

**Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова
Кафедра инженерной и экологической геологии**

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, грунтоведение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научные руководители:
доктор физико-математических наук
профессор Владов Михаил Львович,
кандидат геолого-минералогических наук
доцент Николаева Светлана Казимировна

Москва, 2014

Оглавление

| | |
|--|-----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Современные представления о деформационных свойствах глинистых грунтов и лабораторных методах их изучения | 9 |
| 1.1. Деформации в грунтах | 9 |
| 1.1.1. Виды деформаций..... | 9 |
| 1.1.2. Связь между напряжениями и деформациями в грунтах | 10 |
| 1.2. Деформационные свойства глинистых грунтов..... | 15 |
| 1.2.1. Влияние внешних факторов на деформируемость глинистых грунтов..... | 18 |
| 1.2.2. Влияние внутренних факторов на деформируемость глинистых грунтов | 19 |
| 1.3. Инженерно-геологические лабораторные методы изучения деформационных свойств глинистых грунтов и анализ получаемых данных..... | 24 |
| 1.4. Геофизические исследования деформационных свойств глинистых грунтов | 41 |
| 1.4.1. Возможности использования сейсмоакустических методов для инженерно-геологического изучения грунтов..... | 41 |
| 1.4.2. Использование сейсмоакустических методов для изучения деформационных свойств дисперсных грунтов | 52 |
| Выводы по главе..... | 61 |
| Глава 2. Выбор объектов и методик исследования | 63 |
| 2.1. Обоснование выбора объектов исследования..... | 63 |
| 2.2. Методики экспериментальных исследований | 69 |
| 2.3. Характеристика объектов исследования | 83 |
| Выводы по главе..... | 95 |
| Глава 3. Закономерности распространения упругих волн в образцах глинистых грунтов на основании анализа их скоростей..... | 97 |
| 3.1. Влияние дисперсности глинистых грунтов на распространение упругих волн | 98 |
| 3.2. Влияние плотности и пористости..... | 100 |
| 3.3. Влияние влажности и степени влажности | 115 |
| 3.4. Влияние действующих напряжений..... | 131 |
| 3.5. Влияние прочности структурных связей..... | 133 |

| | |
|--|-----|
| 3.6. Сравнительный анализ факторов, влияющих на скорости распространения упругих волн в образцах глинистых грунтов | 134 |
| Выводы по главе..... | 142 |
| Глава 4. Сравнение показателей деформационных свойств глинистых грунтов, полученных лабораторными методами при механическом нагружении и по данным ультразвукового просвечивания | 144 |
| 4.1. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным компрессионных испытаний | 144 |
| 4.2. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным одноосного сжатия..... | 150 |
| 4.3. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным ультразвуковых испытаний | 159 |
| 4.4. Анализ данных по коэффициенту поперечного расширения и коэффициенту Пуассона..... | 167 |
| 4.5. Соотношения модуля общей деформации, начального модуля сжатия, относительного модуля сжатия и динамического модуля упругости исследуемых образцов глинистых грунтов | 169 |
| Выводы по главе..... | 171 |
| Основные выводы..... | 172 |
| Список литературы..... | 174 |
| Приложение 1. Результаты исследования оптимальных нагрузки и влажности уплотнения модельных грунтов..... | 185 |
| Приложение 2. Взаимосвязь напряжений и деформаций модельного суглинка при разных скоростях нагружения | 187 |
| Приложение 3. Расчетные и теоретические значения критерия Уилко-Шапиро, математические ожидания и стандартные отклонения..... | 188 |
| Приложение 4. Характеристика гранулометрического состава грунтов | 191 |
| Приложение 5. Интегральные кривые гранулометрического состава исследованных образцов грунта | 193 |
| Приложение 6. Количественные характеристики микростроения модельных грунтов | 195 |
| Приложение 7. Влажностные характеристики грунтов | 197 |
| Приложение 8. Изменение состояния и физических свойств модельных суглинков и супесей по мере их дегидратации..... | 199 |

| | |
|--|-----|
| Приложение 9. Кривые изменения плотности, плотности скелета, пористости и степени влажности модельных суглинков и супесей при дегидратации | 201 |
| Приложение 10. Показатели состояния и физических свойств грунтов | 202 |
| Приложение 11. Ультразвуковые характеристики грунтов и данные одноосного сжатия . | 208 |
| Приложение 12. Диаграммы изменения скоростей продольных волн для грунтов разного компонентного состава | 214 |
| Приложение 13. Результаты компрессионных испытаний природных грунтов..... | 216 |
| Приложение 14. Диаграммы изменения динамического модуля упругости для грунтов разного компонентного состава..... | 218 |

Введение

Актуальность работы. 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.

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 решались 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.

Объектами исследования на первом этапе стали модельные глинистые грунты, приготовленные из моренного суглинка (gQ_{1dns}) нарушенной структуры, отобранного на территории г. Москвы, с песчаными добавками и без них. Выбор модельных глинистых грунтов был обоснован необходимостью получить образцы с фиксированными исходными состоянием и свойствами.

На втором этапе изучение деформационных свойств проводилось на образцах природных глинистых грунтов (суглинках донской морены (gQ_{1dns}) и юрских суглинках и глинах (J_3ox)), отобранных на территории Москвы и Московской области.

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.

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.

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.

Защищаемые положения

1. При близких значениях плотности, пористости и влажности грунтов скорости продольных волн глинистых грунтов 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.

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.

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), 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 лаборатории механики грунтов, лаборатории грунтоведения, 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.

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

1.1. Деформации в грунтах

1.1.1. Виды деформаций

В физике под деформацией понимается изменение объема и формы твердого тела (Ландау и др., 1969). В общем виде у разных авторов подход к определению деформаций грунтов несколько отличается в зависимости от области научных интересов (М.Н.Гольдштейн, Б.И.Далматов, Б.И.Дидух, Н.А.Цытович и др.). В инженерной геологии деформацией называется «изменение относительного положения частиц (твердых структурных элементов грунта), связанное с их перемещением. В общем случае это перемещение может быть вызвано разными причинами — термическим расширением и сжатием, фазовыми переходами, действием механических напряжений и др. Под действием механических напряжений возникают механические деформации» (Грунтоведение, 2005, с. 460).

В инженерной геологии существует подход к анализу взаимосвязи напряжений и вызванных ими деформаций, согласно которому различные виды напряжений вызывают разные механические деформации. «В этой связи выделяют: линейные деформации (ϵ), вызванные нормальными напряжениями (σ); касательные (или сдвиговые) деформации (γ), вызванные касательными напряжениями (τ). Линейные деформации могут быть положительными, т.е. деформациями сжатия, и отрицательными, т.е. деформациями растяжения» (рис. 1.1) (Грунтоведение, 2005, с.461).

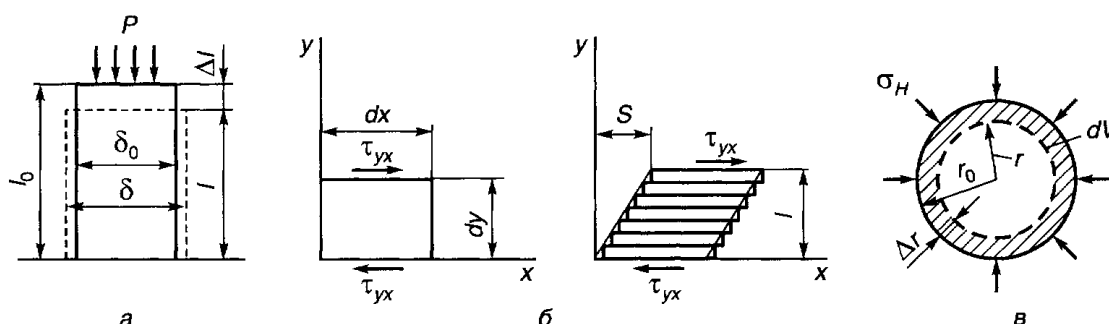


Рис. 1.1. Деформации тела при одноосном сжатии (а), сдвиге (б) и всестороннем сжатии (в) (Грунтоведение, 2005, с. 461)

«Компоненты нормальных (σ_x , σ_y и σ_z) и касательных ($\tau_{xy}=\tau_{yx}$, $\tau_{yz}=\tau_{zy}$ и $\tau_{zx}=\tau_{xz}$) напряжений вызывают соответствующие им компоненты нормальных (ϵ_x , ϵ_y и ϵ_z) и касательных ($\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$, $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$ и $\gamma_{zx} = \gamma_{xz}$) деформаций. При действии на тело всесторонних нагрузок (например, гидростатического обжатия ($\sigma_v=\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z$)) в нем возникают объемные деформации (ϵ_v). Кроме того, могут возникать механические деформации изгиба и кручения, формирующиеся

под действием внешних нагрузок в зависимости от способа их приложения к телу» (Грунтоведение, 2005, с. 461).

По предложению Коши, отношение величины Δl , на которую изменяется в результате деформации расстояние между параллельными сечениями стержня при простом сжатии, к первоначальному расстоянию между ними l_0 , рассматривается как количественная мера относительной линейной деформации ε элемента тела между двумя точками (рис. 1.1, а). Она измеряется в процентах или долях единицы. Мерой касательных деформаций «является относительная деформация сдвига (γ), равная тангенсу угла перекося: $\gamma = S/l = \operatorname{tg} \alpha$ (см. рис. 1.1, б), измеряется в долях единицы. Мерой объемных деформаций тела является относительная объемная деформация (ε_v), которая равна сумме относительных линейных деформаций по трем координатным осям: $\varepsilon_v = \Delta V/V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$, где ΔV — абсолютное изменение объема, V — первоначальный объем тела» (см. рис. 1.1, в) (Грунтоведение, 2005, с. 461).

1.1.2. Связь между напряжениями и деформациями в грунтах

Одним из основных вопросов в механике грунтов является «установление количественной зависимости между напряжениями и соответствующими им деформациями, т.е. установление функций вида $\varepsilon=f(\sigma)$, $\gamma=f(\tau)$ или $\varepsilon_v=f(\sigma)$ » (Грунтоведение, 2005, с. 461). В общем случае, как показывают многочисленные исследования, зависимость между деформациями и напряжениями для грунтов будет нелинейной (Терцаги, 1961; Гольдштейн, 1971; Ломтадзе, 1972; Цытович, 1973; Дашко, 1987; Дидух, 1990 и др.). Но, по мнению Н.А.Цытовича и многих других специалистов, при не очень больших изменениях внешних давлений (порядка 0,1-0,3 МПа, а для плотных и твердых грунтов и до 0,5-0,7 МПа) «с достаточной для практических целей точностью зависимость между деформациями и напряжениями может приниматься линейной, что значительно упрощает расчеты и не вносит в них недопустимых погрешностей». Эта зависимость известна в механике как закон Гука (Цытович, 1973, с. 205).

Теория линейного деформирования грунта базируется на предположении, что при однократном нагружении (или разгрузке) зависимость между напряжениями и деформациями в грунтах линейна. Кроме того, при нагружении рассматривается лишь общая деформация грунта без деления ее на упругую и пластическую составляющие. Первое допущение обеспечивает возможность использования для расчетов напряжений в массиве грунта аппарата теории упругости, а второе – при известных напряжениях рассчитывать конечные деформации основания (Ухов и др., 1994). Как отмечает Б.И.Дидух (1990), в литературе описано довольно много случаев согласия данных натурных измерений с прогнозами, основанными на решениях теории упругости. Однако, как отмечает Б.И.Далматов (1988), вследствие наличия остаточных

деформаций грунта решения теории упругости для изотропных тел можно использовать лишь при одноразовом нагружении основания.

Закон Гука для нормальных, касательных и объемных напряжений записывается следующим образом:

$$\sigma = E\varepsilon, \tau = G\gamma \text{ и } \sigma_v = K\varepsilon_v,$$

где E — модуль Юнга (или модуль упругости), Па; G — модуль упругого сдвига, Па; K — модуль объемной упругости, Па.

