

УДК 550.834.05

Методика определения физических свойств дисперсных грунтов в естественном залегании по результатам инженерной сейсморазведки

- Романов В.В., РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.
- Иванов А.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация. Рассмотрена методика определения физических свойств дисперсных грунтов по данным инженерной сейсморазведки в естественном залегании на примере четвертичных суглинков России.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, физические свойства грунтов, интерпретация данных сейсморазведки, четвертичные суглинки.

Введение

Сейсмические методы исследования, наравне с электрическими, относятся к основным методам инженерно-геофизических исследований. Они применяются для уточнения геологического строения верхней части разреза, поиска скрытых проявлений геодинамических процессов и иных локальных неоднородностей, в сейсмическом микрорайонировании, при определении физических свойств грунтов. В инженерной сейсморазведке задействованы практически все известные типы волн (преломлённые, рефрагированные, отражённые, прямые, поверхностные) и микросейсм, востребовано внутриметодное комплексирование, когда на одном профиле (в скважине или паре скважин) реализуются несколько схем наблюдений и получаются сейсмограммы с записями продольных, поперечных и обменных волн. В сейсморазведке используются: метод преломлённых волн (МПВ) и сейсмическая томография (СТ), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), межскважинное сейсмическое просвечивание (МСП), метод отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ–ОГТ).

Сейсмическая томография, МПВ и МСП позволяют получить детальное распределение истинной скорости продольных и поперечных волн в плоскости хz, то есть по горизонтальной координате про-

филя (базы просвечивания) и глубине. Скважинные методы (ВСП, МСП) отличаются возможностью выделения инверсных (низкоскоростных) слоёв и большей разрешающей способностью.

Традиционно скорости сейсмических волн используются для перехода от времени вступления к глубинам границ, кроме того, их значения применяются для интерпретации результатов сейсморазведки. В томографических методах алгоритмы инверсии восстанавливают непрерывное распределение истинной скорости, а границы выделяются на уже полученном скоростном разрезе.

Сильные корреляционные зависимости между самими сейсмическими свойствами (скоростями продольных и поперечных волн V_P , V_S ; импедансами ρ_P , ρ_S и декрементами поглощения $\mathcal{Q}_P$, $\mathcal{Q}_S$), а также между сейсмическими и другими физическими параметрами грунтов верхней части разреза [Миндель и др., 2016], позволяют находить значения последних в естественном залегании, без бурения скважин, отбора образцов и выполнения полевых испытаний [Романов и др., 2014]. Теоретическая связь существует только между отношением (1) и динамическим коэффициентом Пуассона (2).

$$\gamma = \frac{V_P}{V_S} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{\gamma^2 - 2}{2(\gamma^2 - 1)} \quad (2)$$

Динамические упругие модули (Юнга E , всестороннего сжатия K , сдвига G) определяются через скорости волн и плотность, которая находится по данным лабораторных испытаний грунтов или через эмпирические отношения (3–5).

$$G = \rho V_S^2 \quad (3)$$

$$K = G \left(\gamma^2 - \frac{4}{3} \right) \quad (4)$$

$$E = G \left(\frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \right) \quad (5)$$

Значения упругих констант, найденные по данным сейсморазведки, завышены относительно аналогичных модулей, определяющих сопротивление статической нагрузке, поэтому динамические упругие модули уменьшаются за счёт введения понижающих поправок. В частности, в геотехническом программном обеспечении PLAXIS, базирующемся на реализации метода конечных элементов и предназначенном для моделирования поведения грунтов и определения устойчивости строительных конструкций, начальный модуль сдвига $G_{\max}(G_{0ref})$ находится именно по геофизическим данным [Власов и др., 2023].

Помимо плотности, по данным инженерной сейсморазведки определяются такие механические прочностные параметры, как удельное сцепление C и угол внутреннего трения φ , определяющие предельную нагрузку, способную выдержать грунт до разрушения. Оценка предельного напряжённого состояния грунта важна при прогнозировании развития геодинамических процессов [Лобанов, Романов, 2015]. Упругие константы, плотность, прочностные свойства, найденные в узлах регулярной двухмерной сети, позволяют выполнять расчёт показателей устойчивости грунтовой толщи мето-

