, структурными особенностями среды, термодинамическим состоянием. Изучение этих параметров необходимо для выявления корреляционных взаимосвязей с показателями прочностных и деформационных (в первую очередь упругих) характеристик глинистых грунтов для их косвенной оценки.

Экспериментальные исследования по изучению взаимосвязей скорости упругих волн и консистенции глинистых грунтов немногочисленны. В зависимости от количества влаги и ее видов в грунте существуют пороговые значения влажности, при переходе через которые сейсмические свойства меняются [Пиоро, 2014]. «Взаимосвязь сейсмических характеристик и инженерно-геологических показателей свойств грунтов обуславливает возможность косвенного определения последних по значениям сейсмических и ультразвуковых характеристик» [Никитин, 1981, с. 5].

В связи с этим целью работы было изучение кинематических параметров упругих волн в глинистых грунтах и выявление зависимости между ними и показателем текучести (консистенции) по результатам лабораторного инженерно-геологического исследования и ультразвукового пропрессирования.

К кинематическим характеристикам относят время прихода упругих волн разных типов (продольных, поперечных, поверхностных) и определяемую по его значениям скорость распространения волн.

Консистенция глинистых грунтов характеризует способность сохранять свою форму без или при наличии внешнего механического воздействия. Для количественной характеристики консистенции грунтов, в основном определяемой их влажностным состоянием, используют показатель текучести ( $I_L$ ), рассчитываемый по формуле

$$I_L = \frac{W_e - W_p}{W_L - W_p} = \frac{W_e - W_p}{I_p},$$

где  $W_e$  — естественная влажность грунта,  $W_p$  — влажность нижнего предела пластичности,  $W_L$  — влажность верхнего предела пластичности,  $I_p$  — число пластичности.

Инженерно-геологические методы определения влажностного состояния характеризуются высокой точностью, но получаемые результаты применимы лишь к ограниченным объемам — образцам грунтов и методы отличаются сложностью, работы — длительностью производства, а также нарушением естественного состояния среды [Огильви, 1990]. Сейсмоакустические методы позволяют изучать породы в условиях их естественного залегания. Ультразвуковой и сейсмический методы

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, аспирант; e-mail: E.A.Shumkin@gmail.com

дают возможность охарактеризовать породу как в образце или малом объеме, так и в большом естественном массиве, оценить проявление масштабного эффекта [Никитин, 1981; Горяйнов, 1992].

**Материалы и методы исследования.** В качестве объектов исследования кинематических параметров упругих волн глинистых грунтов были использованы образцы древнечерноморских ( $mQ_{IV}dch$ ) мягкопластичных суглинков морского генезиса, отобранные на территории о. Тузла в Керченском проливе; образцы моренных суглинков донского горизонта ( $gQ_Idns$ ) с территории Тамбовской области; образцы юрской глины оксфордского яруса ( $J_3ox$ ) с территории Москвы и Московской области; образцы пестроцветной глины гжельского яруса ( $C_3g$ ), отобранные на территории Ногинского района Московской области.

Всего для исследований отобрано 39 монолитов глинистых грунтов естественной влажности и природного сложения, разного возраста, генезиса, состава, строения, состояния и степени литификации, что в свою очередь определяет многообразие влажностного состояния глинистых грунтов.

**Методика исследований.** Из монолитов грунтов с помощью режущих колец высотой 7,6 см и диаметром 3,8 см были изготовлены цилиндрические образцы. Измерения скорости на этих образцах выполняли сразу после их изготовления и с контролем влажности после проведения измерений. Часть образцов из монолитов использована для дальнейших испытаний на одноосное сжатие, причем с контролем изменения их массы, высоты,

диаметра и влажности, другая часть образцов использована для измерения параметров поглощения упругих волн в грунтах путем уменьшения базы (высоты) образца.

Помимо определения кинематических показателей упругих волн, прочностных и деформационных свойств грунтов, исследованы характеристики их состава, строения и состояния.

Для изучения влияния показателя текучести (консистенции) на скорость упругих волн были изготовлены и отобраны образцы с природной влажностью ( $W_e > 25\%$ ). Каждые сутки по мере их дегидратации (в экскаторе с  $CaCl_2$  для медленного обезвоживания) проводились измерения массы, диаметра, высоты образцов, после чего выполняли контрольные измерения показателей скорости упругих волн и отбор пробы на влажность с последующим расчетом показателя текучести.

