

На правах рукописи



ПИОРО ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА

**ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ
ГРУНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАБОРАТОРНЫХ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедрах инженерной и экологической геологии, сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор

Владов Михаил Львович;

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Николаева Светлана Казимировна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, заведующий сектором, Институт Физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта

Алешин Александр Степанович,

кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела полевых методов исследований, ГУП «Мосгоргеотрест»

Кошелев Алексей Геннадьевич

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН)**

Защита состоится 17 октября 2014 г. в 14.30 часов в аудитории 415 на заседании диссертационного совета Д 501.002.06 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, МГУ, корпус «А», геологический факультет.

Автореферат размещен на интернет-сайтах Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова www.geo.web.ru и Министерства образования и науки Российской Федерации www.vak.ed.gov.ru. С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27, сектор «А», 8 этаж, к. 812).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 119234, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, геологический факультет, ученому секретарю диссертационного совета профессору В.Н.Соколову

Автореферат разослан 1 сентября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.г.-м.н., профессор



В.Н.Соколов

Введение

Актуальность темы исследований. Деформационные характеристики – одни из наиболее важных показателей свойств грунтов, используемых при проектировании и строительстве зданий и инженерных сооружений. Традиционные виды испытаний длительны и трудоемки, поэтому надежное и быстрое определение показателей деформационных свойств глинистых грунтов является актуальным направлением исследований. Перспективной представляется возможность применения косвенных методов - геофизических сейсмоакустических исследований. Их преимущества заключаются в простоте эксперимента и малых временных затратах. Поэтому проведение исследований деформационных свойств глинистых грунтов инженерно-геологическими и геофизическими методами и совместный анализ результатов является актуальным направлением науки и практики.

Степень разработанности. Поиском корреляционных взаимосвязей между показателями деформационных свойств глинистых грунтов по результатам инженерно-геологических и сейсмических исследований посвящены работы И.Г. Минделя, В.Н. Никитина, Н.Н. Горяйнова, Ф.М. Ляховицкого и др. Литературные данные по выбранной тематике немногочисленны и относятся преимущественно к 70-80-м годам прошлого века, с тех пор аппаратура и методика исследований были значительно усовершенствованы.

Цель работы - установление корреляционных взаимосвязей между показателями деформационных свойств глинистых грунтов, полученных при статическом нагружении и ультразвуковом просвечивании, как обоснование способа оценки этих свойств по результатам измерения скоростей упругих волн.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**: 1) обобщить опубликованные материалы по деформационным свойствам глинистых грунтов и применяемым лабораторным методам их изучения; 2) разработать методики проведения экспериментальных исследований и способ подготовки образцов модельных глинистых грунтов; 3) изучить скоростные характеристики модельных и природных глинистых грунтов с помощью ультразвукового метода для анализа влияющих факторов; 4) исследовать деформационные свойства модельных и природных глинистых грунтов с помощью лабораторных инженерно-геологических и ультразвукового методов; 5) выявить

корреляционные взаимосвязи между показателями деформационных свойств, полученными инженерно-геологическими и ультразвуковым методами.

Научная новизна

1. На современном уровне получены новые данные и выявлены новые закономерности формирования мало изученных акустических свойств глинистых грунтов.

2. Получены ультразвуковые характеристики различных по дисперсности глинистых грунтов в широком интервале влажности и выявлены закономерности их изменения в соответствии с пороговыми значениями влажностных показателей.

3. Установлена взаимосвязь соотношения скоростей продольных волн и показателя текучести глинистых грунтов.

4. При исследовании деформационных свойств глинистых грунтов применен новый подход, заключающийся в сочетании инженерно-геологических и ультразвукового методов. Комплексный анализ данных, полученных на модельных и природных образцах, позволил выявить корреляционные взаимосвязи для упрощенной оценки деформационных показателей глинистых грунтов.

Практическая значимость. Результаты ультразвуковых измерений, полученные на современном уровне, могут использоваться в качестве справочного материала по акустическим свойствам глинистых грунтов, в частности, моренных суглинков. Записи волновых картин измерений на образцах являются ценным материалом для дальнейшего изучения, например, характеристик поглощения глинистых грунтов.

Полученные данные по отношению скоростей поперечных волн к продольным могут использоваться при интерпретации геофизических данных для оценки консистенции глинистых грунтов, в том числе, в полевых условиях. Результаты изучения взаимосвязей скоростных характеристик с показателями состава, строения и свойств глинистых грунтов могут применяться для разработки экспресс-методик их оценки ультразвуковым методом на образцах или керне при опробовании буровых скважин. Кроме того, результаты полевых ультразвуковых измерений могут использоваться для контроля сохранности сложения и состояния образцов при транспортировке. Полученные корреляционные уравнения могут быть использованы для задания значений показателей деформационных свойств моренных суглинков при инженерно-геологических расчетах и моделировании.

Вклад автора. Работа является результатом исследований, проведенных автором в период обучения в очной аспирантуре на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова с 2009 по 2012 гг. Автором были приготовлены и испытаны более 120 образцов модельных глинистых грунтов, отобраны и исследованы более 40 образцов природных глинистых грунтов, для каждого из которых определены все необходимые показатели состава, строения, состояния, физических и физико-механических свойств (более 20 показателей). Выполнены 160 ультразвуковых измерений; по 39 образцам проведены компрессионные испытания и по 360 - одноосного сжатия; проведена статистическая обработка полученных данных.

Объектами исследования стали модельные глинистые грунты, приготовленные из моренного суглинка (gQ_{1dns}) нарушенной структуры, с песчаными добавками и без них. Выбор модельных глинистых грунтов был обоснован необходимостью получить образцы с фиксированными исходными состоянием и свойствами. Также исследовались образцы природных глинистых грунтов – суглинки и супеси донской морены (gQ_{1dns}) и юрские суглинки и глины (J_{3ox}), отобранные на территории Москвы и Московской области.

Методы исследований. Исследования проводились с помощью лабораторных методов, широко используемых в грунтоведении для характеристики грунтов, а также в ходе компрессионных испытаний и одноосного сжатия на приборах производства ООО «НПП «Геотек»», сейсмоакустических ультразвуковых исследований грунтов с помощью дефектоскопа УД2Н-П. Для обработки результатов исследования использовались методы статистического анализа. Комплексное сочетание методов и значительный объем фактических данных позволили получить надежные и достоверные научные результаты.

Защищаемые положения

1. При близких значениях плотности, пористости и влажности грунтов скорости продольных волн в глинистых грунтах увеличиваются с ростом их дисперсности. В линейных взаимосвязях $V_p(\rho)$ наблюдается увеличение угла наклона прямых с ростом дисперсности грунтов, что обусловлено ростом количества контактов в единице объема грунта и увеличением их прочности по мере сближения высокодисперсных частиц.

2. Установлен интервал влажности глинистых грунтов с наименьшими скоростями продольных волн, лежащий в диапазоне от максимальной гигроскопической влажности до максимальной молекулярной влагоемкости и обусловленный наличием связанной и капиллярно-разобщенной влаги. Скорости поперечных волн и отношение скоростей поперечных волн к продольным убывают с ростом влажности и степени влажности.