При одноосном сжатии образца под напряжением σ_z происходит изменение как продольных, так и поперечных его размеров (см. рис. 1.1, *a*). При этом «связь продольных (ε_z) и поперечных (ε_x) деформаций с напряжением в общем виде характеризуется зависимостями, представленными на рис. 1.2. По мере роста напряжения деформация увеличивается прямо пропорционально, и до точки A (или A') выполняется закон Гука, который для продольных и поперечных деформаций записывается в виде: $\sigma_z = E\varepsilon_z$, а также $\sigma_x = E\varepsilon_x$. Напряжение $\sigma_{\text{упр}}$, соответствующее точке A (или A'), называется *пределом пропорциональности*, совпадающим с *пределом упругости* материала данного тела. В общем случае они могут не совпадать. В случае нелинейной упругости тело может деформироваться упруго не до точки A , а до точки B (см. рис. 1.2). Несмотря на это, на участке AB закон Гука уже не выполняется» (Грунтоведение, 2005, с. 462). В физике (и механике грунтов), «чтобы выразить связь между тензорами напряжений, недостаточно одного уравнения Гука, а необходимо еще одно соотношение, выражающее пропорциональность между поперечными и продольными деформациями:

$$\varepsilon_x = -\mu \varepsilon_z,$$

где μ , — *коэффициент Пуассона* (безразмерная величина)» (Троицкая, 1961, с. 22). Для большинства материалов его значение лежит в интервале 0,25 до 0,4 (Беломестных, 2003). Значение $\mu=0$ достигается у пористых тел (например у пробки), не меняющих при растяжении своих поперечных размеров (Ландау и др., 1969; Троицкая, 1961). В работе Кирничанского (1989) отмечается снижение μ с уменьшением текучести образцов. При этом речь идет о деформациях, близких к упругим, а при сильном развитии неупругих явлений значения могут быть более 0,5. По мнению Г.Т.Кирничанского (1989, с. 46) «коэффициент Пуассона рассматривается как величина, характеризующая уплотнение материала в начале нагружения, деформирование без изменения объема при нагрузках, близких к пределу прочности, и разуплотнение вследствие накопления повреждений и хрупкого разрушения». Таким образом, значения μ близкие к 0,5 свидетельствуют о той стадии деформирования, которая связана с возникновением и развитием нарушений сплошности хрупких и хрупко-пластичных образцов или же существенными объемными изменениями пластичных образцов.

Для области справедливости закона Гука выполняются следующие соотношения, устанавливающие связь между различными константами упругости (Ландау, 1969; Цытович, 1973; Грунтоведение, 1983 и др.):

$$K = E/3 (1 - 2 \mu) = EG/3 (3G - E);$$

$$G = E/2 (1 + \mu) = (9K - E)/3KE;$$

$$E = 9KG/(3K + G) = 3K (1 - 2 \mu);$$

$$\mu = (E - 2G)/2G = (3K - E)/6K.$$

В общем случае деформация образца складывается из двух частей — обратимой и необратимой (рис. 1.3):

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \varepsilon_{\text{обр}} + \varepsilon_{\text{ост}},$$

где $\varepsilon_{\text{общ}}$ — общая деформация образца (см. рис. 1.3, отрезок ОВ); $\varepsilon_{\text{обр}}$ — обратимая, или упругая, деформация (отрезок ВБ); $\varepsilon_{\text{ост}}$ — остаточная, или необратимая, пластическая деформация (отрезок БО). Аналогичные соотношения имеют место для сдвиговых (γ) и для объемных (ε_v) деформаций:

$$\gamma_{\text{общ}} = \gamma_{\text{обр}} + \gamma_{\text{ост}}; \varepsilon_v_{\text{общ}} = \varepsilon_v_{\text{обр}} + \varepsilon_v_{\text{ост}}.$$

Кроме того, эти соотношения имеют место и для различных компонентов деформаций, т.е. для трех компонентов линейных и шести компонентов касательных деформаций (Грунтоведение, 2005).

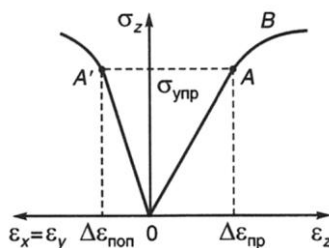


Рис. 1.2. Зависимость продольных и поперечных деформаций при одноосном сжатии (Грунтоведение, 2005)

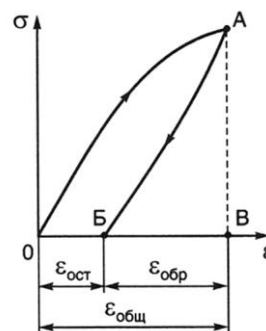


Рис. 1.3. Зависимость напряжения и деформаций образца при нагрузке (OA) и разгрузке (AB) (Грунтоведение, 2005)

Считается, что обратимые деформации являются следствием упругих свойств тела. Причинами обратимости деформаций при снятии напряжений в грунтах являются: проявление сил взаимного отталкивания между атомами в кристаллической решетке тел при их механическом «сближении»; проявление упругих свойств газов и жидкостей в порах (микропустотах) грунта; возникновение сил «расклинивающего» давления в дисперсных грунтах. По мнению М.П. Лысенко (1980), обратимость деформаций происходит вследствие наличия водноколлоидных пленок, защемленных пузырьков воздуха, чешуйчато-пластинчатых минералов и осмотического впитывания воды в сильно гидрофильных глинах.

«Необратимые деформации являются результатом проявления пластических свойств тела. Основными причинами необратимости пластических деформаций грунтов являются: необратимое (невосстанавливаемое) разрушение отдельных структурных связей при деформировании; необратимое смещение частиц (кристаллов, зерен, обломков пород и др.); отжатие воды и газов из пор; постепенное накопление микродефектов в структуре грунта, которые сами по себе не восстанавливаются. Необратимые, или пластические, деформации в наибольшей степени характерны для дисперсных, особенно пластичных (по консистенции) грунтов, со слабыми коагуляционными структурными связями. Проявление пластических свойств тела обуславливает нелинейность связи напряжений и деформаций» (Грунтоведение, 2005, с. 463). Причины упругих и остаточных деформаций приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Основные физические причины деформаций грунтов (по Б.И.Далматову, 1988)

| Виды деформации | Физические причины деформаций |
|-----------------------------|--|
| Упругие: искажения формы | действие молекулярных сил упругости, развивающихся при искажении структурной решетки твердых частиц и цементирующего коллоидного вещества |
| изменения объема | действие молекулярных сил упругости замкнутых пузырьков воздуха, тонких пленок воды и твердых частиц |
| Остаточные: уплотнения | разрушение скелета грунта и отдельных его частиц в точках контактов, взаимный сдвиг частиц, выдавливание поровой воды, обуславливающие уменьшение пористости (компрессию грунта) |
| пластические | развитие местных сдвигов в областях предельного напряженного состояния |
| просадки | резкое нарушение природной структуры грунта при изменении условий его существования (замачивание лессов, оттаивание мерзлых грунтов и т.д.) |
| набухания | проявление расклинивающего эффекта в результате действия электромолекулярных сил и выделение из поровой воды растворенного в ней газа при понижении давления |

Для характеристики деформируемости грунтов, кроме указанных выше упругих констант, применяют еще и модуль общей деформации. *Модуль общей деформации* (E_0) определяется соотношением:

$$E_0 = \sigma / \varepsilon_{\text{общ}},$$

тогда как модуль упругости вычисляется из соотношения $E = \sigma / \varepsilon_{\text{обр}}$ (см. рис. 1.3). Таким образом, всегда $E_0 < E$, поскольку всегда $\varepsilon_{\text{общ}} > \varepsilon_{\text{обр}}$. Модуль общей деформации E_0 не является константой для данного материала, поскольку зависит от диапазона напряжений, при которых он определяется. Поэтому для E_0 всегда указывается диапазон напряжений, для которых он был рассчитан, а сравнивать E_0 между собой имеет смысл лишь в одинаковых диапазонах напряжений. С этой неопределенностью значения модуля общей деформации

связаны сложности при сопоставлении фактических данных разных авторов (Савич, Яценко, 1979; Никитин, 1981 и др.).

«Модуль упругости, определяемый в статических условиях (при однократном нагружении тела), отличается от аналогичного модуля, определяемого в динамических условиях (при многократном нагружении или по скорости прохождения упругих волн). Для того чтобы подчеркивать эти различия, используют два показателя: *статический модуль упругости* (E_c) и *динамический модуль упругости* (E_d). При этом для всех перечисленных модулей имеет место соотношение: $E_d > E_c > E_o$ » (Грунтоведение, 1983; Грунтоведение 2005, с. 263).

Таким образом, «деформационные свойства характеризуются упругими константами E , G , K , μ (определяемыми в области линейной связи напряжений и деформаций), а так же параметрами и уравнениями, описывающими нелинейную взаимосвязь напряжений и деформаций» (Грунтоведение, 2005, с. 460).

Если рассматривать грунтовый массив как упругое тело, то все проблемы описания его естественного состояния и поведения при механическом нагружении сводятся к определению упругих характеристик и действующих на массив сил (внешних и внутренних). Благодаря хорошо разработанному аппарату теории упругости описание массива грунтов, как упругого тела, имеет значительные преимущества: облегчены как методические вопросы обработки первичной информации, так и сам процесс получения конечного результата — распределения полей деформаций и напряжений в массиве.

Грунтовый массив неоднороден (грунты, его слагающие, часто имеют заметно отличающиеся друг от друга упругие характеристики и представляют собой тела различного размера и различной формы). Отсюда возникает довольно сложная проблема, которую называют «проблемой осреднения». Совершенно ясно, что упругие характеристики грунтов, составляющих массив, не дают нам представления об упругих характеристиках массива как целого. Необходимо знать, какую долю объема занимают те или иные грунты, форму и размеры тел, принадлежащих разным грунтам, и жесткость связей между ними. Но, даже получив эти сведения, трудно перейти к средним упругим характеристикам, поскольку не существует теоретически обоснованной процедуры нахождения средних характеристик для этого случая (Лысенко, 1980).

Воспользоваться подобным приемом применительно к массиву грунтов не просто прежде всего потому, что размеры такого тела очень велики, а основания для определения испытываемого его объема (части) представляются недостаточно ясными. Дело в том, что линейный размер испытываемого объема в массиве должен быть увязан с характерным масштабом инженерного объекта, ради которого выясняются характеристики массива, а также

с характерным масштабом неоднородностей. Определенные значения будут иметь только тогда смысл, когда в пределах исследуемого объекта окажется множество разнородных элементов, как это имеет место при испытании поликристаллического тела. Но в массиве грунтов имеются часто разномасштабные элементы, так что, опираясь только на геометрические соображения, выбрать надлежащий размер испытываемого тела практически невозможно.

Как отмечают Родионов В.Н., Сизов В.А., Цветков В.М. (1986, с. 56), «оставляя без внимания многие принципиальные вопросы, определение механических характеристик (в том числе и упругих) производится на небольших образцах, отбираемых либо при бурении скважин, либо при проходке подземных выработок. Ясно, что опытные данные, получаемые при испытании образцов, можно использовать только для характеристики отдельных видов грунтов, но не массива. Упругие характеристики могут быть получены для массива путем измерения скорости упругих волн в нем. Однако и здесь требуется соблюсти определенные условия по однородности и по частотному спектру упругих волн, чтобы можно было правильно интерпретировать опытные результаты».

1.2. Деформационные свойства глинистых грунтов

Изучением деформационных свойств грунтов занимаются довольно давно. В нашей стране основателем школы механики грунтов считается Н.М.Герсеванов, его активная деятельность относится к 20-30 годам XX века. Большой вклад в развитие науки внесли такие ученые как С.С.Вялов, 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. Вопросы деформирования грунтов, по мнению автора, наиболее полно освещены в работах Н.А.Цытовича.

Наиболее сложно развивается процесс деформирования в глинистых грунтах. В работе Б.И.Дидука, подробно описана история развития исследований по теории «упрочнения» грунта (Дидух, 1990). Как отмечают С.Б.Ухов и др. (1994, с. 66), «объемные деформации в глинистых грунтах связаны с более плотной переупаковкой частиц, окруженных пленками связанной воды, с уменьшением объема пор, отжатием поровой воды и упругим сжатием защемленных пузырьков воздуха, а сдвиговые — главным образом, с взаимным перемещением и перекомпоновкой частиц, окруженных гидратной оболочкой». По Р.С.Зиангирову (1979), трудно выделить влияние отдельных факторов на деформируемость грунта, можно говорить лишь о преобладании того или иного фактора. Как отмечает С.Б.Ухов с соавторами (1994, с. 66), «интенсивность проявления деформаций в глинистых грунтах в большой мере зависит от характера структурных связей и величины действующих нагрузок. Даже слабо уплотненные водные осадки

глинистых грунтов с коагуляционными (преимущественно физико-химической природы) связями при небольших нагрузках, не превышающих структурную прочность, могут проявлять упругие свойства, т. е. почти полностью восстанавливаться после снятия нагрузки. Дальнейшее увеличение нагрузки вызывает постепенное разрушение структурных связей и интенсивное уплотнение грунта».

«Разрушенные коагуляционные связи со временем восстанавливаются, и после уплотнения глинистого грунта или в ходе тиксотропных преобразований может наблюдаться его упрочнение. Размеры пор в глинистых грунтах крайне малы, поэтому процесс консолидации в них протекает очень медленно. (Замедленная консолидация в глинах обусловлена не столько малым размером пор, сколько трудностью отжатия из них воды, так как существенная ее часть прочно связана с поверхностью твердых частиц и с трудом сдвигается и удаляется – прим. автора.) Деформации могут не стабилизироваться в течение многих месяцев, лет, даже десятилетий. Также медленно могут развиваться и процессы ползучести, связанные с взаимным смещением частиц, окруженных водными пленками, поворотом, изгибом и разрушением отдельных частиц и агрегатов» (Ухов и др. 1994, с. 66).