Для маловлажных и сильноопоглощающих грунтов, после определения скорости упругих волн, проводилось водонасыщение. Образцы грунта помещали во влажную ткань и герметично упаковывали с помощью полиэтиленовой пленки, затем устанавливали в экскатор с водой для дальнейшего водонасыщения. По истечении 14 сут (для уверенного достижения влажностного равновесия) измеряли характеристики упругих волн с последующим отбором пробы на влажность.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты измерений и расчетов значений скорости продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн, а также их отношения ( $V_s/V_p$ ) приведены в таблице.

#### Результаты определения кинематических параметров упругих волн\*

Название грунта по ГОСТ 25100-2011	Геологический индекс	Скорость продольных волн, $V_p$ , м/с	Скорость поперечных волн, $V_s$ , м/с	Отношение значений скорости, $V_s/V_p$	Показатель текучести $I_L$ , ед.
Естественные сложение и состояние					
Тяжелый суглинок, легкая глина	$mQ_{IV}dch$	1072–1848	54–205	0,04–0,13	0,56–1,22
		1393 (17)	114 (17)	0,08 (17)	0,81 (17)
Тяжелый суглинок, легкая глина	$gQ_I dns$	800–1704	157–460	0,09–0,47	−0,10–0,40
		1464 (21)	261 (21)	0,2 (21)	0,11 (21)
Тяжелый суглинок, легкая глина, тяжелая глина	$J_3ox$	750–1917	148–721	0,12–0,67	−0,58–0,35
		1471 (38)	441 (37)	0,31 (37)	−0,06 (37)
Тяжелый суглинок, легкая глина	$C_3g$	1549–2151	195–978	0,12–0,49	−0,79–0,13
		1697 (14)	359 (14)	0,2 (14)	−0,34 (14)
После опытов по водонасыщению и дегидратации					
Тяжелый суглинок, легкая глина	$mQ_{IV}dch$	1498–1861	188–872	0,11–0,53	−0,08–0,85
		1625 (28)	525 (28)	0,32 (28)	0,37 (17)
Тяжелый суглинок, легкая глина	$gQ_I dns$	1488–1909	188–709	0,12–0,44	−0,54–0,24
		1651 (19)	393 (19)	0,24 (19)	−0,06 (19)
Тяжелый суглинок, легкая глина, тяжелая глина	$J_3ox$	1123–1793	210–878	0,13–0,68	−0,69–0,32
		1480 (130)	549 (130)	0,39 (130)	−0,19 (130)

\* Над чертой — диапазон изменения анализируемых параметров, под чертой — среднее значение кинематических параметров, в скобках — число определений.

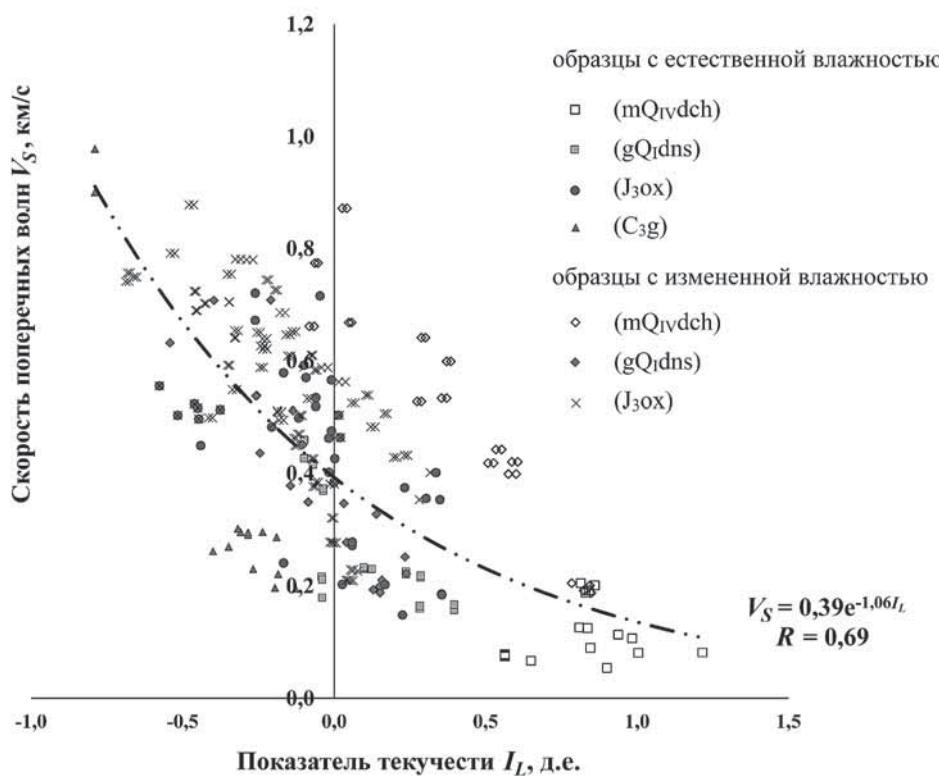


Рис. 1. Соотношение скорости поперечных волн ( $V_s$ ) с показателем текучести ( $I_L$ ) глинистых грунтов

меняются при изменении влажностного состояния грунтов.