3. Получены уравнения взаимосвязей динамического модуля упругости и статических модулей деформации для модельных и природных четвертичных глинистых грунтов, позволяющие для условий механического нагружения оценивать деформационные свойства глинистых грунтов по данным лабораторных ультразвуковых исследований.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы опубликованы в журналах из списка ВАК России: «Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология» (2011, № 6, С. 71-74), «Геофизика» (2014, №1, С. 57-62), докладывались и обсуждались на XVII, XVIII, XIX международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов» (МГУ, 2010, 2011, 2012), XLIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технологический прогресс» (Новосибирск, 2011), научно-практических конференциях молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, ПНИИИС, 2010, 2011, 2012, 2014), сборнике трудов XXIII молодежной конференции памяти члена-корр. АН СССР К.О.Кратца «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии» (Петрозаводск, 2012), Пятнадцатых Сергеевских чтениях, молодежной конференции «Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты)» (Москва, 2013, с. 75-79).

Автор работы выражает благодарность профессору В.Н.Соколову, профессору Э.В.Калинину, профессору В.А.Королеву, доценту Р.П.Кочетковой, ассистенту А.Н.Ошкину, сотрудникам лабораторий механики грунтов и грунтоведения МГУ, М.В. Коптевой-Дворниковой и научным руководителям: зав. кафедры сейсмометрии и геоакустики доктору физ.-мат. наук, профессору М.Л. Владову и канд. геол.-мин. наук, доценту кафедры инженерной и экологической геологии С.К. Николаевой.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о деформационных свойствах глинистых грунтов и лабораторных методах их изучения

Даются общие представления о деформациях, их видах и связях с напряжениями; обсуждаются особенности деформируемости грунтов. Отмечается разный подход к характеристике деформационных свойств грунтов (К.Терцаги, М.Н.Гольдштейн, Б.И.Дидух, Н.А.Цытович, Б.И.Далматов и др.). При изучении процесса деформирования грунтов одним из основных допущений при расчете показателей деформационных свойств является применение теории линейного деформирования.

Рассмотрены деформационные свойства глинистых грунтов и факторы их обуславливающие. Большой вклад в развитие теории деформирования глинистых грунтов внесли С.С.Вялов, Н.М.Герсеванов, М.Н.Гольдштейн, И.М.Горькова, Р.Э.Дашко, Р.С.Зиангиров, В.А.Королев, Л.И.Кульчицкий, Н.Н.Маслов, С.Р.Месчан, Н.В.Орнатский, В.И.Осипов, И.В.Попов, Н.П.Пузыревский, Н.А.Цытович и многие другие.

Детально изучено влияние внешних (статическое давление, положительные температуры, скорость нагружения и условия дренирования) и внутренних (химико-минеральный состав, структурно-текстурные особенности, состав и концентрация электролита порового раствора, консистенция, степень водонасыщения, начальные плотность и влажность, жизнедеятельность микроорганизмов) факторов на деформационные свойства глинистых грунтов. При этом вариации значений модулей деформации и коэффициента поперечного расширения под влиянием действующих факторов почти не изучены.

Применяемые лабораторные инженерно-геологические методы исследования деформационных свойств глинистых грунтов имеют отработанные методики, регламентированные нормативными документами. Однако для каждого метода существует ряд допущений, условий применимости и недостатков. Поэтому даже для одного грунта значения получаемых деформационных характеристик могут отличаться. Корреляционные взаимосвязи деформационных показателей глинистых грунтов, полученных различными инженерно-геологическими методами (лабораторными и полевыми) немногочисленны. Кроме того, нет надежной

общепринятой для глинистых грунтов методики экспериментального определения коэффициента поперечного расширения.

Дается обзор различных сейсмических методов исследований деформационных свойств глинистых грунтов. Для лабораторных исследований целесообразно использование ультразвукового метода. По результатам анализа литературных данных влияние действующих факторов на сейсмические (акустические) свойства дисперсных грунтов изучено недостаточно. Полученные эмпирические зависимости различны для грунтов разного типа.

Глава 2. Объекты и методики исследования

При выборе объектов исследования автор руководствовался следующими принципами: 1) все образцы должны быть глинистыми; 2) возраст и степень литификации грунтов должны отличаться, что обеспечит их различную сжимаемость; 3) по крайней мере, часть образцов должна обладать несущественной усадкой; 4) для минимизации неточностей (обусловленных влиянием состава и строения) при изучении факторов, влияющих на скорости распространения упругих волн, необходимо проведение исследований на искусственных образцах с контролируемыми свойствами.

Исходя из вышеизложенного, экспериментальные исследования проводились с использованием модельных (искусственных) грунтов и грунтов природного сложения (четвертичные моренные суглинки и юрские суглинки и глины, широко распространенные на территории города Москвы).

Модельные образцы готовились из перемолотого (для обеспечения однородности) моренного суглинка нарушенной структуры с добавлением среднеспесчаной фракции в соотношениях 0, 10, 25 и 35% по массе. Модельные грунты (М1-М4), соответствовали суглинкам тяжелым пылеватым (образец М1), легким песчанистым (образец М2) и супесям песчанистым (образцы М3 и М4) по ГОСТ 25100-2011. Глинистые пасты закладывались в разъемные формы и уплотнялись под действием статической нагрузки от 0,02 до 0,12 МПа в течение одних суток для получения модельных образцов, различающихся по плотности скелета и влажности. Плотность модельных глинистых грунтов менялась от 1,54 до 2,32 г/см³, влажность – от 4 до 15%.

Природные и модельные образцы изучались с использованием современных методов грунтоведения. Минеральный состав грунтов определялся методом

рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония). Изучение неоднородности строения образцов и оценка пористости проводилась с помощью метода рентгеновской компьютерной томографии и комплекса для анализа пространственной структуры образцов Yamato TDM 1000H-II. Микростроение изучалось с применением высокоразрешающей растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа LEO 1450VP и программного комплекса по анализу изображений «STIMAN».

Для оценки деформационных свойств в лабораторных условиях проводились автоматизированные компрессионные испытания и одноосное сжатие на приборах производства ООО «НПП «Геотек»» и ультразвуковые исследования.

Модули общей деформации по результатам компрессионных испытаний рассчитывались по стандартной методике (ГОСТ 12248-2010) на ступенях нагружения 0,1-0,3 МПа и 0,3-0,5 МПа. Поскольку исследуемые грунты очень разнообразны по своей сжимаемости на разных ступенях, их сравнение между собой было затруднительно, поэтому расчет модулей общей деформации проводился также по участку нагружения от природного давления $P_{пр}$ до давления предела пропорциональности $P_{пп}$ (по аналогии со штамповыми испытаниями, согласно стандарту МОСГОРГЕОТРЕСТ (2009) и работе Р.С.Зиангирова и А.Г. Кошелева (2010)). Для образцов моренных суглинков диапазон нагрузок $P_{пр}$ - $P_{пп}$ составил 0,15 – 0,35 МПа, а для юрских глинистых грунтов 0,3-0,5 МПа. Кроме того, были получены значения модулей общей деформации на участке от бытового давления $P_{быт}$ до значения $1,5P_{быт}$, поскольку именно последнему значению давления соответствуют типовые нагрузки от сооружения. Таким образом по результатам компрессионных испытаний модули компрессионной E_k и общей деформации E_o рассчитывались для следующих интервалов нагружения: 1) 0,1-0,3 МПа; 2) 0,3-0,5 МПа; 3) $P_{пр}$ - $P_{пп}$; 4) $P_{быт}$ - $1,5P_{быт}$.