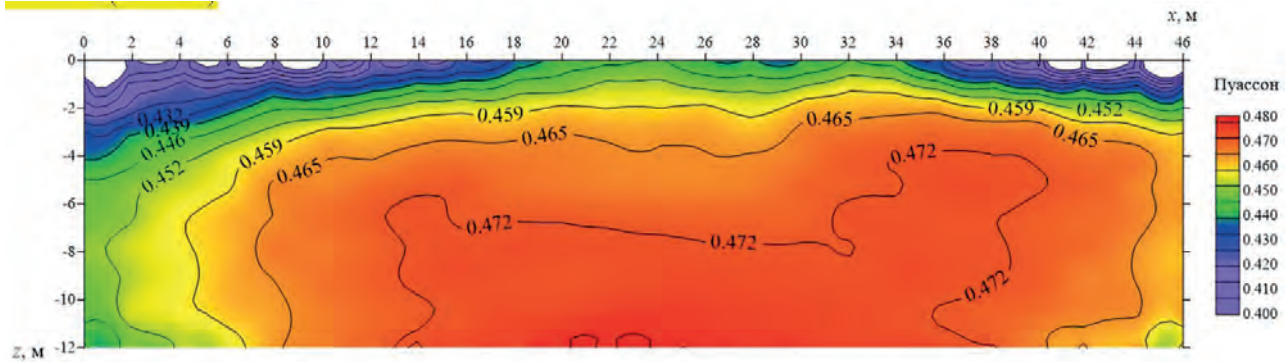
дом конечных элементов на основании критерия Мора — Кулона [Анциферов, Кудрявцев, 2025]. Вместе с тем, полевые испытания и лабораторные исследования редко обеспечивают сохранение условий залегания грунтов [Виноградов, Зубова, 2023] поэтому возможности сейсморазведки в этой области представляются весьма широкими.

В работе рассмотрена методика определения значений физических свойств грунтов в естественном залегании по результатам сейсморазведки.

Метод решения и результаты

Основой для определения распределения физических параметров грунтов служат полученные на регулярной сети значения скоростей продольных и поперечных волн. Такой результат обеспечивает многоволновая сейсморазведка томографическими методами (СТ и МСП). Вместе с тем, из-за сложности подготовки скважин и необходимости в отдельном источнике и приёмной косе, в МСП работа на поперечных волнах обычно не выполняется [Вязниковцев А. А. и др., 2025]. Результаты многоволновой наземной или межскважинной сейсморазведки представляются в виде регулярной прямоугольной сети [Романов и др., 2015], где каждая ячейка характеризуется пространственными координатами центра (x, z) и парой значений скорости V_P, V_S . По соотношениям (1)–(2) в каждой ячейке вычисляются значения коэффициента Пуассона (Рис. 1)

В формулы (3)–(5) входит природная (объёмная) плотность, определяемая по одному из эмпирических уравнений, которые различаются по типу и состоянию грунта [Романов и др. (Метрология, стандартизация и сертификация), 2015], региону и тесноте корреляции. Для суглинков средней полосы Европейской части РФ расчёт в плотности выполняется в два этапа. На первом определяются



▲ Рис. 1. Карта распределения значений коэффициента Пуассона.

приближённые оценки плотности сухого грунта ρ_d и природной весовой влажности w , единицы измерения скорости — км/с; плотности — г/см³, влажности — %. Уравнение (6) используется для входа в систему уравнений многомерной корреляции (7)–(8). Расчёт выполняется итеративно, то есть весовая влажность, полученная по уравнению (7), подставляется в (8), а уточнённая плотность сухого грунта — снова в уравнение (7). Количество итераций 5–6.

$$E = G \left(\frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1} \right) \quad (5)$$

$$\rho_d = 1.38 + 0.33 \cdot V_p \quad (6)$$

$$w = 79,061 - 3,82 \cdot V_p - \frac{30,01}{\gamma} - 28,91 \cdot \rho_d \quad (7)$$

Влажность и плотность сухого грунта, найденные по выражениям (7) и (8), используются для входа в систему (9)–(11),

в которую также входит уравнение для расчёта влажности на границе текучести.

$$\rho_d = 2,34 - \frac{0,736}{\gamma} - 0,0245 \cdot w \quad (8)$$

$$w_L = 26,93 + 0,840 \cdot w - 13,143 \cdot \rho_d(1 + 0,01 \cdot w) + 42,9 \cdot V_s \quad (9)$$

$$\rho_d = 2,30 + 0,53 \cdot V_s - \frac{0,656}{\gamma} - 0,0125 \cdot w - 0,0121 \cdot w_L \quad (10)$$