Согласно [Горяйнов, Ляховицкий, 1979], немногочисленные данные показывают в целом уменьшение скорости поперечных

Для всех исследуемых грунтов скорость продольных волн изменяется в широком диапазоне — от 750 до 2100 м/с, скорость поперечных волн находится в диапазоне 50–900 м/с, причем минимальные изменения скорости  $V_s$  наблюдаются у древнечерноморских суглинков, глин. Отношение значений скорости упругих волн  $V_s/V_p$  варьирует от 0,04 до 0,67. Эти данные наглядно свидетельствуют о весьма широком диапазоне изменчивости кинематических параметров упругих волн глинистых грунтов в природном сложении и состоянии. Все записи волновых картин измерений, выполненных на образцах, сохранены и будут использоваться при изучении динамических параметров упругих волн.

Для оценки влияния влажностного состояния на сейсмические свойства грунтов использовался показатель текучести  $I_L$ , который меняется в ходе опытов по дегидратации и водонасыщению, что влияет на характер распространения упругих волн в грунтах.

По результатам исследований построены графики взаимосвязи сейсмических свойств грунтов и их показателя текучести, получены уравнения взаимосвязи и рассчитаны значения коэффициента корреляции.

Продольные волны распространяются в жидких, твердых и газообразных средах, поэтому связь между влажностными показателями и скоростью продольных волн ( $V_p$ ) для большинства грунтов слабая и неоднозначная. Выявляемые связи имеют как прямой, так и обратный характер, из чего следует, что скорость продольных волн зависит от множества разнообразных показателей состава, строения, свойств грунтов, которые также

влияют на сейсмические свойства грунтов. Важно отметить, что для глинистых грунтов, имеющих различные генетические особенности, характеризующиеся различными физическими свойствами, установлены различные зависимости скорости поперечных волн от влажности.

В результате изучения влияния консистенции глинистых грунтов на кинематические параметры упругих волн для современных древнечерноморских суглинков ( $mQ_{IV}dch$ ), глинистых грунтов донской морены ( $gQ_I dns$ ) и позднекаменноугольных грунтов ( $C_3g$ ) установлены весьма тесные связи между показателями текучести грунтов и скоростью поперечных волн ( $V_s$ ) (рис. 1) с значениями коэффициента корреляции, составляющими  $r = -0,94$ ;  $r = -0,90$ ;  $r = -0,95$  соответственно, и уравнениями связи  $V_s = -0,61I_L + 0,75$ ;  $V_s = -0,69I_L + 0,35$ ;  $V_s = -1,16I_L - 0,03$  соответственно, эти связи имеют обратный характер. При изменении консистенции грунтов от твердых к мягкотекущим и текучепластичным разностям происходит снижение скорости поперечных упругих волн.

Если рассматривать взаимосвязи между показателями консистенции глинистых грунтов и отношением скорости упругих волн  $V_s/V_p$  (рис. 2), то можно проследить схожие тенденции изменения этих параметров, как и для скорости поперечных волн. Так, наблюдается весьма тесная связь для современных морских суглинков ( $mQ_{IV}dch$ ), суглинков донской морены ( $gQ_I dns$ ) и позднекаменноугольных глин ( $C_3g$ ), близкая к тесной, а также слабая связь для юрских глин оксфордского яруса ( $J_3ox$ ) с значениями ко-