По результатам испытаний на одноосное сжатие производился расчет начального модуля сжатия E_n и модуля относительной деформации $E_{отн}$. Расчет E_n проводился по начальному линейному участку графика $\sigma(\epsilon)E_n = \Delta\sigma/\Delta\epsilon$ (Гольдштейн, 1952). Диапазон нагрузок менялся от 0 до 0,1 МПа. Согласно Н.М.Герсеванову и М.Н.Гольдштейну (1952), для расчета модуля относительной деформации глинистых грунтов $E_{отн}$ принимается спрямленный участок кривой $\sigma(\epsilon)$ от нуля до значения $\sigma = R_c/3$. Коэффициент поперечного расширения μ_o определялся по линейному участку

графика соотношения поперечных и продольных относительных деформаций в пределах значений вертикальной (продольной) деформации 0,5-1%.

По результатам ультразвуковых исследований получены значения скоростей продольных (V_p), поперечных волн (V_s) и отношение скоростей (V_s/V_p), а также рассчитаны динамический модуль упругости (E_d) и коэффициент Пуассона (μ) в соответствии с общеизвестными формулами.

Для анализа и обработки полученных результатов применялись методы математической статистики.

Глава 3. Закономерности распространения упругих волн в образцах глинистых грунтов

По результатам ультразвуковых измерений установлены диапазоны изменений скоростных характеристик глинистых грунтов (приведены ниже, в табл.3).

Изучение влияния **дисперсности** (или «глинистости») на скорости упругих волн в глинистых грунтах проводилось с помощью следующих показателей: содержание частиц размером меньше 0,001, 0,005, 0,01 мм; средний диаметр частиц; показатели пластичности. Получено, что скорости продольных V_p и поперечных V_s волн модельных грунтов снижаются с уменьшением дисперсности (при переходе от суглинков М1, М2 к супесям М3, М4). Однако простых линейных зависимостей скоростей упругих волн и отношения скоростей от указанных показателей дисперсности для изучаемых модельных и природных грунтов не выявлено.

Для каждого из модельных грунтов отмечается рост скоростей упругих волн и снижение отношения скоростей V_s/V_p с ростом **плотности** и плотности скелета. Эти связи являются стабильными и характеризуются достаточно высокими коэффициентами корреляции.

Известно, что с повышением плотности грунта дальние коагуляционные контакты переходят в ближние, возрастают количество и прочность точечных контактов между отдельными структурными элементами в единице объема грунта, снижается объем пор и пустот, поэтому и скорости упругих волн увеличиваются. При этом вид уравнения связи скоростей упругих волн от плотности зависит от типа грунта (рис. 1).

Поскольку все природные и модельные образцы имели схожие закономерности изменения скоростных параметров от плотности, для наглядного сравнения были

построены графики, на которых отражены полученные линейные корреляционные уравнения для каждого из рассмотренных видов грунтов (рис. 2).

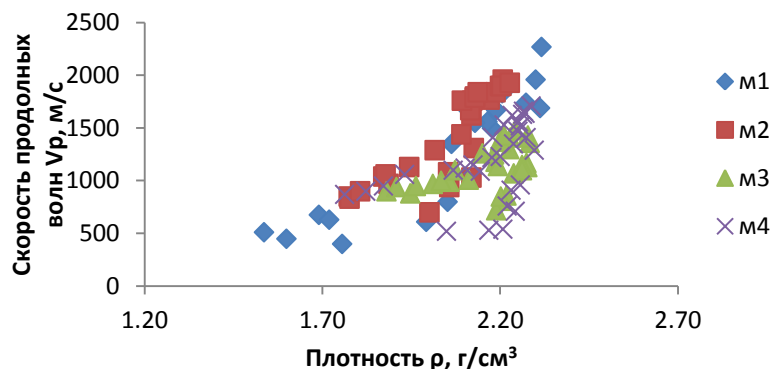


Рис. 1. Взаимосвязь скорости продольных волн и плотности модельных глинистых грунтов М1-М4

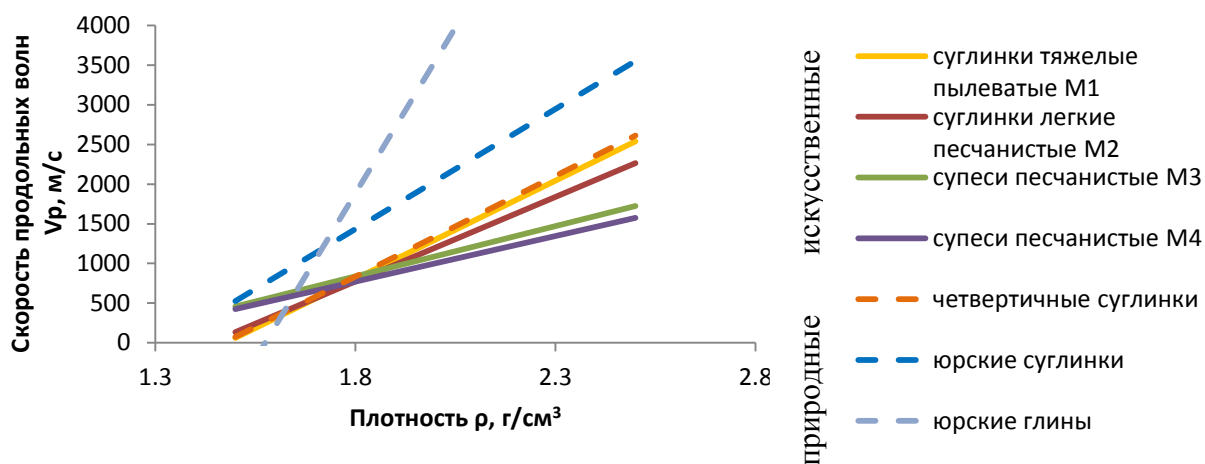


Рис. 2. Корреляционные взаимосвязи скоростей продольных волн и плотности исследуемых глинистых грунтов при аппроксимации линейной функцией

Из рисунка следует, что разным глинистым грунтам в координатном поле соответствуют разные прямые, причем, угол их наклона увеличивается с ростом дисперсности. Тот факт, что корреляционные прямые для суглинков М1, М2 и для супесей М3, М4 близки друг к другу можно объяснить сходством гранулометрического состава. Корреляционная прямая для четвертичных моренных суглинков близка к прямой для модельных суглинков М1, поскольку большинство исследуемых природных грунтов по своему составу и дисперсности соответствуют этой модели. Увеличение угла наклона графиков корреляционных функций с ростом дисперсности можно объяснить большим количеством контактов у высокодисперсных грунтов по сравнению с менее дисперсными при одинаковой плотности, и более существенным ростом количества и прочности контактов при «уплотнении» в одинаковом интервале изменения плотности, что позволило

сформулировать первое защищаемое положение. 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 (в 4 раза), а скорости поперечных волн V_s от 550 до 200 м/с (примерно в 2 раза).

В результате исследований получено, что в зависимости от количества влаги и ее видов в грунте могут иметь место пороговые значения **влажности**, при переходе через которые акустические свойства меняются.

Для *природных глинистых грунтов* рассматривался интервал влажности $25 \div 3$ % (по мере дегидратации), что соответствует изменению влажности от нижнего предела пластичности до гигроскопической. Для определения влияния влажности на значения скоростей упругих волн были построены соответствующие графики (рис. 3), из которых следует, что скорости продольных волн V_p уменьшаются до значения влажности, близкой максимальной гигроскопической влажности $W_{мг}$ ($6 \div 7$ %), затем в некотором интервале остаются примерно постоянными, после чего вновь возрастают. Для всех образцов значение влажности, после которого скорости продольных волн начинают вновь возрастать, близко влажности максимальной молекулярной влагоемкости $W_{ммв}$ ($15 \div 20$ %). В интервале влажности $W_{мг} \div W_{ммв}$ во всех образцах исследованных природных глинистых грунтов наблюдаются наиболее низкие значения скоростей продольных волн. Также важно отметить, что для более дисперсных разностей границы этого интервала приурочены к бóльшим значениям влажности.