Подробно процесс сжатия грунта описан в работе Н.А.Цытовича (1963). Согласно ему, сжимаемость грунтов обуславливается следующими основными физическими причинами:

- 1) упругостью кристаллической решетки частиц, этот фактор незначителен и может не учитываться в инженерных расчетах;
- 2) уплотнением грунтов, т.е. уменьшением их пористости при более компактной упаковке твердых частиц;
- 3) изменениями физического состояния, сопровождающимися уменьшением объема грунта и перегруппировкой твердых частиц.

Многие авторы (Цытович, 1973; Зиангиров, 1979 и др.) отмечают тот факт, что дисперсные грунты, в отличие от скальных, характеризуются гораздо меньшей упругостью, которая проявляется у большинства из них лишь при незначительных начальных напряжениях, превышение которых приводит к появлению пластических деформаций. По данным В.М.Улицкого, А.Г.Шашкина (1999, с. 85), со ссылкой на Б.И.Далматова и Л.П.Ягданову (1977), упругие деформации глинистых грунтов составляют 5,5%. Однако по Ф.Г.Габдрахманову (1981), при компрессионных испытаниях глинистых грунтов были получены обратимые деформации до 50% (В.М.Улицкий, А.Г.Шашкин, 1999). Изучением количественной оценки обратимости деформаций грунтов занимались и другие авторы (табл. 1.2).

Диапазон изменения характеристик упругости дисперсных грунтов довольно широк и показан ниже в табл. 1.3 (см. раздел 1.2.2). Величины статических и динамических модулей

различны. Значения модулей упругости дисперсных грунтов на несколько десятичных порядков ниже, чем у скальных, а коэффициент Пуассона выше.

Таблица 1.2. Восстановление грунтов при разгрузке (по В.М.Улицкому, А.Г.Шашкину, 1999)

| Исследователи | Вид испытаний | Исследуемые грунты | Деформации, % | |
|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| | | | остаточные | восстанавливающиеся |
| А.З.Попов (1974) | компрессионные | суглинки | 90 | 10 |
| Б.И.Далматов Я.П.Ягданова (1977) | лабораторные компрессионные | суглинки | 70 | 30 |
| В.М.Чикишев (1977) | штамповые | водонасыщенные суглинки | 70 | 30 |
| Е.С.Утепов (1981) | штамповые | суглинки | 69 | 31 |

Кроме того, отмечается, что для большинства типов дисперсных грунтов характерно проявление нелинейной упругости (упругое деформирование тела происходит до точки В (см рис. 1.2), на участке АВ закон Гука не выполняется). Поэтому еще раз необходимо подчеркнуть, что величины модулей общей деформации зависят от диапазона нагрузок, в которых они определяются.

Деформационные свойства глинистых грунтов в лабораторных условиях оценивают, изучая *компрессионную сжимаемость* (см. раздел 1.3). Она осуществляется в основном за счет изменения структуры и текстуры грунта при уплотнении без возможности бокового расширения: разрушения части структурных связей и микроагрегатов, смыкания крупных пор, переориентации частиц при одновременном уменьшении пористости грунта, отжатия из пор воды и воздуха (рис. 1.4).

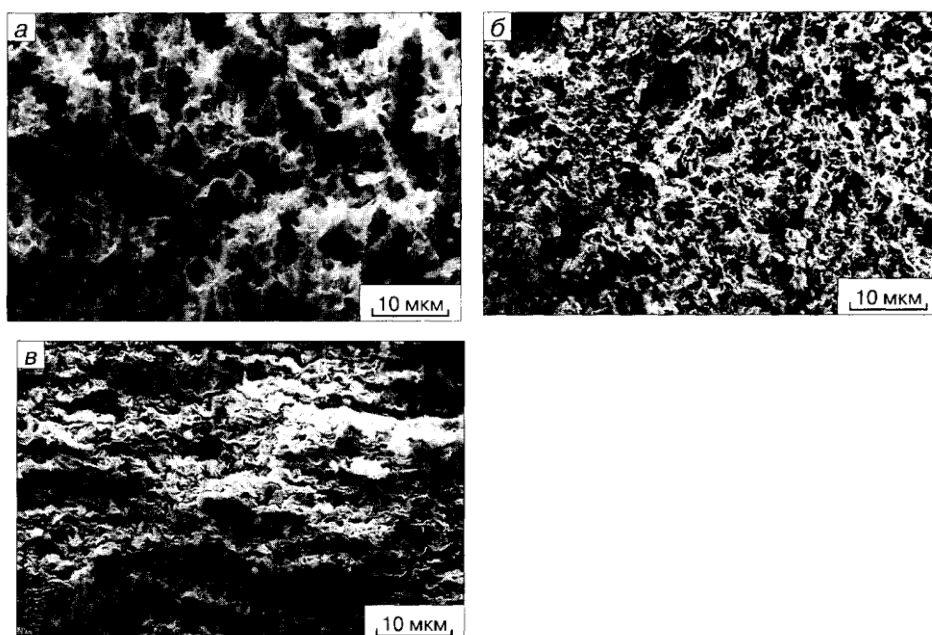


Рис. 1.4. Изменение микростроения монтмориллонитовой глины при ее компрессионном уплотнении от исходной влажности 400% (а) до влажности 200% (б) и 60% (в) (Грунтоведение, 2005)

При этом дробления первичных частиц не происходит, при возрастающей нагрузке они все более ориентируются в направлении, перпендикулярном прикладываемому давлению (Mitchell, 1976; Осипов, 1979; Осипов, Соколов, Румянцева, 1989).

1.2.1. Влияние внешних факторов на деформируемость глинистых грунтов

Наиболее полно влияние внешних условий на деформируемость глинистых грунтов описано в работах Р.С. Зиангирова (1979), В.А.Королева, Р.И.Злочевской, В.И.Осипова (1985) и др.; выделяются следующие действующие факторы.

Влияние статического давления. При изучении роли статического давления автор опирается на изучение коэффициента относительной сжимаемости при компрессии в зависимости от давления для различных материалов. Практически для всех тел при увеличении давления наблюдается повышение сжимаемости. Сжимаемость глинистого грунта в условиях дренирования в общем случае значительно превосходит сжимаемость слагающих его компонентов. Однако, как отмечает Р.С. Зиангиров (1979, с. 28), «при давлении, превышающем $5 \cdot 10^3$ кгс/см² (примерно 500 МПа), сжимаемость глин уже приближается к сжимаемости минеральных частиц». Сравнение поведения различных моделей и грунтов под нагрузкой показывает, что сжимаемость высокодисперсной глинистой системы при компрессии по своему механизму аналогична поведению под давлением плоских дисков, разделенных вязким маслом. Таким образом, можно говорить о вязкопластичном сопротивлении сближению частиц с нарушенными природными структурными связями.

Влияние положительных температур. Обычно в строительстве значимость этого фактора при проектировании сооружений не учитывается, но иногда влияние изменения положительных температур может приводить к дополнительным деформациям грунтов, причем как положительным (термоусадка), так и отрицательным (увеличение объема), а также к увеличению растворяющей и корродирующей способности поровой воды.

Повышение температуры увеличивает кинетическую энергию атомов и молекул кристаллической решетки минералов и молекул воды, изменяя ее структуру. Изучением влияния повышения температуры на деформационные свойства грунтов занимались многие авторы (Месчан, 1972; Андреичев и др., 1974; Королев, Злочевская, Осипов, 1985 и др.). Первые обобщенные данные представлены в работе Р.С. Зиангирова (1979), который отмечает значительную роль этого фактора. Влияние температуры на физико-механические свойства глин осуществляется через изменение величины расклинивающего давления связанной воды и характера структурных связей между частицами грунта. Наиболее существенные температурные изменения физико-механических свойств наблюдаются в глинах с преобладанием коагуляционных контактов. В уплотненных глинах с преобладанием точечных и фазовых контактов между частицами влияние температуры на деформационные свойства в

условиях отсутствия усадки будет несущественно. В основании сооружений, являющихся постоянным источником тепла, температура может существенно отличаться от фоновой. Под действием повышенных положительных температур в глинистых грунтах происходит термоусадка с уменьшением влажности и пористости. Неравномерная термоусадка грунтов обуславливает дифференциальную осадку сооружений и их разрушение. В литературе описаны случаи аварий и разрушения зданий и сооружений в результате термоусадки глинистых грунтов (Котлов, 1977).

Кроме указанных выше факторов на деформируемость глинистых грунтов влияют ***скорость нагружения и условия дренирования.***

В недренированных условиях прочность образцов выше, чем в дренированных, и графики развития деформаций при нагружении имеют более пологий вид. По М.П.Лысенко (1980, с. 131) сжимаемость грунтов возрастает с «увеличением скорости и при приложении более высоких ступеней нагрузки». Наименьшая сжимаемость достигается при последовательном медленном приложении небольших нагрузок. В этом случае структурные связи нарушаются в минимальной степени и наиболее правильно моделируются условия нагружения грунта под сооружениями.

1.2.2. Влияние внутренних факторов на деформируемость глинистых грунтов

Влияние ***минерального состава*** пылеватых и глинистых грунтов на их деформационные свойства (и в том числе на компрессионную сжимаемость) в чистом виде установить сложно, но «при прочих равных условиях оно проявляется через взаимосвязь состава твердого компонента с дисперсностью и гидрофильностью. Наличие в грунтах высокодисперсных и гидрофильных глинистых минералов (минералов группы смектитов), а также гумуса повышает их сжимаемость, и наоборот. Поэтому особенно большой сжимаемостью обладают торф, заторфованные грунты и монтмориллонитовые глины» (Грунтоведение, 2005, с. 475). Влияние минерального состава на сжимаемость глин отмечено многими исследователями (Крюков, 1971; Осипов, 1979; Зиангиров, 1979 и др.).

Влияние жизнедеятельности микроорганизмов. В литературе имеются сведения о деформации зданий за счет биохимического выветривания (Зиангиров, 1979). Работами Р.Э.Дашко и ее учеников убедительно доказано, что биохимические процессы в подземном пространстве городов, вызванные активной жизнедеятельностью природной и привнесенной микробиоты, оказывают существенное влияние на состояние и свойства грунтов. Так, в г. Санкт-Петербурге при контаминации моренных супесей и суглинков стоками, содержащими органические соединения и микробиоту, отмечается заметное снижение модуля общей деформации до 2,4-3,6 МПа по сравнению с 40-50 МПа для незагрязненных грунтов. При

загрязнении моренных отложений особенно в бескислородных условиях обнаружена выраженная склонность к пластическим деформациям. В окислительных условиях при фоновом содержании суммарного белка (показателя численности микроорганизмов) менее 30 мкг/г модуль общей деформации глинистых морен превышает 25 МПа; в восстановительной обстановке при увеличении суммарного белка до 65-136 мкг/г модуль общей деформации снижается до 2-8 МПа. В этом последнем случае в глинистых грунтах проявляются внешние признаки оглеения (сизый цвет), диспергация, аномальная микробиологическая пораженность, часто повышенное содержание биогазов (Дашко, 2003). Даже незначительное накопление малорастворимых газов (CH_4 , N_2 , H_2) в песчано-глинистых грунтах вызывает изменение их напряженно-деформированного состояния. Защемленные в порах мельчайшие пузырьки газов с высокой величиной поверхностного натяжения и внутренним давлением влияют на поровое давление и фильтрационную консолидацию, меняют условия оттока воды в толще грунтов. Это напрямую сказывается на сжимаемости грунтов, приводит к снижению их несущей способности (Руденко, 2000).

Сжимаемость пылеватых и глинистых грунтов зависит от *структурно-текстурных особенностей*. Грунты природного сложения всегда имеют меньшую сжимаемость, по сравнению с теми же грунтами нарушенного сложения. Их компрессионное уплотнение происходит не при любой нагрузке (P), а лишь при такой, которая превышает прочность структурных связей — так называемую структурную прочность ($P_{\text{стр}}$) грунта (рис. 1.5), определяемую по характерному перегибу на компрессионной кривой (Грунтоведение, 1983).