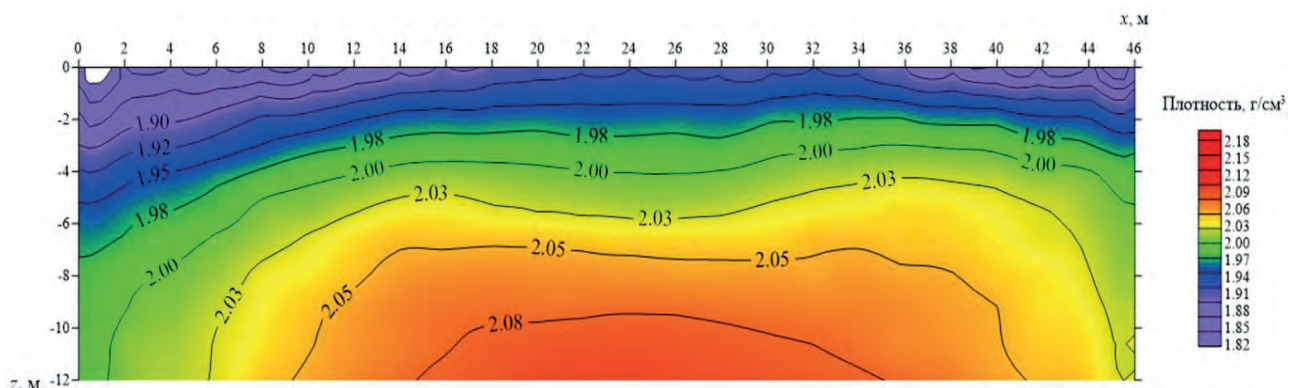
$$w = 79,061 - 3,82 \cdot V_p - \frac{30,01}{\gamma} - 28,91 \cdot \rho_d \quad (11)$$

Плотность грунта находится по стандартной формуле (12).

$$\rho = \rho_d(1 + 0,01 \cdot w) \quad (12)$$

Для определения модуля полной деформации $E_{\text{деф}}$, удельного сцепления и угла внутреннего трения (ускоренный сдвиг) применяются формулы (13)–(15).

▼ Рис. 2. Карта распределения плотности.



Упругие модули в (13)–(15) выражаются в МПа, удельное сцепление — в кПа, угол внутреннего трения — в градусах.

$$E_{ДЕФ} = 0,0362E + 2,6 \quad (13)$$

$$C = 8\sqrt{G} - 21 \quad (14)$$

$$\varphi = 16,1 - 0,076 \cdot G \quad (15)$$

Выводы

Таким образом, успешно опробованная на суглинках средней полосы Европейской части РФ, методика определения физических свойств грунтов в естественном залегании показала адекватные результаты при интерпретации результатов многоволновой сейсмической томографии.

Литература

1. Анциферов С. В., Кудрявцев М. А. Оценка устойчивости склонов при сооружении в них транспортных тоннелей // Транспортное строительство. – 2025. – № 3. – С. 2-5. – EDN UMCGNC.
2. Виноградов А.Ю., Зубова О.В. Прочностные характеристики грунта при проектировании объектов лесной инфраструктуры. Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023, 5 (1), 75-86. doi: 10.34753/HS.2023.5.1.75
3. Власов М. А., Простов С. М., Соколов М. В. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК Plaxis 3D // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 5 (159). – С. 4-14.
4. Вязниковцев А. А. и др. Метод межскважинного сейсмоакустического просвечивания как инструмент контроля качества закрепления карстующихся грунтов // Вестник АГГИ. – 2025. – Т. 1. – №. 1. – С. 17-25.
5. Лобанов А.М., Романов В.В. Перспективы гравиметрии при изучении

динамически нестабильных геологических объектов // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 42-46.

6. Методические рекомендации Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т трансп. стр-ва (ЦНИИС) ; [разраб.: О. П. Аникин и др.]. – Москва : ЦНИИС, 1985. – 100 с.

7. Миндель И.Г., Севостьянов В.В., Трифонов Б.А., и др., Особенности изучения деформационно-прочностных свойств дисперсных грунтов сейсмоакустическими методами. Геоэкология, 2016, № 5, с. 461–476.

8. Романов В.В., Мальский К.С., Боровой Е.А. Определение устойчивости бортов карьеров при инженерно-геологических изысканиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 77-82

9. Романов В.В., Посеренин А.И., Мальский К.С. Метрология, стандартизация и сертификация // Учебное пособие / Москва, 2015.

10. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений дмитровского района Подмосковья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 3. С. 86-88.

11. Tjie-Liong G. Common mistakes on the application of Plaxis 2D in analyzing excavation problems // International Journal of Applied Engineering Research. – 2014. – Т. 9. – №. 21. – С. 8291-8311.