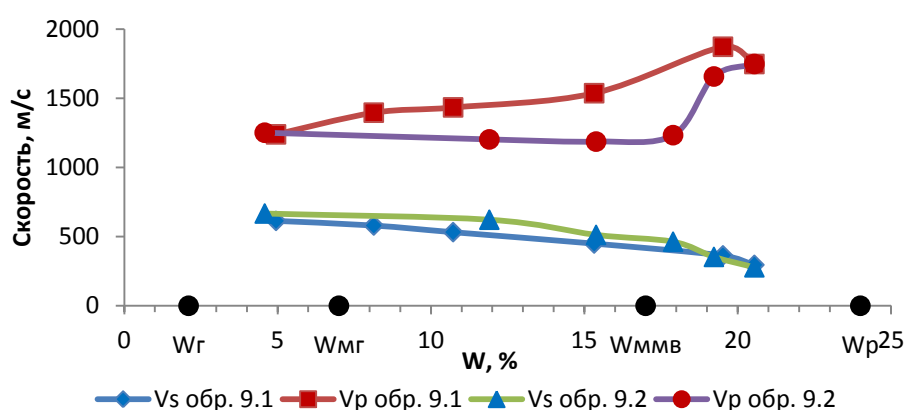


Рис. 3. Изменение скоростей V_s и V_p в зависимости от весовой влажности природных глинистых грунтов ($gQ_{гднс}$)

В самом начале гидратации упругие свойства грунта определяются жесткостью его скелета, прочностью точечных и цементационных контактов. С ростом толщины

гидратных пленок вокруг частиц жесткость скелета снижается, преобладающими становятся малопрочные коагуляционные контакты, скорости падают. Но при полном заполнении пор водой упругие свойства грунта будут определяться уже не скелетом, а упругостью самой воды, при этом скорости продольных волн (волн «сжатия») возрастают и соответствуют значениям, характерным для их распространения в воде (~1500 м/с).

Скорости поперечных волн (волн «сдвига») и отношение скоростей убывают с ростом влажности, что соответствует снижению сдвиговых характеристик грунта с ростом влажности. Полученные данные по влиянию влажности на скорости упругих волн позволили сформулировать второе защищаемое положение.

Зависимости скоростей упругих волн V_p и V_s от **степени влажности природных глинистых грунтов** также различны (рис. 4). Скорости мало меняются до значений степени влажности $S_r \approx 0,7 \div 0,8$, а потом наблюдается резкий рост скоростей продольных волн и снижение скоростей поперечных волн. Такие закономерности прослеживаются во всех изученных образцах. Точка перегиба на графике связана с ростом содержания воды переходного типа и изменением влажного состояния грунта на водонасыщенное.

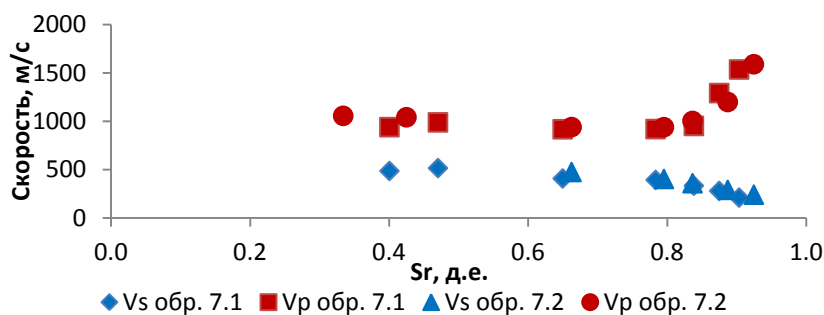


Рис. 4. Изменения скоростей V_s , V_p в зависимости от степени влажности природных моренных суглинков

Для *модельных образцов* скорости продольных волн V_p с ростом влажности (рис. 5, а) снижаются до значений $W_{\text{мг}}$ (причем абсолютные значения скоростей уменьшаются практически в два раза). На этом участке ($W < W_{\text{мг}}$) плотность скелета практически постоянна. Влажность грунта особенно сильно влияет именно на этом интервале, что объясняется существенными различиями в прочности контактных взаимодействий частиц с разным количеством адсорбированной (связанной) воды.

Скорость поперечных волн (рис. 5, б) и отношение скоростей убывают на всем исследуемом интервале влажности. Графики влияния влажности и степени влажности на скорости упругих волн в модельных грунтах похожи.

Отмечается снижение отношения скоростей V_s/V_p с увеличением **показателя консистенции**, причем для грунтов твердой консистенции оно $>0,2$, полутвердой 0,1-0,2, тугопластичной $<0,1$ (рис. 6). Эти данные могут использоваться в инженерной геофизике – по соотношению скоростей упругих волн оценивать консистенцию глинистых грунтов в пределах однородного по составу и строению слоя.

Ультразвуковые исследования проводились с использованием пригруза - гири весом 1 кг, которая создавала давление на образец 0,01 МПа, улучшая его контакт с датчиками. Опыты показали, что **внешняя статическая нагрузка** в пределах 0,04 МПа не оказывает влияния на значения скоростей упругих волн.