«Величина структурной прочности зависит от возраста, степени литификации, генезиса грунта и преобладания в нем тех или иных структурных связей (рис. 1.5). Наименьшей структурной прочностью обладают относительно молодые глинистые грунты со слабыми коагуляционными (дальними и ближними) контактами, а наибольшей — относительно древние литифицированные грунты с прочными смешанными и фазовыми (цементационными) контактами. При декомпрессии структурная прочность грунта не восстанавливается» (Грунтоведение, 2005, с. 475) (см. рис. 1.6). По данным Р.Э.Дашко (1987), в слабых глинистых отложениях структурная прочность составляет 0,03-0,05 МПа и менее, в среднеуплотненных глинистых грунтах возрастает до 0,15 МПа, а в высоколитифицированных отложениях может достигать 0,7 МПа.

Относительно природы структурной прочности существует три точки зрения. Н.А.Цытович (1963), И.И.Черкасов и В.В.Шварев (1971) исходят из того, что $P_{\text{стр}}$ обусловлена в основном сопротивлением структурных цементационных связей. А.А.Ничипорович и Т.И.Цыбульник (1961, с. 97) утверждают, что горизонтальный участок компрессионной

кривой определяется «исключительно способностью грунта к набуханию» и величина, аналогичная $P_{стр}$, называется давлением набухания. Как отмечает Р.С.Зиангиров (1979), это положение справедливо для переуплотненных глин. Еще В.А.Приклонский и В.А.Чепик (1959) считали, что горизонтальный участок компрессионной кривой обусловлен не только сопротивлением внутренних структурных связей, но и силами набухания. Последняя точка зрения наиболее применима для различных типов глинистых грунтов. Неоднозначны и высказывания разных авторов относительно того, является ли величина структурной прочности постоянной для определенного вида грунта (Инженерная геология..., 1993).

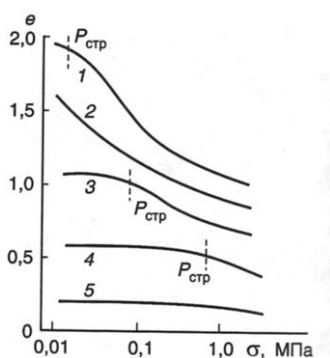


Рис. 1.5. Общий вид компрессионных кривых глинистых грунтов с разной структурой и преобладанием дальних (1) и ближних (2,3) коагуляционных контактов, смешанных (4), фазовых (5) (по В.И.Осипову, 1979)

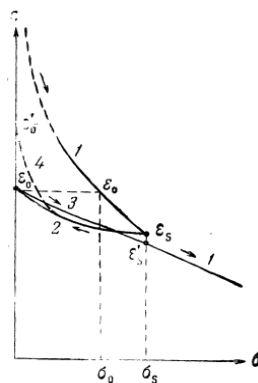


Рис. 1.6. Прямые и обратные ветви компрессионной кривой (по М.Н.Троицкой, 1961)

Деформируемость глинистых грунтов (супесей, суглинков, глин) зависит от **консистенции** (табл. 1.3): в грунтах твердой консистенции она минимальна и возрастает по мере перехода в пластичную и текучую консистенцию. Следует отметить, что в обобщенном виде показатели деформационных свойств глинистых грунтов разной консистенции и дисперсности далеко не всегда меняются закономерно (см. табл. 1.3). Следовательно, наши сведения о деформационных свойствах глинистых грунтов не являются исчерпывающими.

«Коэффициент Пуассона дисперсных грунтов зависит от влажности (**степени водонасыщения**) грунта: у сухих песков он меняется в диапазоне 0,1 - 0,25, у влажных возрастает до 0,3—0,4; а у водонасыщенных песков составляет 0,44 – 0,49; у супесчаных, суглинистых и глинистых грунтов варьирует в пределах 0,3—0,49, возрастая с ростом степени водонасыщения» (Грунтоведение, 2005, с. 468).

Компрессионная сжимаемость глинистых грунтов (особенно не литифицированных, с незначительной структурной прочностью) в большой мере зависит от различных **физико-химических факторов**, обусловленных поверхностными явлениями, происходящими в глинах на границе раздела фаз «минерал - жидкость», «жидкость - воздух» и т.д.

«Наличие в глинистых грунтах между частицами структурированных слоев связанной воды, обладающих аномальными свойствами, или воды переходного состояния существенно влияет на их сжимаемость» (Грунтоведение, 2005, с. 476). Этот факт подтверждается и результатами экспериментов Р.С.Зиангирова (1979) и многих других.

Таблица 1.3. Упругие характеристики глинистых грунтов (Грунтоведение, 2005)

| Грунт | Модуль общей деформации, МПа | Модуль упругости, МПа | Коэффициент Пуассона |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Супеси твердые | 10 - 39 | 30 - 90 | 0,24 - 0,28 |
| пластичные | 2 - 36 | 20- 460 | 0,24 - 0,31 |
| Суглинки твердые | 10 - 40 | 25 - 1800 | 0,25 - 0,37 |
| полутвердые | 5 - 32 | 45 - 1600 | 0,26 - 0,30 |
| тугопластичные | 11 - 28 | 18 - 110 | 0,26 - 0,37 |
| мягкопластичные | 8 - 12 | 240 - 640 | 0,26 - 0,40 |
| текучепластичные | 4 - 19 | 53 - 450 | 0,26 - 0,37 |
| лёссовидные | 20-40 | 37-75 | 0,26 - 0,35 |
| Глины твердые | 24 - 350 | 100 - 7600 | 0,27 - 0,41 |
| полутвердые | 16 - 240 | 95 - 5600 | 0,28 - 0,40 |
| тугопластичные | 7 - 26 | 50 - 960 | 0,27 - 0,41 |
| мягкопластичные | 5 - 15 | 8 - 72 | 0,28 - 0,39 |
| текучепластичные | 2 - 7 | 2,7 - 60 | 0,29 - 0,48 |

«Различными физико-химическими факторами обуславливается и величина расклинивающего давления между глинистыми частицами ($P_{\text{раскл}}$), препятствующего их сближению при компрессионном уплотнении под давлением σ . Чем меньше расклинивающее давление между частицами, тем меньшее давление σ надо приложить к ним для взаимного сближения. В состоянии равновесия $P_{\text{раскл}} = \sigma$. В общем случае величина расклинивающего давления обусловлена вкладом ионно-электростатической (P_i), молекулярной (P_m) и структурной (P_τ) составляющих, т.е. $P_{\text{раскл}} = P_i + P_m + P_\tau$. Поэтому все физико-химические и внешние факторы, влияющие на эти составляющие, будут влиять и на сжимаемость глинистых грунтов в целом. Например, величина $P_{\text{раскл}}$ существенно меняется в зависимости от состава и концентрации электролита порового раствора грунта. С ростом концентрации электролита порового раствора происходит сжатие двойного электрического слоя, следовательно изменяется расстояние между структурными элементами грунта. Снижение P_i (ионно-электростатической составляющей расклинивающего давления) и P_τ (структурной составляющей расклинивающего давления), и уменьшение за счет этого $P_{\text{раскл}}$, обуславливает большее сближение частиц, их изначально более плотную упаковку, т.е. меньшую сжимаемость и меньшую водоудерживающую способность (рис. 1.7). Наличие в зазоре между частицами

какой-либо неполярной жидкости (нефть, бензин, керосин и др.) обуславливает самые низкие значения $P_{раскл}$ и, соответственно, меньшую начальную пористость и наименьшую сжимаемость глинистого грунта» (Грунтоведение, 2005, с. 476).

По этим же причинам на сжимаемость глинистых грунтов (особенно монтмориллонитового состава) сильно влияет состав обменных катионов. Наличие в незасоленном грунте одновалентных катионов вызывает увеличение толщины гидратных пленок вокруг частиц. Поэтому сжимаемость такого грунта под нагрузкой $a = \Delta e / \Delta \sigma$ будет больше, и водоудерживающая способность под той же нагрузкой выше, чем при наличии в этом грунте двух- или трехвалентных катионов (рис. 1.8). Как отмечает Р.С.Зиангиров (1979), максимально влияние физико-химических факторов на деформацию глинистых грунтов проявляется при разгрузке и наиболее значимо для высокодисперсных монтмориллонитовых глин.

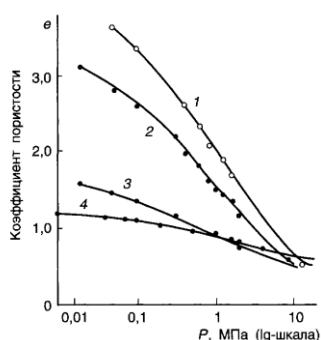


Рис. 1.7. Компрессионные кривые образцов монтмориллонитовой глины с поровым раствором разного состава: вода; 2 - 0,001н. раствор NaCl; 3 - 2н. раствор NaCl; 4 – керосин (Зиангиров, 1979)

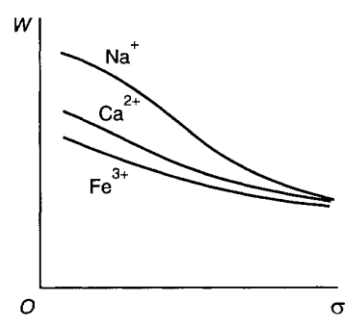


Рис. 1.8. Водоудерживающая способность под нагрузкой монтмориллонитовой глины с разными обменными катионами (Зиангиров, 1979)

Сжимаемость глинистых грунтов зависит также от их **начальной плотности (пористости) и влажности**: чем выше плотность (меньше пористость и влажность) исходного грунта, тем меньше он сжимается.

В общем случае в этом проявляется влияние компонентного состава грунта: соотношения в нем твердого, жидкого и газового компонентов. В зависимости от их исходного соотношения в грунте компрессионная сжимаемость проходит по-разному. В процессе самого компрессионного уплотнения закономерно меняется соотношение фаз. Например, уплотнение полностью водонасыщенного грунта (степень влажности $S_r=1$) возрастающими нагрузками идет по линии $S_r = 1 = const$ при одновременном уменьшении весовой и объемной влажностей. Уплотнение же не полностью водонасыщенного грунта идет при переменной (увеличивающейся) степени влажности $S_r < 1$ по линии постоянной весовой и увеличивающейся объемной влажности.

Как отмечалось выше, «при декомпрессии возможно частичное восстановление начальной пористости грунта. В глинистых грунтах оно выражено в большей мере, чем в крупно- и мелкообломочных, и объясняется действием дополнительных причин, вызывающих разуплотнение грунта при снятии нагрузки» (Грунтоведение, 2005, с. 477). Среди этих причин следует, прежде всего, учитывать набухание глинистых грунтов.

Многократное повторение нагрузок и разгрузок увеличивает сжимаемость грунта, так как при этом от цикла к циклу необратимо разрушается все большее число структурных связей. При многократной компрессии—декомпрессии компрессионные кривые сближаются, обратимая часть деформаций уменьшается от цикла к циклу, и кривые стремятся к некоторому стабилизированному положению (Зиангиров, 1979).

Обобщение литературных и фондовых данных по деформационным свойствам четвертичных глинистых грунтов с содержанием органических остатков не более 5%, а также для юрских глин оксфордского яруса, при условии полного заполнения пор водой (степень влажности $\geq 0,8$), позволило создать таблицу нормативных значений модулей общей деформации названных грунтов (табл. 1.4). В соответствии с СНиП 2.02.01-83 «для предварительных расчетов оснований, а так же для окончательных расчетов оснований зданий и сооружений II и III классов и опор воздушных линий электропередачи и связи независимо от их класса допускается определять нормативные и расчетные значения деформационных характеристик грунтов по их физическим характеристикам. Для грунтов с промежуточными значениями e , допускается определять значения E по интерполяции» (Краткий справочник по грунтоведению, 2011, с. 25).

Однако для практических целей их нельзя считать надежными, и приходится определять показатели деформационных свойств грунтов полевыми и лабораторными методами для каждого нового объекта (с учетом конкретного геологического строения разреза, наличия примесей крупнообломочного материала, изменения состояния глинистых грунтов и др.).

1.3. Инженерно-геологические лабораторные методы изучения деформационных свойств глинистых грунтов и анализ получаемых данных

Инженерно-геологические методы изучения физико-механических свойств грунтов (лабораторные и полевые, прямые и косвенные), считаются достаточно точными, однако, хорошо известно, что разные методы исследований грунтов — сдвиговые, компрессионные, стабилметрические, одноосное сжатие, штамповые, — дают разные результаты для одних и тех же грунтов (хотя в определенных условиях результаты испытаний могут оказаться близкими).