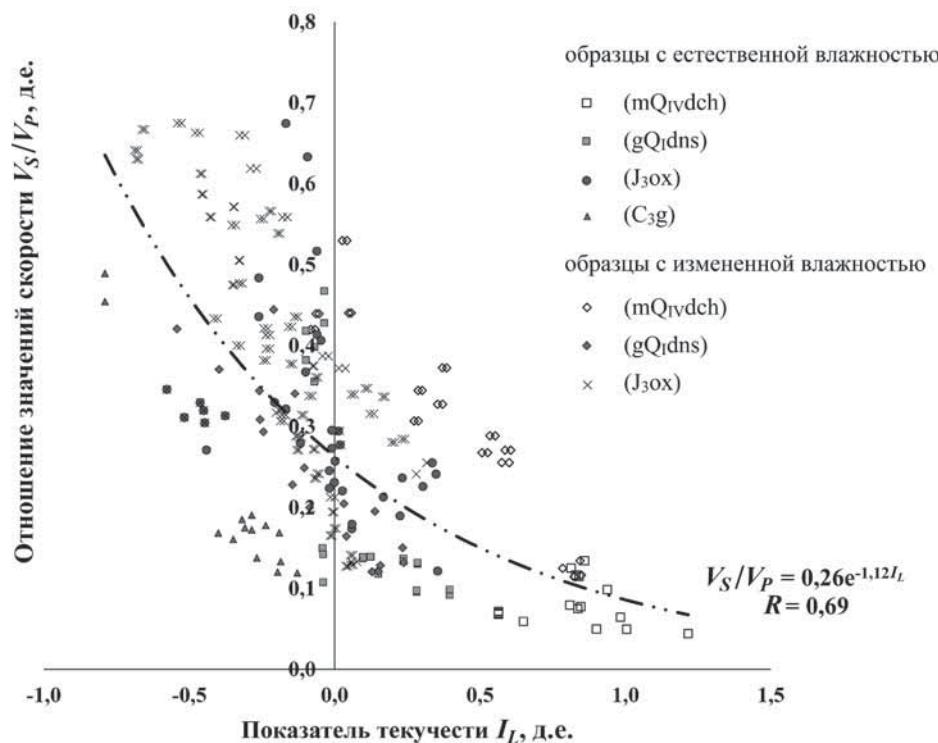


Рис. 2. Соотношение показателя отношения значений скорости поперечных волн к продольным ( $V_s/V_p$ ) глинистых грунтов с показателем текучести ( $I_L$ ) глинистых грунтов

эффективного коэффициента корреляции  $r = -0,93$ ;  $r = -0,90$ ;  $r = -0,96$ ;  $r = -0,64$  и уравнениями связи  $V_s/V_p = -0,36I_L + 0,45$ ;  $V_s/V_p = -0,43I_L + 0,21$ ;  $V_s/V_p = -0,54I_L - 0,02$ ;  $V_s/V_p = -0,44I_L + 0,30$  соответственно, эти связи носят обратный характер.

При переходе от грунтов с твердой консистенцией ( $I_L < 0$ ) к грунтам с полутвердой ( $0 < I_L < 0,25$ ), тугопластичной ( $0,25 < I_L < 0,50$ ), мягкопластичной ( $0,50 < I_L < 0,75$ ), текучепластичной ( $0,75 < I_L < 1,00$ ) консистенцией уменьшается угол наклона аппроксимирующих линий для различных типов глинистых грунтов. Если оценивать всю выборку глинистых грунтов, то можно предложить близкие к тесной взаимосвязи экспоненциального вида (рис. 1, 2). Эти взаимосвязи могут описываться сложной степенной функцией между показателем текучести ( $I_L$ ) и кинематическими параметрами упругих волн. Построенные аппроксимирующие кривые иллюстрируют общий взгляд на взаимосвязь значений скорости и консистенции различных видов глинистых грунтов, но уже можно установить, что могут быть построены частные и более тесные взаимосвязи для конкретного водно-

физического параметра при неизменных других свойствах. Для оценки влияния какого-либо определенного показателя состава, строения, состояния и свойств необходимо проведение эксперимента с неизменными значениями других показателей, что можно реализовать на модельных глинистых грунтах.

**Заключение.** В результате исследований на природных глинистых грунтах можно сделать вывод о том, что изменение показателя текучести (консистенции) весьма сложным образом влияет на скорость распространения упругих волн, вызывая суммирование различно действующих факторов (строительство, влажность, плотность и др.). Получен ряд взаимосвязей показателя текучести глинистых грунтов и кинематических параметров упругих волн.

Целесообразно в дальнейшем проведение исследований изучения динамических параметров упругих волн и показателей влажностного состояния грунтов. Другой задачей в будущем должен стать поиск корреляций между определяемыми характеристиками, полученными не только лабораторными, но и полевыми методами, что позволит сократить объем полевых и лабораторных работ, сроки их выполнения, а также стоимость инженерных изысканий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Горяйнов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992. 264 с.

Горяйнов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.

Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та; Наука, 2005. 1024 с.

Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 176 с.

Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.

Пиоро Е.В. Деформационные и акустические свойства глинистых грунтов по результатам лабораторных инженерно-геологических и ультразвуковых исследований: Автореф. канд. дисс. М., 2014.

Поступила в редакцию 26.07.2020

Поступила с доработки 30.10.2020

Принята к публикации 30.10.2020