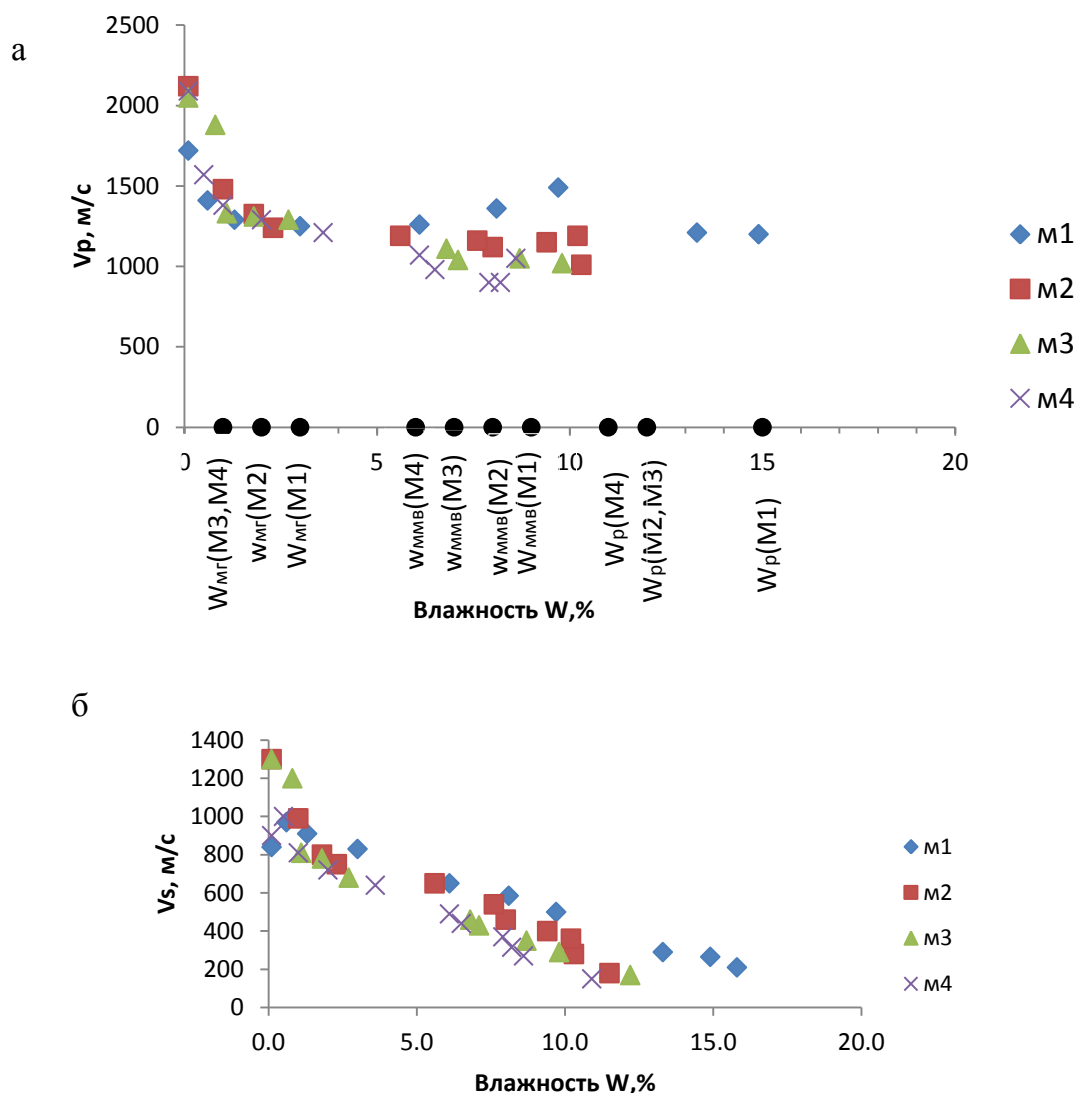


Рис. 5. Взаимосвязь скоростей продольных и поперечных волн (а, б) с весовой влажностью модельных суглинков (М1 и М2) и супесей (М3 и М4)

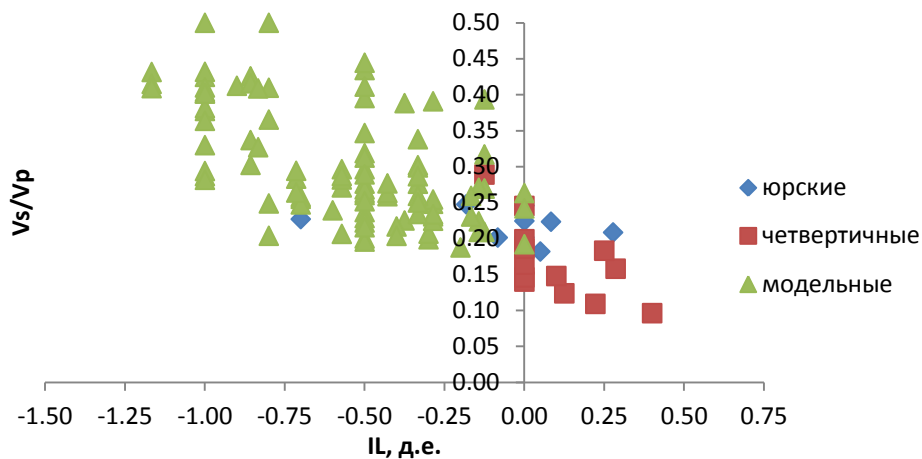


Рис. 6. Взаимосвязь отношения скоростей и показателя консистенции (текучести) исследуемых грунтов

При нагрузках 1 кг и выше сигналы более четкие, что позволяет точнее зафиксировать времена вступления волн.

Зависимость акустических свойств грунтов от **характера структурных связей** оценивалась с помощью показателя прочности на одноосное сжатие R_c .

По результатам исследований влияние прочности структурных связей сказывается скорее на скоростях поперечных волн, в меньшей степени на скоростях продольных волн и отношении скоростей. Следовательно, скорости поперечных волн (волн сдвига) в большей степени связаны с прочностью контактных взаимодействий.

Таким образом, показано, что скорости упругих волн зависят от комплекса факторов. По результатам *пошагового регрессионного анализа* скорости продольных волн в большей степени зависят от плотности, а поперечных - от прочности структурных связей и плотности грунта, поскольку именно эти параметры учитывают количество и тип контактов в грунте, объем его пор (пустот), количество влаги.

Факторный анализ показал, что для получения более достоверных корреляций необходимо рассматривать выделенные группы образцов: юрские суглинки и глины отдельно, а для четвертичных грунтов – моренные суглинки и супеси отдельно.

По результатам *компрессионных* испытаний значения модулей деформации литифицированных юрских глинистых грунтов выше, чем четвертичных, обладающих более слабыми связями и более низкими значениями структурной прочности (табл. 1).

Для выявления связей проведен корреляционный анализ модулей общей деформации и характеристик состава, состояния и свойств. Тесных и весьма тесных

связей получено не было, все парные коэффициенты корреляции $r < 0,74$. Однако можно говорить о снижении значений модулей деформации четвертичных грунтов при переходе образцов от твердой к полутвердой, а затем тугопластичной и мягкопластичной консистенции (пластичной у супесей).

Наиболее показательной является связь модулей общей деформации и скоростей поперечных волн на участке $P_{пр}-P_{пп}$. Уравнение связи для суглинков и супесей выглядит следующим образом $E_0 = 0,02V_s - 0,41$ ($r = 0,71$).

Кроме линейной аппроксимации полученную зависимость можно описать экспоненциальным законом $E_0 = 1,23e^{0,0039V_s}$ ($r = 0,73$), коэффициент корреляции незначительно выше, чем для линейной связи. Отметим, что наблюдается тренд увеличения модулей деформации с ростом прочности структурных связей четвертичных глинистых грунтов.

Таблица 1. Обобщенные результаты компрессионных испытаний

Название образцов	Модули деформации, МПа							
	интервал нагружения 0,1-0,3 МПа		интервал нагружения 0,3-0,5 МПа		участок $P_{пр}-P_{пп}$, МПа		участок $P_{быт}-1,5P_{быт}$, МПа	
	E_k	E_0	E_k	E_0	E_k	E_0	E_k	E_0
Суглинки (gQ_{dns}) $2,02 < \rho < 2,21$; $11 < \omega < 14$	6-38	2-14	11-24	4-9	6-24	2-9	11-19	4-7
Суглинки и глины (J_3ox) $1,66 < \rho < 1,83$; $24 < \omega < 30$	8-45	3-16	9-42	3-15	9-36	4-13	9-36	3-13

Примечание: E_k и E_0 – модули компрессионной и общей деформации.

Проведенный анализ парных коэффициентов корреляции отдельно для четвертичных моренных суглинков показывает несколько более высокие значения r , особенно между показателями E_k , $E_0(V_s, R_c)$. На рис. 7 отражена наиболее тесная взаимосвязь $E_0(V_s)$, которая описывается экспоненциальной функцией $E_0 = 1,29e^{0,004V_s}$ ($r = 0,74$).

Преимущество *одноосных испытаний* в ряду других инженерно-геологических методов, заключается в их малых временных затратах и возможности получить данные по прочности, модулю деформации и коэффициенту поперечного расширения.