Таблица 1.4. Нормативные значения модулей деформации глинистых грунтов, МПа (Дорошкевич, 1972; Котлов, 1977; Справочник по инженерной геологии, 1981)

| Происхождение и возраст грунтов | Наименование грунтов и консистенция | | Модули деформации грунтов E_0 при коэффициенте пористости e | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------|---|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|---|
| | | | 0.31-0.4 | 0.41-0.5 | 0.51-0.6 | 0.61-0.7 | 0.71-0.8 | 0.81-0.9 | 0.91-1.0 | 1.01-1.1 | 1.11-1.13 | 1.31-1.5 | 1.51-1.7 | |
| Четвертичные аллювиальные, делювиальные, озерные, озерно-аллювиальные | Супеси | $0 \leq I_L \leq 1$ | - | 32 | 24 | 16 | 10 | 7 | - | - | - | - | - | |
| | | Суглинки | $0 \leq I_L \leq 0.25$ | - | 34 | 27 | 22 | 17 | 14 | 11 | - | - | - | - |
| | $0.25 < I_L \leq 0.5$ | | - | 32 | 25 | 19 | 14 | 11 | 8 | - | - | - | - | |
| | $0.5 < I_L \leq 1$ | | - | - | - | 17 | 12 | 8 | 6 | 5 | - | - | - | |
| | Глины | $0 \leq I_L \leq 0.25$ | - | - | 28 | 24 | 21 | 18 | 15 | 12 | - | - | - | |
| | | $0.25 < I_L \leq 0.5$ | - | - | - | 21 | 18 | 15 | 12 | 9 | - | - | - | |
| | | $0.5 < I_L \leq 1$ | - | - | - | - | 15 | 12 | 9 | 7 | - | - | - | |
| | Четвертичные флювио-гляциальные | Супеси | $0 \leq I_L \leq 1$ | - | 33 | 24 | 17 | 11 | 7 | - | - | - | - | - |
| | | | Суглинки | $0 \leq I_L \leq 0.25$ | - | 40 | 33 | 27 | 21 | - | - | - | - | - |
| $0.25 < I_L \leq 0.5$ | | - | | 35 | 28 | 22 | 17 | 14 | - | - | - | - | | |
| $0.5 < I_L \leq 1$ | | - | | - | - | 17 | 13 | 10 | 7 | - | - | - | | |
| Четвертичные моренные | Суглинки, Супеси | $I_L \leq 0.5$ | 75 | 55 | 45 | - | - | - | - | - | - | - | | |
| Юрские отложения оксфордского яруса | Глины | $-0.25 \leq I_L \leq 0$ | - | - | - | - | - | - | 27 | 25 | 22 | - | - | |
| | | $0 < I_L \leq 0.25$ | - | - | - | - | - | - | 24 | 22 | 19 | 15 | - | |
| | | $0.25 < I_L \leq 0.5$ | - | - | - | - | - | - | - | - | 16 | 12 | 10 | |

Примечание: I_L -показатель текучести (консистенции) глинистого грунта.

Такие физические характеристики, как влажность, плотность и др. присущи грунтам в данный момент и при их определении не зависят от каких-либо внешних факторов. Каким бы методом эти характеристики не определялись, они будут одинаковыми или очень близкими. В отличие от них показатели физико-механических свойств отражают реакцию грунтов на внешние воздействия, то есть являются реактивной характеристикой. Очевидно, что при разных методах воздействия реакция грунтов будет неодинаковой, соответственно, разными будут и получаемые значения показателей свойств грунтов.

И.В.Архангельский (2008) среди основных факторов, определяющих различия в результатах деформационных и прочностных испытаний разными методами, выделяет:

- неодинаковые сложение и влажность исследуемых грунтов;
- неодинаковые условия испытаний (например, при невозможности бокового расширения и при боковом расширении испытываемых грунтов);
- разные виды деформирования грунта (деформации уплотнения и деформации формоизменения (сдвига));
- разные скорости приложения нагрузок.

Таким образом, получаемые физико-механические характеристики грунтов неоднозначны и не могут быть представлены одним числом, а должны соотноситься с определенным методом исследования, размерами нагрузок, типом фундамента, конкретным сооружением. К сожалению, это важное обстоятельство нигде нормативно не закреплено (Архангельский, 2008).

Компрессионные испытания

Для дисперсных грунтов при деформировании в значительном диапазоне нагрузок характерно не столько проявление упругости, сколько пластичности, приводящей к формированию значительных остаточных деформаций, причем у них $\epsilon_{обр} \ll \epsilon_{ост}$. Поэтому при изучении деформационных свойств дисперсных грунтов наряду с характеристиками упругости, прежде всего, определяют их способность сжиматься под ступенчато возрастающей нагрузкой, т.е. изучают компрессионную сжимаемость. Этому направлению исследований посвящены работы многих отечественных (Гольдштейн, 1952; Цытович, 1973; Зиангиров, 1979; Дидух, 1985 и др.) и иностранных авторов (Osman Sivrikaya and Ergun Togro, 2006; Albert M. Y. Ng, Albert T. Yeung, Peter K. K. Lee, and L. G. Tham, 2006); краткий анализ состояния, области применения и возможности использования современной нормативной документации приведены в работе С.Б. Дроздовой (2012).

По Р.С.Зиангирову и др. (1984, с. 54), компрессионная сжимаемость грунтов (или компрессия) — «законченное во времени сжатие грунта в специальном компрессионном

приборе (одометре) ступенчатой нагрузкой в условиях невозможности бокового расширения» (при дренированных испытаниях с возможностью оттока воды и воздуха из пор образца). Н.А.Цытович (1963, с. 119) определяет компрессию, как «общую взаимосвязь между давлением и коэффициентом пористости, характеризующую сжимаемость грунтов без возможности бокового расширения».

Компрессионные испытания и в настоящее время наиболее широко применяются в производственных лабораториях для определения характеристик деформационных свойств грунта, причем как в нашей стране, так и за границей. При этом, как отмечали В.Я.Калачев, О.В.Аслибекян, С.Д.Филимонов (1993), испытания грунтов на компрессионную сжимаемость являются наиболее длительными среди всех лабораторных методов исследования грунтов.

Образец грунта помещается в жесткую металлическую обойму кольцевой формы, нагружается с помощью жесткого металлического штампа. Под действием этой силы в образце возникают сжимающие напряжения, вызывающие уплотнение грунта и осадку штампа. При испытаниях образцов водонасыщенных грунтов отток воды из пор осуществляется через отверстия в штампе и днище (Ухов и др., 1994).

Поскольку при компрессии диаметр образца, помещенного в жесткое металлическое кольцо, не меняется, то его относительные объемная и вертикальная деформации равны, т.е. $\varepsilon_v = \varepsilon_z$, или $\Delta V/V = \Delta h/h$, где V и h — соответственно начальные объем и высота образца; ΔV , Δh — изменения объема и высоты образца. При компрессии деформирование образца грунта и уменьшение его объема происходят за счет уменьшения объема пор, отжатия из них воды и (или) воздуха; при этом объем твердой части грунта не меняется.

Для расчета коэффициента пористости (e_p) грунта при любой ступени нагрузки P (закон компрессионного уплотнения) используется формула:

$$e_p = e_0 - \varepsilon_z(1 + e_0),$$

где $\varepsilon_z = \Delta h/h$ — относительная вертикальная деформация при данном давлении P (т.е. на данной ступени нагрузки), e_0 — начальный коэффициент пористости.

«Компрессионные испытания грунтов иллюстрируют графиками (*компрессионными кривыми*), которые строятся в координатах $e = f(\sigma)$, $n = f(\sigma)$, $\varepsilon_z = f(\sigma)$ или $w = f(\sigma)$, где e — коэффициент пористости, σ - нормальное напряжение, n — пористость; ε_z — относительная вертикальная деформация; w — влажность грунта (определяется в случае полного его водонасыщения). Общий вид этих кривых показан на рис. 1.9, из которого следует, что указанные зависимости являются нелинейными в широком диапазоне нагрузок и могут характеризоваться различными (показательными, логарифмическими и др.) функциями. Поэтому не существует универсального уравнения, описывающего компрессионные кривые для различных грунтов» (Грунтоведение, 2005, с. 471).

Как отмечал М.Н.Гольдштейн (1952), при обычных расчетах компрессии грунта ради упрощения выкладок принято заменять криволинейный участок компрессионной кривой в пределах заданного интервала давлений секущей АВ (рис. 1.10):

$$e = e_0 - a \sigma,$$

где $a = \operatorname{tg} \alpha = \Delta e / \Delta \sigma$ — коэффициент сжимаемости (или уплотнения) грунта, являющийся одним из параметров компрессии. Поскольку этот коэффициент зависит от интервала нагрузок, то его определяют для разных интервалов.

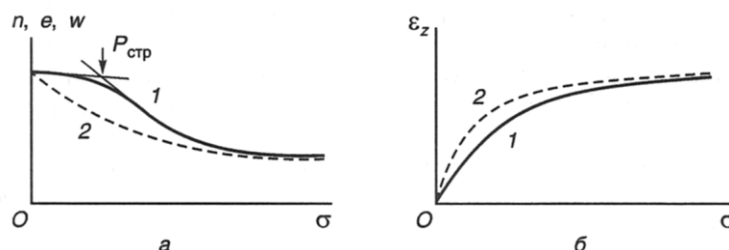


Рис. 1.9. Общий вид компрессионных кривых для грунтов естественной (1) и нарушенной (2) структуры в координатах: пористость (коэффициент пористости, влажность) — напряжение (а) и относительная вертикальная деформация — напряжение (б) (Лабораторные работы по грунтоведению, 2008)

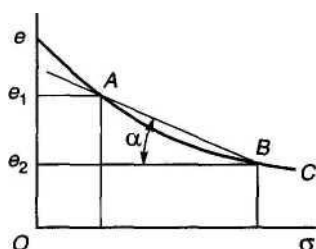


Рис. 1.10. К расчету параметров компрессионной сжимаемости (Грунтоведение, 1983)

Спрявление компрессионной кривой в большем интервале нагрузок в ряде случаев можно провести, перестроив график в полулогарифмическом масштабе $e=f(\lg \sigma)$. В этом случае компрессия описывается уравнением:

$$e = e_1 - a_k (\Delta \lg \sigma),$$

где a_k — коэффициент компрессии, безразмерная величина, определяемая соотношением $a_k = \Delta e / \Delta \lg \sigma$ (Лабораторные работы по грунтоведению, 2008).

В зависимости от величины коэффициента сжимаемости (a) в интервале напряжений 0,1-0,2 МПа, грунты подразделяются согласно классификации Н.Н.Маслова (Грунтоведение, 2005) на сильносжимаемые ($a > 1 \text{ МПа}^{-1}$), повышенносжимаемые ($a = 1—0,1 \text{ МПа}^{-1}$), среднесжимаемые ($a = 0,1—0,05 \text{ МПа}^{-1}$), слабосжимаемые ($a = 0,05—0,01 \text{ МПа}^{-1}$), практически несжимаемые ($a < 0,01 \text{ МПа}^{-1}$). Модуль общей деформации (E_0) связан с коэффициентом сжимаемости грунта при компрессионном сжатии соотношением:

$$E_0 = \beta(1+e_0) / a = E_{ок} \beta,$$

где β — коэффициент учитывающий отсутствие поперечного расширения в компрессионном приборе (безразмерная величина), определяемый по результатам

испытаний в приборах трехосного сжатия (Грунтоведение, 1983). М.Н.Гольдштейном (1952), он был назван коэффициентом стеснения поперечной деформации. В общем случае, $\beta=1-2\mu\xi$, где μ - коэффициент Пуассона (поперечного расширения); ξ - коэффициент бокового давления. При отсутствии экспериментальных данных допускается принимать равным: 0,8 - для песков; 0,7 - для супесей; 0,5 - для суглинков; 0,4 - для глин. $E_{ок}$ — *модуль общей компрессионной деформации*, МПа. Таким образом, основными параметрами, характеризующими компрессионную сжимаемость грунта, являются: коэффициент сжимаемости (a), коэффициент компрессии (a_k) и модуль общей компрессионной деформации ($E_{ок}$). Компрессионная сжимаемость разных типов дисперсных грунтов имеет свои особенности.

По В.И.Осипову (1979, с. 179-180), «ни у одной горной породы сжимаемость не варьирует в таких широких пределах, как у глин. В зависимости от характера структурных связей коэффициент уплотнения глинистых пород может изменяться от 10-20 до $0,001 \text{ МПа}^{-1}$. Наибольшей сжимаемостью обладают илы, имеющие высокопористую структуру с дальними коагуляционными контактами. По мере упрочнения структурных связей величина сжимаемости глин падает – многие аргиллитоподобные глины и аргиллиты можно считать практически несжимаемыми грунтами (см. рис. 1.5). От структурных связей зависят не только показатели сжимаемости, но и характер этого процесса».

«Сжимаемость пластичных глин, имеющих ближние коагуляционные контакты, если они неуплотнены (слаболитифицированные глины) или претерпели разгрузку в условиях выветривания и свободного набухания, равномерна за счет пластичного перемещения и более компактного взаимного расположения структурных элементов. График сжимаемости таких глин имеет вид экспоненциальной кривой, наклон которой к оси абсцисс постепенно уменьшается (см. рис. 1.5, кривая 2). В процессе уплотнения структурная связность системы не нарушается, а наоборот, постепенно возрастает за счет увеличения количества ближних коагуляционных контактов и повышения их прочности. Поэтому коэффициент сжимаемости таких глин по мере их уплотнения постепенно снижается от 1 до $0,1 \text{ МПа}^{-1}$ » (Осипов, 1979, с. 180-181).

«Пластичные глины, подвергшиеся уплотнению (нормально уплотненные) или разуплотненные в условиях отсутствия свободного набухания (переуплотненные глины), могут иметь график сжатия с отчетливо выраженной точкой перегиба (рис. 1.5, кривая 3), соответствующей их структурной прочности. Величина последней, как правило, не превышает $0,05-0,1 \text{ МПа}^{-1}$ » (Осипов, 1979, с. 181).

«График сжимаемости глины полутвердой консистенции со смешанными (коагуляционными и фазовыми) контактами характеризуется наличием четко выраженной

точки перегиба, соответствующей обычно десятым долям МПа (рис 1.5, кривая 4). Коэффициент сжимаемости глинистых пород со смешанным типом контактов существенно зависит от нагрузки уплотнения. При нагрузке меньшей величины структурной прочности ($P_{стр}$) значение коэффициента сжимаемости низкое и достигает $0,01 \text{ МПа}^{-1}$. При $P > P_{стр}$ значение коэффициента сжимаемости возрастает до 1 МПа^{-1} у недоуплотненных и $0,1 \text{ МПа}^{-1}$ у переуплотненных глин» (Осипов, 1979, с. 181).

В общем виде влияние особенностей микростроения глинистых грунтов различного генезиса на их деформирование при компрессионных испытаниях показано, например, в работе Л.Г.Булгиной, В.Н.Соколова, А.Г.Кошелева (2013).

На практике, при изысканиях для массового строительства для расчета обычно принимают один интервал нагрузок – чаще всего от 0.1 до 0.3 МПа или 0.1-0.2 МПа. При этом не учитывается глубина отбора образцов, которая может быть значительно ниже глубины заложения фундамента, и где природная нагрузка на грунт намного больше 0,1 МПа. В результате получаются заниженные модули деформации, отражающие разуплотненное состояние грунта и не соответствующее его природному залеганию (Архангельский, 2008).

Среди недостатков метода компрессионного уплотнения следует также отметить неучитываемое в расчетах трение между образцом и кольцом одометра. Изучением этого вопроса занимались не только в нашей стране (Зиангиров, 1979; В.Я.Калачев, О.В.Аслибемян, С.Д.Филимонов, 1993 и др.), но и за границей (Osman Sivrikaya and Ergun Togro, 2006). Как отмечал Р.С.Зиангиров (1979), погрешности определения могут быть связаны с наличием рельефа на поверхности образца и зазоре между образцом и кольцом; несовпадением скорости нагружения при лабораторном испытании и при строительстве; отличием температуры массива грунта; отличием состава и концентрации порового раствора. Подробное описание этих недостатков метода и количественные расчеты приведены в работе Р.С.Зиангирова (1979). По М.Н.Гольдштейну (1952) существенную погрешность результатов может вносить дополнительное нарушение структуры грунта при погружении его в обойму.

К числу недостатков компрессионных испытаний можно также отнести их длительность. Опыты с литифицированными (как правило дочетвертичными) глинистыми грунтами, особенно содержащими органическое вещество, могут продолжаться длительное время – до 1-2 месяцев.

Как отмечали В.Я.Калачев и др. (1993), необходимо усовершенствование традиционных методик определения компрессионной сжимаемости и поиск новых решений. Некоторые подходы к решению этого вопроса изложены у отечественных (В.Я.Калачев, О.В.Аслибемян, С.Д.Филимонов, 1993; ГОСТ 12248-2010; Д.Ю. Здобин, 2012) и иностранных авторов (Albert M. Y. Ng, Albert T. Yeung, Peter K. K. Lee, and L. G. Tham, 2006).

Статическое одноосное сжатие

«Под испытанием на сжатие грунта в сопротивлении материалов понимают испытание цилиндрического или призматического образца, к горизонтальным граням которого прикладывается сжимающее усилие», а боковая поверхность свободна (Гольдштейн, 1952, с. 143). В инженерной геологии статическое одноосное сжатие характеризует «один из видов деформаций грунтов, вызванный односторонней (продольной) нагрузкой, величина, направление и место приложения которой остаются неизменными в течение заданного промежутка времени, в условиях свободного бокового расширения» (Лабораторные работы по грунтоведению, 1993, с. 293).

«В зависимости от интенсивности внешних воздействий в грунтах, как и было отмечено выше, могут возникать деформации двух типов: а) упругие, которые исчезают после прекращения действия вызывающих сил, поэтому их часто называют обратимыми; б) пластические, сохраняющиеся в грунтах после снятия нагрузки и называемые в связи с этим необратимыми (рис. 1.11). Упругие и пластические деформации в сумме составляют общую деформацию грунта (см. раздел 1.1).

В качестве показателей, характеризующих способность грунтов изменять размеры и форму в условиях статического одноосного сжатия, используют модуль упругой деформации (модуль упругости, модуль Юнга) E_y и коэффициент Пуассона μ , а также модуль общей деформации E_o и коэффициент поперечной деформации μ_o .

В тех случаях, когда напряжения в образцах грунта не достигают предела упругости, а вызываемые ими деформации являются полностью обратимыми, связь между названными физическими характеристиками устанавливается в соответствии с законом Гука. Для условий одноосного сжатия он выражается формулой:

$$\sigma = E_y * \varepsilon_{обр},$$

где σ — нормальное напряжение, Па; E_y — модуль упругой деформации (упругости), Па; $\varepsilon_{обр}$ — относительная деформация сжатия» (Лабораторные работы по грунтоведению, 1993, с. 293).

В отличие от E и μ при расчете модуля общей деформации E_o и коэффициента поперечной деформации μ_o учитывают не только упругие, но и пластические деформации:

$$E_o = \sigma / \varepsilon_{общ},$$

$$\mu_o = - \varepsilon_{поп\ общ} / \varepsilon_{пр\ общ},$$

где $\varepsilon_{общ}$ и $\varepsilon_{пр\ общ}$ — общая относительная деформация в направлении приложения внешней нагрузки; $\varepsilon_{поп\ общ}$ — общая относительная деформация в направлении, перпендикулярном действию внешней нагрузки (Лабораторные работы по грунтоведению, 2008). При этом следует иметь в виду, что приведенные зависимости не являются линейными; их характер не

известен ни для конкретных глинистых разностей, ни в обобщенном виде для глинистых грунтов.

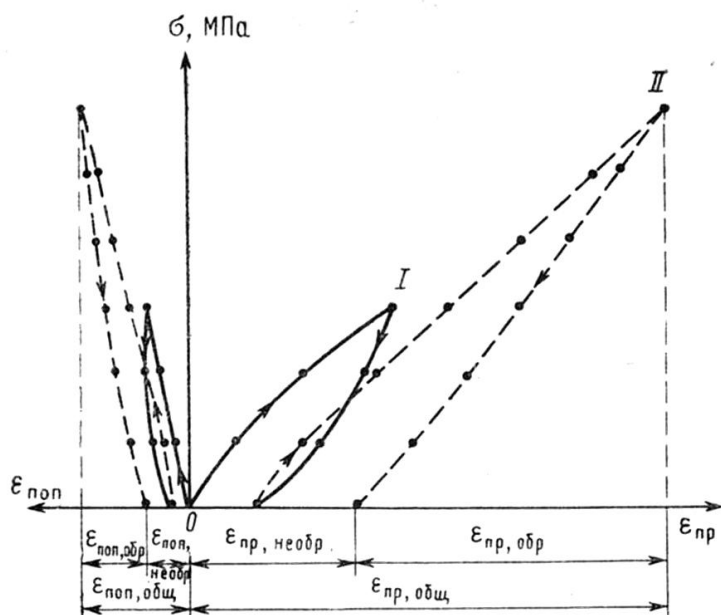


Рис. 1.11. Взаимосвязь относительной поперечной $\epsilon_{\text{поп}}$ и продольной $\epsilon_{\text{пр}}$ деформаций и напряжений σ : I, II – циклы нагружений (Лабораторные работы по грунтоведению, 2008)

Определение деформационных свойств при статическом одноосном нагружении проводят на стандартных цилиндрических образцах диаметром 40—50 мм. Принципиален выбор размеров образца, по Р.С.Зиангирову и др. (1984) отношение высоты к диаметру должно составлять от 1,5 до 2,5. В соответствии с ГОСТ 12248-96 образец должен иметь форму цилиндра диаметром от 40 до 100 мм и отношением высоты к диаметру от 1:1 до 2:1. Согласно методическому руководству к прибору производства ООО «НПП «Геотек»» образец глинистого грунта должен быть диаметром 38 мм и высотой 76 мм. Высота образца должна выбираться таким образом, чтобы ее отношение к диаметру было максимально приближенно к 2 (следствие из принципа Сен-Венана), что позволяет обеспечить равномерное одноосное напряженное состояние в средней части образца и минимизировать негативное влияние местных напряжений, возникающих по торцам образцов.

Торцевые поверхности образца должны быть параллельны друг другу и перпендикулярны боковой поверхности.

Механическое воздействие на образец осуществляется ступенчато изменяющейся нагрузкой, причем ее максимальная величина не должна превышать 0,6 предела прочности на одноосное сжатие R_c (Лабораторные работы по грунтоведению, 2008). В последнее время появились и часто используются приборы, изменяющие нагрузку на образец с постоянной заданной скоростью (Болдырев, Идрисов, 2005). Методика проведения экспериментов закреплена в ГОСТ 12248-96. Как средство измерения деформаций в англоязычной литературе

упоминается эластомер (Osama A. Safaqa, Michael F. Riemer, 2007), по мнению автора работы, этот прибор представляет интерес для целей инженерной геологии. Различные виды приборов, предназначенные для испытания грунта на одноосное сжатие приведены в работах (Койфман, Ильницкая, Карнов 1964; www.geotek.ru).

При циклическом нагружении, как отмечали Савич А.И., Яценко З.Г. (1979, с. 9-10), для характеристики «упругих и деформационных свойств грунтов используют:

а) модуль общей или суммарной деформации $E_{0\Sigma i}$, определяющий общую деформацию среды при i циклах нагружения $E_{0\Sigma i} = \sigma / \varepsilon_{\Sigma i}$;

б) модуль деформации при i -м цикле нагружения E_{0i} , характеризующий полную деформацию среды при i -м цикле $E_{0i} = \sigma / \varepsilon_{\Sigma i}$;

в) модуль полной упругости E_y , определяющий полную упругую деформацию за i -й цикл нагрузки: $E_y = \sigma / (\varepsilon_{ny} + \varepsilon_p)$;

г) модуль мгновенной или идеальной упругости E_{ny} , соответствующий идеально-упругой деформации при i -м цикле: $E_{ny} = \sigma / \varepsilon_{ny}$ » (см. ниже раздел 1.4.1).

По Н.А. Цытовичу (1963) выделяют модуль нормальной упругости, определяемый для твердых глинистых грунтов на основании результатов измерения упругих деформаций при последовательных нагрузках и разгрузках образца грунта как отношение нормального напряжения к величине относительной деформации при сжатии (в случае пластичной консистенции глинистых грунтов модуль нормальной упругости можно определить и в компрессионном приборе при многократной нагрузке и разгрузке).

И прочностные, и деформационные показатели отражают природу грунта, его состав, строение, состояние, следовательно, есть основания для сопоставления этих показателей. Поэтому здесь целесообразно коротко рассмотреть вопрос о процессе сопротивления грунта одноосному сжатию.

Характер деформирования и величина временного сопротивления сжатию глинистых грунтов зависят от минерального состава, структурно-текстурных особенностей, влажности и консистенции, состава и концентрации поровой жидкости и др.

Исходя из теоретических основ грунтоведения, влияние минерального состава на поведение грунтов при нагружении проявляется через связанные с ним дисперсность, гидрофильность и характер структурных связей. При испытаниях на одноосное сжатие дисперсных грунтов наибольшие значения прочности (при прочих одинаковых условиях) характерны для грунтов с более прочными смешанными и переходными контактами, а наименьшие — для грунтов со слабыми коагуляционными контактами. При одинаковой пористости наибольшая прочность на сжатие характерна для глин монтмориллонитового состава, а наименьшая - каолинитового (рис. 1.12). Это объясняется различиями в

дисперсности данных глин: наибольшее число «соседей» (т.е. число контактов) вокруг одной частицы будет в высокодисперсных монтмориллонитовых глинах, а наименьшее - в каолинитовых.