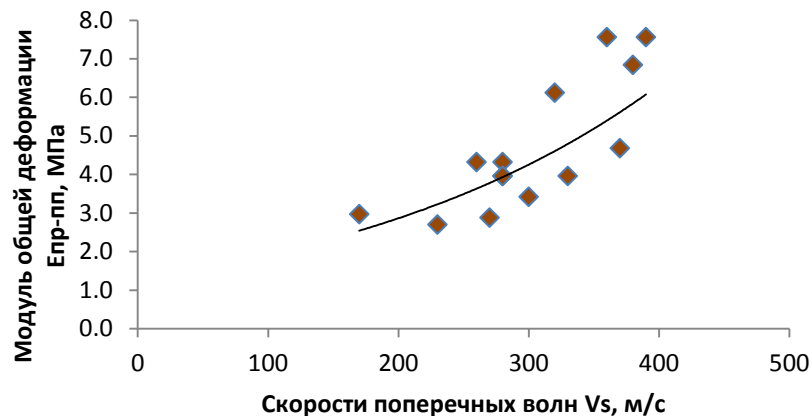


Рис. 7. Взаимосвязь модулей деформации и скоростей поперечных волн четвертичных суглинков

По результатам экспериментальных исследований (табл. 2) прочность на одноосное сжатие модельных глинистых грунтов снижается при переходе от суглинков к супесям от средних значений 0,5-0,6 МПа до 0,3 МПа. В том же направлении уменьшается и диапазон изменения значений прочности, максимальные и минимальные значения в пределах одной модели.

Таблица. 2. Результаты испытаний на одноосное сжатие исследуемых грунтов

Образцы (количество), показатель текучести I_L	Прочность на сжатие R_c , МПа	Начальный модуль сжатия E_n , МПа	Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа	Коэффициент поперечного расширения μ_0
Суглинки тяжелые М1 (27) $I_L < 0$	<u>0,20-1,05</u> 0,66	<u>14-128</u> 58	<u>21-200</u> 77	<u>0,20-0,48</u> 0,36
Суглинки легкие М2 (24) $I_L < 0$	<u>0,17-1,10</u> 0,51	<u>14-110</u> 47	<u>19-200</u> 76	<u>0,26-0,45</u> 0,34
Супеси М3 (30) $I_L < 0$	<u>0,08-0,63</u> 0,29	<u>6-82</u> 35	<u>16-139</u> 58	<u>0,25-0,44</u> 0,37
Супеси М4 (32) $I_L < 0$	<u>0,11-0,64</u> 0,27	<u>18-65</u> 39	<u>10-99</u> 48	<u>0,24-0,45</u> 0,37
Суглинки и супеси (gQ_{1dns}) (25) $-0,56 < I_L < 0,63$	<u>0,09-0,54</u> 0,31	<u>3-20</u> 11	<u>1-22</u> 9	<u>0,31-0,45</u> 0,38
Суглинки и глины (J_{3ox}) (3) $-0,70 < I_L < 0,28$	<u>0,31-0,47</u> 0,37	<u>10-18</u> 13	<u>10-18</u> 14	<u>0,31-0,40</u> 0,36

Примечание: в числителе дроби приведены минимальные-максимальные значения, в знаменателе – среднее.

Значения начального модуля сжатия и относительного модуля деформации тоже снижаются при переходе от модельных суглинков (М1, М2) к супесям (М3, М4) (табл. 2). Диапазон изменения этих параметров уменьшается в том же направлении. Максимальных значений достигают наиболее плотные образцы (с нагрузками уплотнения 0,12 МПа) с задаваемой влажностью 10-15% (близкой оптимальной влажности).

Коэффициенты поперечного расширения зависят в большей степени от показателей влажности, чем от дисперсности. Диапазоны изменения этого параметра одинаковы для всех модельных грунтов (табл. 2), в пределах одной модели минимальными значениями μ_0 (около 0,20-0,30) характеризуются наиболее «сухие» и плотные образцы, с увеличением влажности растет и коэффициент поперечного расширения, достигая значений 0,40-0,45.

По результатам корреляционного анализа отмечается увеличение начального модуля сжатия с ростом показателей глинистости и прочности структурных связей и снижение с повышением показателей влажности и консистенции. А коэффициенты поперечного расширения увеличиваются с ростом показателя консистенции и снижаются при одинаковой влажности с увеличением дисперсности.

Прослеживается связь прочности структурных связей и начальных модулей сжатия для всех исследуемых грунтов. В общем виде для модельных и четвертичных грунтов зависимости представлены на рис. 8. Подобная зависимость получена и с относительным модулем деформации, но коэффициент корреляции ниже.

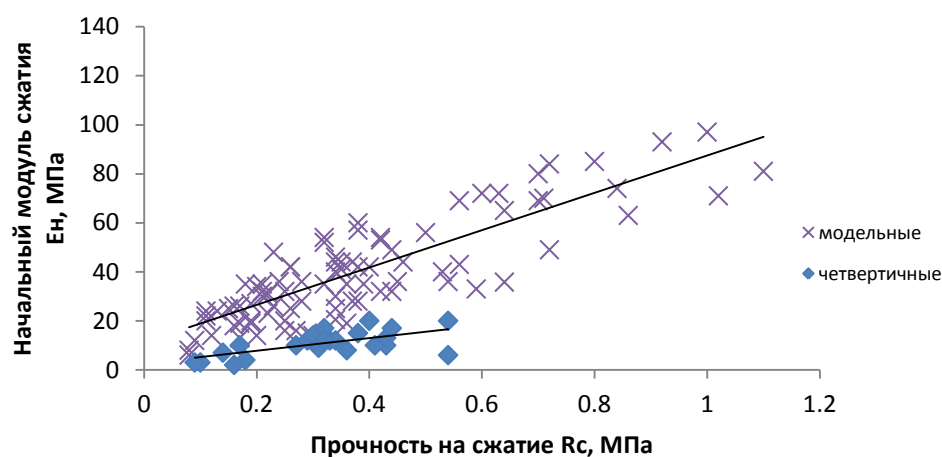


Рис. 8. Взаимосвязь начального модуля сжатия и прочности на сжатие модельных и четвертичных грунтов

По результатам множественного регрессионного анализа получены уравнения взаимосвязи начального модуля сжатия и относительного модуля деформации с показателями состава, состояния и свойств природных суглинков:

$$E_n = -14,8I_L + 14,8R_c + 8,7 \quad (r=0,86),$$

$$E_{отн} = -27I_L + 2,6W - 19 \quad (r=0,87).$$

Значения начального модуля сжатия в большей степени определяются показателями влажности, дисперсности и прочности структурных связей, что вполне объяснимо, поскольку они определяют длину прямолинейного участка при расчете E_n . Относительный модуль деформации по результатам статистического анализа в отличие от E_n не зависит от прочности структурных связей. Это объясняется тем, что природные грунты были различной консистенции и в большинстве случаев при напряжении $R_c/3$ связи уже были нарушены.

Результаты множественного регрессионного анализа для коэффициента поперечного расширения позволили получить уравнение вида $\mu_0 = 0,14I_L + 0,01W_p + 0,46$ ($r=0,79$). В наибольшей степени значение μ_0 определяется показателем текучести грунта, что согласуется с теорией, в меньшей степени влияет дисперсность.

Диапазоны изменения деформационных показателей по результатам *ультразвуковых исследований* приведены в табл. 3. По полученным данным для более дисперсных *модельных грунтов* (суглинков М1, М2) характерны большие скорости продольных волн (V_p) по сравнению с менее дисперсными (супесями М3, М4) при схожих изменениях плотности. Подобное изменение скоростей соответствующим образом сказывается и на значениях динамического модуля упругости (E_d) - они снижаются с уменьшением дисперсности глинистых грунтов.