Глинистые грунты природного сложения имеют более высокую прочность на сжатие, чем те же грунты нарушенного сложения. «Для оценки этого используют показатель, называемый чувствительностью, или показателем структурной прочности, который определяется как отношение временного сопротивления сжатию грунта в естественном (R_c^e) и нарушенном (R_c^H) сложениях, т.е. $S_t = R_c^e / R_c^H$. Величина S_t меняется от 1,2—1,5 для нелитифицированных глинистых грунтов до 10—16 и более для литифицированных» (Грунтоведение, 2005, с. 500).

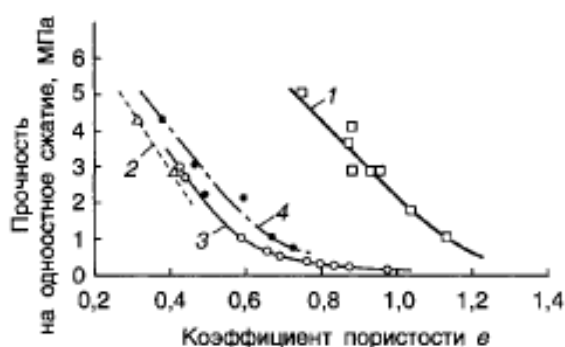


Рис. 1.12. Зависимость прочности на одноосное сжатие глин от коэффициента пористости: 1 - монтмориллонитовая глина; 2 - каолинитовая глина; 3 - гидрослюдистая глина; 4 - полиминеральная глина (Грунтоведение, 1983)

Текстура глинистых грунтов тоже влияет на величину их временного сопротивления сжатию, обуславливая анизотропию прочности. Временное сопротивление сжатию глин с ориентированной текстурой зависит от соотношения ориентации частиц грунта с направлением приложения сжимающей нагрузки: наибольшая величина R_c наблюдается при сжатии грунта перпендикулярно слоистости или ориентации частиц.

Влажность очень сильно влияет на временное сопротивление сжатию дисперсных грунтов, особенно пылеватых и глинистых. В зависимости от количества воды той или иной категории глинистый грунт может менять консистенцию от твердой до текучей. В соответствии с этим его прочность на одноосное сжатие изменяется в широких пределах (табл. 1.5).

Максимальной прочностью обладают глинистые грунты твердой консистенции, для которых характерен хрупкий тип разрушения и смешанные (включая цементационные и переходные) контакты, а минимальной прочностью — глинистые грунты текучей консистенции, для которых отмечается вязко-пластичный тип разрушения и коагуляционные контакты (рис. 1.13, 1.14). При этом за разрушающее напряжение принимают предел текучести грунта при одноосном сжатии.

Таблица 1.5. Предел прочности на одноосное сжатие в зависимости от консистенции глинистых грунтов (Грунтоведение, 1983)

| Консистенция грунта | Временное сопротивление сжатию, МПа |
|---------------------|-------------------------------------|
| Текучая | < 0,025 |
| Текучепластичная | 0,025—0,05 |
| Мягкопластичная | 0,05—0,1 |
| Тугопластичная | 0,1—0,2 |
| Полутвердая | 0,2—0,4 |
| Твердая | >0,4 |

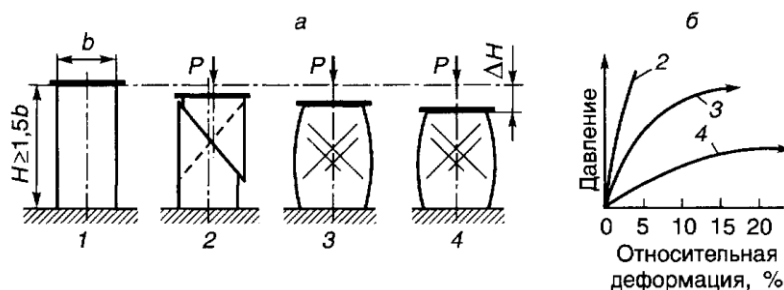


Рис. 1.13. Характер деформирования грунтов при одноосном сжатии: а — внешний вид образца до (1) и после (2—4) сжатия; 2 — хрупкое разрушение; 3 — полухрупкое (хрупкопластичное) разрушение; 4 — пластичное разрушение; б — диаграмма «давление — деформация» (Грунтоведение, 2005)

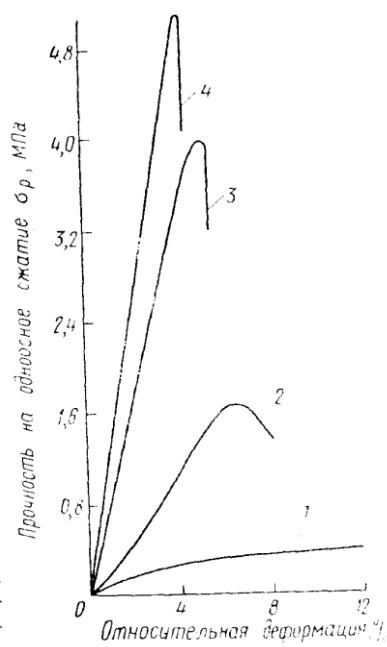


Рис. 1.14. Зависимость характера деформации глинистых пород при одноосном сжатии от типа контактов: 1 — ближние коагуляционные контакты; 2 — смешанные (коагуляционные и фазовые) контакты; 3 — переходные контакты; 4 — фазовые контакты (по В.И.Осипову, 1979, с. 183)

Временное сопротивление сжатию глинистых грунтов увеличивается с ростом плотности, а значит с ростом и числа, и прочности контактов. «Влияние обменных катионов на временное сопротивление сжатию проявляется лишь в высокодисперсных глинистых грунтах. Прочность на одноосное сжатие образцов почв, сформованных из различных моноионных форм, зависела от вида обменных катионов и менялась в ряду: $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} >$

$Ca^{2+} > K^+ > H^+ > Al^{3+}$, при этом прочность Na-формы была более чем в шесть раз больше, чем Al-формы» (Грунтоведение, 2005, с. 501). Заряд обменных катионов влияет на строение грунта. Присутствие одновалентных катионов в обменном комплексе глины обеспечивает ее диспергированное состояние, а, следовательно, и большее количество контактов между частицами.

По В.И.Осипову (1979), «весьма показателен график деформации глинистых грунтов при их нагрузке-разгрузке. Как видно из рис. 1.15, а, быстрое снятие напряжения сопровождается мгновенной обратимой упругой деформацией (ϵ_y), а затем в течение нескольких минут идет медленное увеличение высоты образца за счет длительной упругости (ϵ_0). Отрезок ϵ_0 на оси абсцисс характеризует величину остаточной деформации. Следовательно, для глинистых пород с близкими коагуляционными контактами характерен упругоэластично-вязкий характер деформации. Причем преобладают «вязкие» деформации, относительная доля которых возрастает по мере повышения сжимающей нагрузки. Расчеты показывают, что модули упругой (E_y), эластической (E_0) и общей (E_0) деформаций составляют соответственно 1-30, 0,5-20 и 0,1-10 МПа» (Осипов, 1979, с. 183-184).

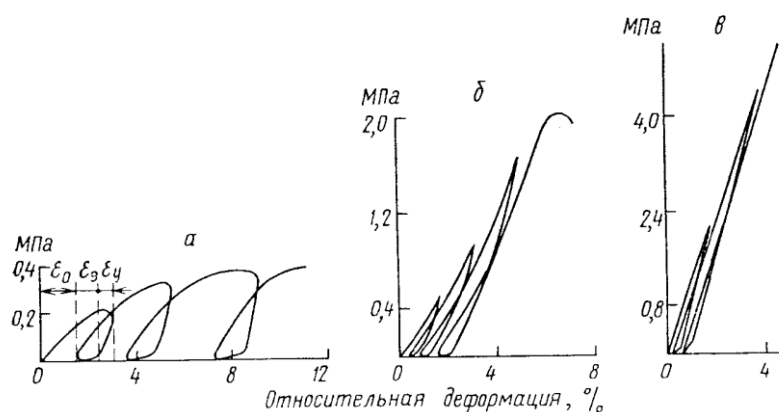


Рис. 1.15. Характер деформации при нагрузке-разгрузке глинистых грунтов с близкими коагуляционными (а), смешанными (б) и фазовыми (в) контактами (по В.И.Осипову, 1979, с. 184)

По В.И.Осипову, «глинистые грунты со смешанными (коагуляционными и фазовыми) контактами по своей прочности и деформационному поведению существенно отличаются от описанного выше типа грунтов. Для них характерно достаточно высокое значение прочности R_c , изменяющееся от 0,3 МПа у слабоуплотненных до 2,5 МПа у среднеуплотненных, частично цементированных грунтов (см. рис. 1.14, кривая 2). На кривых деформации грунтов с фазовыми (цементационными) контактами отчетливо выделяется упругий участок (см. рис. 1.14, кривая 4). Модуль общей деформации составляет $10-10^2$ МПа» (Осипов, 1979, с. 184).

В старых практических руководствах по механике грунтов деформационные показатели в опытах по одноосному сжатию предлагалось рассчитывать при напряжении $<0,3R_c$ (Гольдштейн, 1952). В общем случае расчеты ведут по линейному участку зависимости $\epsilon(\sigma)$.

Среди недостатков метода одноосного сжатия, используемого для характеристики деформационных свойств грунтов, следует отметить: существование неровностей на гранях образца (для некоторых типов грунтов трудно вырезать образец правильной формы); неоднородность структуры самого грунта; зависимость деформационных характеристик грунта от параметров нагружения и выбора расчетного интервала нагрузок.

Трехосное сжатие

Испытания на трехосное сжатие общепризнаны за границей, давно там широко используются (Zeljko Cabarkapa and Teresa Cuccjvillo, 2006; Adam F. Sevi, Louis Ge, and W. Andy Take, 2009; Jian-Hua Yin, Chun-Man Cheng, Md. Kumruzzaman, and Wan-Huan Zhou, 2010 и др.) и закреплены нормативными документами (ASTM D 3999-91, ASTM D 2850-03a, ASTM D 4767-04, ASTM D 5311-92). На территории нашей страны эти испытания длительное время были мало распространены ввиду дороговизны оборудования и ряда других факторов. Ситуация изменилась в последнее пятилетие, когда появилось и стало доступным отечественное и импортное оборудование, а трехосные испытания стали обязательными при планировании и проведении инженерно-геологических изысканий на многих объектах.

Испытания проводятся в приборах трехосного сжатия (стабилометрах), которые позволяют определять прочностные и деформационные характеристики грунтов.

Существенным преимуществом стабилометров является возможность воссоздания в образце грунта начального напряженного состояния, соответствующего напряженному состоянию грунта в условиях естественного залегания.

Испытания для определения модуля деформации проводят при заданном всестороннем давлении на образец. В этом случае имеют место только деформации уплотнения. Испытания для определения характеристик прочности проводят при различных значениях всестороннего давления на образец. При этом имеют место только деформации формообразования (Архангельский, 2008).

При испытаниях на трехосное сжатие «подготовленные образцы цилиндрической формы (чаще нарушенного сложения из-за сложностей при подготовке образцов) после изотропной или анизотропной консолидации подвергаются действию динамической или статической нагрузки, изменяющей соотношение главных напряжений на момент окончания консолидации. В принципе при этом образец испытывает сначала увеличение осевого напряжения на величину $\pm\sigma_{dc}/2$ и одновременное уменьшение бокового напряжения на ту же величину (рис. 1.16, а). При этом нормальные напряжения на плоскости, проходящей под 45° к оси образца, не меняются, но на ней развиваются сдвигающие напряжения величиной $\pm\sigma_{dc}/2$. Во вторую половину цикла направление последних меняется на обратное при неизменных нормальных напряжениях на плоскостях главных

касательных напряжений. Создаваемое таким образом напряженное состояние полагается близким к тому, которое возникает в горизонтальном сечении элементарного объема грунта в массиве при прохождении через него упругих волн сдвига в вертикальном направлении. Для удобства проведения испытаний давление в камере обычно поддерживается постоянным, а осевое напряжение изменяется на величину $\pm\sigma_{dc}$ (рис. 1.16, б). Это позволяет создать практически эквивалентные условия при недренированных испытаниях водонасыщенных образцов, в противном случае необходим контроль осевых и боковых напряжений» (Вознесенский, 1997, с. 55-56).