Глава 4. Сравнение показателей деформационных свойств глинистых грунтов, полученных лабораторными методами при механическом нагружении и по данным ультразвукового просвечивания

Для всех *модельных глинистых грунтов* прослеживается тесная связь динамического модуля упругости с прочностью структурных связей, оцениваемой по временному сопротивлению грунта сжатию R_c (рис. 9). Причем, уравнение связи для суглинков в общем виде выглядит следующим образом: $E_d = 1300R_c + 136$ ($r=0,76$, связь тесная). Для супесей уравнение $E_d = 2200R_c + 138$ ($r=0,78$, связь тесная) отличается большим угловым коэффициентом, отражая влияние дисперсности.

Увеличение модуля упругости грунтов с ростом прочности структурных связей вполне понятно, поскольку повышение R_c обусловлено переходом контактов от коагуляционных к точечным и возрастанием жесткости системы в целом.

Таблица 3. Результаты ультразвуковых исследований

Образцы грунтов (количество)	V_p , м/с	V_s м/с	V_s/V_p	Динамический модуль упругости E_d , МПа	Коэффициент Пуассона μ
Суглинки М1 (20)	<u>400-2000</u> 1260	<u>200-550</u> 360	<u>0,20-0,54</u> 0,32	<u>170-1380</u> 830	<u>0,29-0,48</u> 0,43
Суглинки М2 (24)	<u>700-2000</u> 1440	<u>300-500</u> 380	<u>0,16-0,50</u> 0,28	<u>650-1620</u> 900	<u>0,33-0,49</u> 0,45
Супеси М3 (30)	<u>520-1700</u> 1180	<u>160-500</u> 360	<u>0,22-0,52</u> 0,31	<u>160-1600</u> 870	<u>0,31-0,48</u> 0,44
Супеси М4 (29)	<u>720-1500</u> 1130	<u>190-420</u> 320	<u>0,18-0,43</u> 0,29	<u>220-1050</u> 660	<u>0,39-0,48</u> 0,45
Суглинки и супеси (gQIdns) (25)	<u>1050-2000</u> 1700	<u>170-410</u> 310	<u>0,08-0,25</u> 0,19	<u>200-950</u> 635	<u>0,45-0,47</u> 0,48
Суглинки и глины (J _{3ox}) (14)	<u>950-1850</u> 1400	<u>240-340</u> 280	<u>0,15-0,39</u> 0,21	<u>300-600</u> 420	<u>0,47-0,48</u> 0,48

Примечание: см. табл. 2

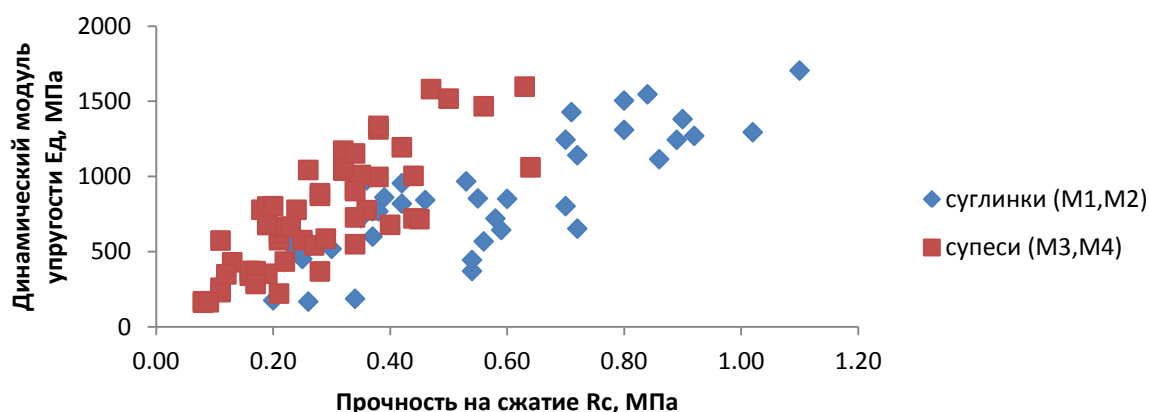


Рис. 9. Взаимосвязь динамического модуля упругости и прочности на сжатие модельных суглинков (М1,М2) и супесей (М3,М4)

Природные четвертичные грунты подчиняются тем же закономерностям: динамический модуль упругости увеличивается с ростом прочности структурных связей, показателей глинистости и снижается с повышением показателя

консистенции. Наблюдается повышение значений коэффициента Пуассона с ростом степени влажности, консистенции и уменьшением дисперсности (при одинаковой влажности).

По результатам множественного регрессионного анализа для природных моренных суглинков получены уравнения:

$$E_d = 1044R_c + 27W_L - 237 \quad (r=0,87), \quad \mu = -0,21e + 0,03I_L + 0,57 \quad (r=0,85).$$

Для всех модельных грунтов отмечается тесная связь коэффициента Пуассона со степенью влажности, которая описывается уравнением $\mu = 0,14S_r + 0,35$ ($r=0,79$), а для природных четвертичных суглинков $\mu = 0,06S_r + 0,43$ ($r=0,60$). Подобная взаимосвязь объясняется известной зависимостью способности глинистых грунтов к поперечному расширению от влажности.

Нахождение парных коэффициентов корреляции между коэффициентами поперечного расширения μ_0 (полученными в опытах по одноосному сжатию) и Пуассона для *модельных грунтов* не позволили выявить каких-либо значимых связей. При сопоставлении этих показателей для *природных моренных суглинков* получено уравнение связи $\mu_0 = 1,7\mu - 0,4$ ($r=0,71$).

Для модельных суглинков и супесей компрессионных исследований не проводилось, поэтому поиск взаимосвязей статических и динамических модулей деформации проводился только по результатам испытаний на одноосное сжатие. Было замечено, что взаимосвязь для рассматриваемых модельных образцов не зависит от дисперсности, поэтому было получено общее уравнение связи (рис. 10):

$$(r=0,85),$$

а для образцов природных суглинков и супесей:

$$(r=0,71).$$

Уравнения связи динамического модуля упругости с модулями, полученными по результатам одноосного сжатия, похожи, однако коэффициенты корреляции с начальными модулями сжатия выше, чем с относительными модулями деформации для модельных грунтов.

В случае природных образцов наблюдается обратное. По мнению автора наиболее информативна взаимосвязь динамического модуля упругости с начальным модулем сжатия, поскольку E_n более универсален для грунтов различной консистенции, отражает характер развития процесса деформирования, когда еще нет

разрушения структурных связей, и максимально сближены условия получения этих модулей.

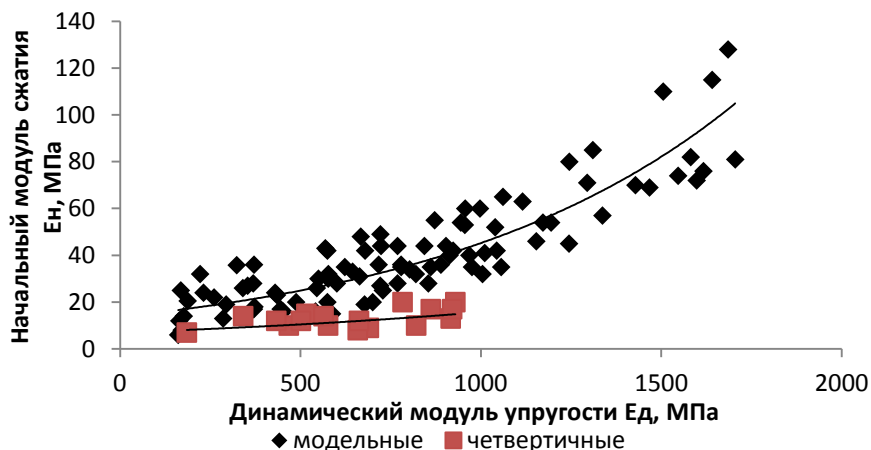


Рис. 10. Взаимосвязи начального модуля сжатия и динамического модуля упругости модельных и природных грунтов

Кроме результатов одноосного сжатия, были получены корреляционные взаимосвязи динамического модуля упругости и модуля деформации для природных четвертичных грунтов, рассчитанного по данным компрессионного сжатия (рис. 11):

$$(r=0,75).$$

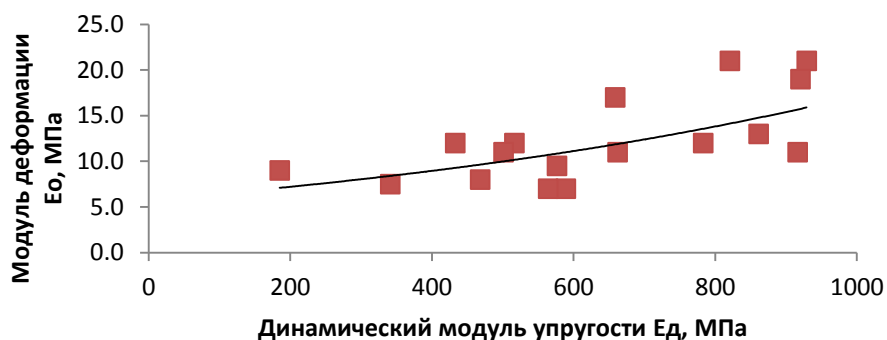


Рис. 11. Взаимосвязь динамического модуля упругости и модуля деформации, полученного по компрессионным испытаниям четвертичных грунтов

Приведенные в главе 4 уравнения взаимосвязей динамического модуля упругости и статического модуля деформации позволили сформулировать третье защищаемое положение.

Подобные взаимосвязи деформационных показателей для лессовидных суглинков были получены ранее (Бондарев, 1974; Миндель, 1975 и др.) методами наземной сейсморазведки. Это обстоятельство позволяет надеяться на возможности в

близком будущем оценивать модуль деформации природных дисперсных грунтов по данным полевых сейсморазведочных работ.

Выводы

1. Определены диапазоны изменения скоростей продольных V_p (1000-2000 м/с), поперечных V_s (200-700 м/с) волн и их соотношения V_s/V_p (0,08-0,42) для образцов природных глинистых грунтов при их ультразвуковом просвечивании. Показано, что скорости упругих волн зависят от комплекса факторов состава, строения, состояния и свойств глинистых грунтов.

2. Определяющее влияние на величины скоростей упругих волн в глинистых грунтах оказывают плотность, плотность скелета, прочность структурных связей, а также влажность и степень влажности, поскольку именно эти параметры отражают количество и тип контактов в грунте, его пустотность (пористость) и содержание различных категорий воды.

3. Скорости продольных волн в четвертичных глинистых грунтах с ростом влажности снижаются до влажности максимальной гигроскопической, имеют наименьшие значения в интервале до максимальной молекулярной влагоемкости и далее возрастают, таким образом, определен интервал влажности с наименьшими скоростями продольных волн. Скорости поперечных волн и отношение скоростей убывают с ростом влажности и степени влажности.

4. Установлено, что изменения статических и динамических показателей деформационных свойств образцов глинистых грунтов подчиняются общим закономерностям. Начальные модули сжатия, относительные модули деформации и общей деформации при статических (механических) испытаниях и динамический модуль упругости увеличиваются с ростом прочности структурных связей и дисперсности глинистых грунтов, уменьшаются с увеличением степени влажности и показателя текучести, что обусловлено влиянием числа и типа контактов между частицами. Коэффициенты поперечного расширения (при одноосном сжатии) и Пуассона (при ультразвуковом просвечивании) повышаются с ростом показателя текучести и при одинаковой влажности снижаются с ростом дисперсности.

5. Для природных моренных суглинков выявлена взаимосвязь между коэффициентом поперечного расширения и коэффициентом Пуассона по линейному закону ($\mu_0=1,7\mu-0,4$), позволяющая по данным ультразвукового просвечивания

оценивать трудно определяемый для глинистых грунтов коэффициент поперечного расширения μ_0 .

6. Получены уравнения взаимосвязи динамического модуля упругости с начальным модулем сжатия, относительным модулем деформации (по результатам одноосного сжатия) и модулем деформации (по компрессионным испытаниям), описываемые экспоненциальными законами как для модельных, так и для природных четвертичных грунтов. Предлагаемый методический подход и полученные корреляционные соотношения могут использоваться для предварительной оценки показателей деформационных свойств моренных суглинков на основании данных о скоростях упругих волн.

Список публикаций автора по теме диссертационной работы

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Пиоро Е.В., Ошкин А.Н. Взаимосвязи акустических характеристик и показателей физических и деформационных свойств глинистых грунтов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2011. №6. С.71-74.

2. Пиоро.Е.В., Ошкин А.Н., Тырина Т.С. Влияние влажности на скорости распространения упругих волн в глинистых грунтах // Геофизика. 2014. N1. С. 57-62.

Статьи и тезисы докладов в сборниках трудов конференций

3. Пиоро Е.В. Акустические свойства глинистых грунтов // Материалы X научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.:ПНИИИС, 2014.

4. Пиоро Е.В. Влияние условий нагружения на деформационные характеристики модельного глинистого грунта // Материалы XVIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2011». М.:МГУ, 2011. Lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2011/1197/21958_bc7f.pdf

5. Пиоро Е.В. Об определении показателей деформационных свойств глинистых грунтов при одноосном сжатии // Труды XLIX международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс». Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2011. С. 128.

6. Пиоро Е.В. Динамический модуль упругости и модуль общей деформации модельных глинистых грунтов // Материалы пятнадцатых Сергеевских чтений, молодежной конференции «Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты)». М.: Изд-во РУДН, 2013, С. 75-79.

7. Пиоро Е.В., Ошкин А.Н., Бутина Е.И. Влияние нагрузки уплотнения на физико-механические свойства модельных глинистых грунтов // Материалы XVII

- Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010». М.:МГУ, 2010. Lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2010/06.htm
8. *Пиоро Е.В., Ошкин А.С., Таракановский М.К.* О скоростях распространения упругих волн в глинистых грунтах // Материалы VI научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.:ПНИИИС, 2010. С. 31-35.
9. *Пиоро Е.В., Ошкин А.С., Тырина Т.С.* О показателях влажности и скоростях распространения упругих волн в глинистых грунтах // Труды VIII научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.:ПНИИИС, 2012. С. 169-172.
10. *Пиоро Е.В., Тырина Т.С.* Влияние влажности на скорости упругих волн в глинистых грунтах // Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2012». М.:МГУ, 2012. Lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2012/1725/21958_19aa.pdf
11. *Пиоро Е.В., Тырина Т.С.* Влияние плотностных свойств глинистых грунтов на скорости распространения упругих волн // 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.