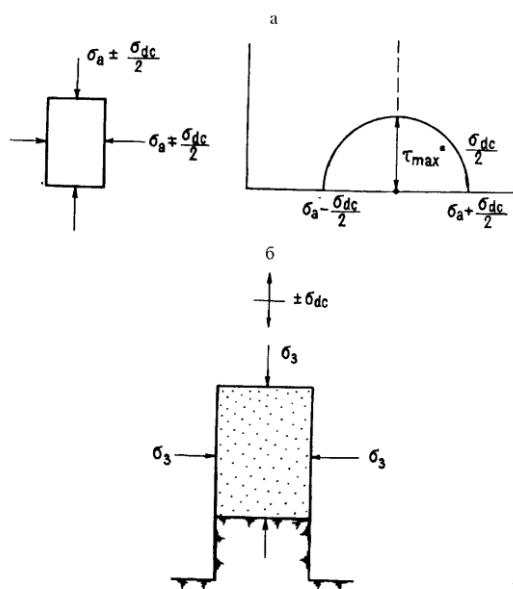


Рис. 1.16. Напряженное состояние в образце при трехосных динамических испытаниях (по Е.А.Вознесенскому, 1997)

Существующее множество версий трехосных испытаний можно разделить на две подгруппы: испытания с контролем напряжений (а) и деформаций (б) (Троицкая, 1967). «Чаще используются установки с контролем напряжений, которые задаются и поддерживаются на определенном уровне (или изменяются по заданной программе) в течение эксперимента, а поровое давление и осевая деформация образца измеряются в функции числа циклов нагружения. Эти аппараты могут иметь гидравлическую, пневматическую, электрогидравлическую или пневмогидравлическую системы нагружения» (Вознесенский, 1997, с. 57).

«Среди наиболее современных динамических стабилометров с силовым приводом гидравлического типа можно привести установку, изготовленную в университете Ноттингема (Великобритания). Аппарат предназначен для испытаний образцов нарушенного сложения диаметром 76 мм и высотой до 152 мм. Микродатчики порового давления в данной конструкции закладываются в центральную часть образца при его подготовке. Гидравлическая силовая система имеет два линейных преобразователя, контролирующих и изменяющих в заданном временном режиме как боковое напряжение, так и девиатор. Для измерения осевых и радиальных деформаций используются индуктивные преобразователи типа LVDT (Linear Variable

Differential Transformer), удобные и надежные в обращении, имеющие, так же как и измерители напряжений, обратную связь с системой нагружения, что и обеспечивает автоматизированный режим работы всей установки. Система сбора и обработки данных снабжена фильтрами низкой частоты, вырезающими шумовые помехи и сглаживающими полезный сигнал» (Вознесенский, 1997, с. 58-59). Другие типы стабилметров хорошо описаны в (Сипидин, Сидоров, Карпов, 1963; Койфман, Ильницкая, 1964; Ломтадзе, 1972; Zeljko Cabarkara and Teresa Cuccjvillo, 2006; Adam F. Sevi, Louis Ge, and W. Andy Take, 2009; Jian-Hua Yin, Chun-Man Cheng, Md. Kumruzzaman, 2010 и др).

По мнению Е.А. Вознесенского, «пневматические трехосные аппараты более просты и удобны в управлении, однако, способны передавать существенно меньшие осевые нагрузки, а также весьма низкие (обычно не более 1 Гц) частоты воздействия, что связано со значительной сжимаемостью воздуха; и при попытках генерировать более высокие частоты нагружения происходит искажение задаваемой формы волны (обычно гармонической) и механической реакции электропневматического преобразователя. Тем не менее, они получили едва ли не наибольшее распространение, поскольку, как уже отмечалось выше, большинство таких исследований направлено на изучение воздействий сейсмических нагрузок на грунты» (Вознесенский, 1997, с. 59).

Кроме того, динамические трехосные испытания с контролем деформаций позволяют определять коэффициент затухания грунта и модуль Юнга (E). Общий ход эксперимента при этом практически не меняется, однако, нагружение и разгрузка грунта в каждом цикле воздействия осуществляется до достижения заданной деформации сжатия или растяжения, и регистрируется изменение напряжений, необходимых для достижения данного уровня деформации, как правило уменьшающихся в связи с деградацией прочности грунта от цикла к циклу. Модуль Юнга рассчитывается по отношению приложенного осевого напряжения и достигнутой при этом осевой деформации образца, а динамический модуль сдвига определяется из выражения:

$$G = E/2(1+\mu),$$

где μ - коэффициент Пуассона грунта.

По Е.А.Вознесенскому (1997), среди основных особенностей динамических трехосных испытаний, «ограничивающих применение этого метода, следует назвать: 1) сложности с измерением сдвиговых деформаций менее 0.01%, хотя в последнее время с развитием технологии эксперимента эта проблема может быть успешно решена; 2) резко различное поведение грунта в фазах растяжения и сжатия каждого цикла нагружения (растягивающие усилия при инверсии знака осевого напряжения в течение цикла прикладываются к мембране, а в расчеты вводятся соответствующие поправки, зависящие от модуля упругости резины), вследствие чего формируется несимметричная петля гистерезиса в опытах с контролем деформаций или

появляется тенденция к образованию шейки на образце в опытах с контролем напряжений; 3) перераспределение пористости в объеме образца во время динамических испытаний, что, впрочем, характерно и для других типов динамических испытаний дилатантных грунтов; 4) концентрацию напряжений на торцах образца; 5) изменение направления наибольшего главного напряжения на 90° в течение эксперимента. Детальный анализ показывает, что на результаты трехосных динамических испытаний в разной степени влияет и ряд факторов, связанных с особенностями процедуры подготовки и проведения эксперимента» (Вознесенский, 1997, с. 59-60).

Отечественные приборы трехосного сжатия активно разрабатываются в последнее десятилетие, причем абсолютно преобладают установки для статических испытаний грунтов. Примером может служить прибор трехосного сжатия производства ООО «НПП «Геотек»» (рис. 1.17). Испытания цилиндрических образцов грунта проводятся в условиях осесимметричной деформации, в рабочей камере, схема которой показана на рис. 1.17, а. Образец грунта имеет отношение высоты к диаметру, как правило, не менее 2. Обычно диаметр образцов принимается равным 38 или 50 мм, значительно реже, диаметром 100 мм. При испытании грунтов с крупнообломочными включениями используются образцы с диаметром 200 мм и более (по www.geotek.ru). Несмотря на многие возможности, которые дает этот прибор (в том числе и для испытаний неоднородных образцов), остается еще достаточно вопросов по доработке прибора (подготовка образцов, система нагружения, регистрация напряжений и деформаций, программное обеспечение и др.).

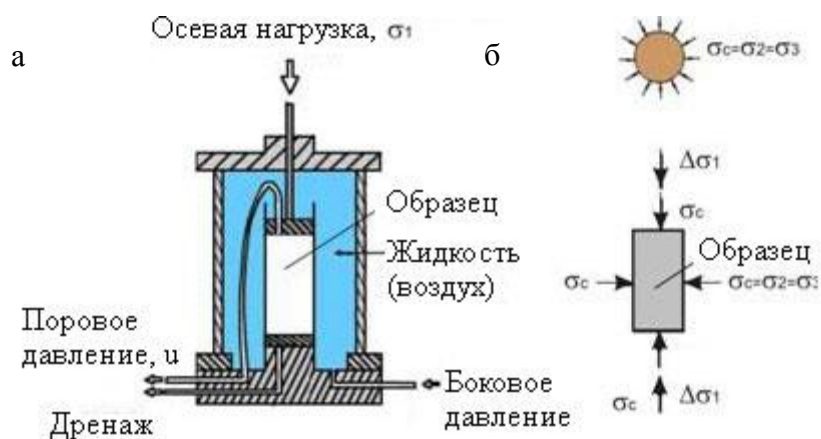


Рис. 1.17. Конструкция рабочей камеры (а) прибора трехосного сжатия фирмы Геотек и схема нагружения образца грунта (б) (по www.geotek.ru)

Несмотря на большое количество испытаний, которые выполнены в условиях трехосного сжатия, как за рубежом, так и в России, до сих пор нет однозначного мнения о сопоставимости значений стабилметрического модуля деформации и штампового модуля деформации. Однозначно то, что стабилметрический модуль деформации больше компрессионного модуля деформации и ближе к значениям, полученным по штамповым испытаниям. Для сближения результатов со штамповыми испытаниями необходимо, чтобы

всестороннее давление в стабилометре при испытании образцов грунта было равно бытовому давлению или давлению пригрузки вокруг штампа (www.geotek.ru).

Следует отметить некоторые недостатки испытаний грунта в стабилометрах:

- неоднородность напряженного состояния по высоте образца (напряжения вблизи верхнего и нижнего штампов несколько отличаются от напряженного состояния в средней части образца);
- в стабилометрах горизонтальные напряжения принимаются равными между собой ($\sigma_2 = \sigma_3$), фактически в основании сооружений они могут отличаться;
- большое количество соединений и повышенные требования к герметичности прибора усложняют проведение опыта в стабилометрах;
- испытания в стабилометрах (в том числе подготовка образца) гораздо более трудоемкие и дорогостоящие по сравнению с испытаниями в одометрах и установках одноосного сжатия.

1.4. Геофизические исследования деформационных свойств глинистых грунтов

1.4.1. Возможности использования сейсмоакустических методов для инженерно-геологического изучения грунтов

Многие задачи инженерной геологии трудно решать без привлечения новых методов и технических средств и, в первую очередь, геофизических методов, «которые, наряду с высокими экономическими показателями, обладают рядом принципиальных достоинств. К важнейшим из них можно отнести: 1) возможность изучения массивов грунтов дистанционно без нарушения их структуры и характера протекания в них естественных процессов; 2) возможность изучения массивов с разной степенью детальности, что необходимо при исследовании неоднородных сред; 3) возможность проведения измерений непрерывно в пространстве и времени; 4) практически неограниченная глубинность исследований» (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 3).

Одно из ведущих мест в инженерной геофизике занимают сейсмоакустические методы, включающие сейсмические (частоты $< 0,5—1$ кГц) и геоакустические (частоты $> 0,5—1$ кГц). Последние часто подразделяют на акустические (частоты до $10—20$ кГц) и ультразвуковые (частоты $> 10—20$ кГц) методы.

Вопросам инженерной сейсморазведки посвящены труды Н.Н.Горайнова и Ф.М.Ляховицкого (1979), В.Н.Никитина (1981), А.И.Савича и З.Г.Ященко (1979), М.Л.Владова (2004), В.С. Зинченко (2005), В.В.Ильченко (2012) и др.

В задачи инженерной сейсмики и геоакустики, по мнению Никитина В.Н. (1981), входит изучение: 1) структурных особенностей участка исследований (геометрии различных границ);

2) состава, состояния и физико-механических свойств грунтов, слагающих разрез; 3) строения массива, а также состояния и свойств слагающих его грунтов не только в статическом, но и в динамическом режиме, т. е. изучение современных геологических и инженерно-геологических процессов.

Прежде всего, целесообразно остановиться на понятии «сейсмических свойств», которые в современной систематике свойств грунтов относятся к классу физических, подклассу механических, типу динамических (в данном случае акустических – *прим. автора*), «транспортными» показателями которых являются скорости упругих волн (Королев, 1996). По Н.Н.Горяйнову (1992, с. 11), к *сейсмическим свойствам* грунтов «относят характеристики, непосредственно определяемые при сейсмоакустических измерениях: скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, а также соответствующие коэффициенты (α_p , α_s) и декременты (θ_p , θ_s) их поглощения. К показателям сейсмических свойств относят и производные величины: V_s/V_p , α_s/α_p , θ_s/θ_p ». (Поскольку в геофизической терминологии понятие сейсмических свойств (пород) существует и широко используется, автор также считает возможным его использование, наряду с термином «акустические свойства».)

Подробное описание физики (механизма) процесса распространения волн дано в отечественной литературе, например, у И.И.Гурвича, Г.Н.Боганика (1980), А.Г.Авербуха (1982), В.И.Бондарева (2003), Т.Б.Соколовой, А.А.Булычева, И.В.Лыгина (2011) и др., а в англоязычной, например, у Дж.Е.Уайта (1986), Дж.Милса (Milsom, 2003).

В соответствии с уравнениями динамического равновесия упругой среды в неограниченной однородной изотропной идеально упругой среде могут возникать два типа объемных волн, распространяющихся независимо, – продольные Р и поперечные S, различающиеся по характеру смещений частиц среды при распространении, а также по величинам их скоростей (Никитин, 1981).

Продольная волна вызвана деформациями объема за счет поступательного движения частиц среды в направлении распространения упругих колебаний. Здесь происходят явления локального сжатия и растяжения вещества без изменения прямоугольной формы его элементарных объемов. Поэтому Р-волну называют также волной сжатия (компрессии). На рис. 1.18, а в плоском сечении схематически показан характер деформации элементов среды при прохождении Р-волны, имеющей форму одного периода синусоиды. Продольные волны распространяются со скоростью V_p , определяемой упругими и плотностными свойствами среды:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}},$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность среды.

Поперечная волна вызвана деформациями формы, т. е. малыми вращательными движениями (поворотами) частиц среды в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения упругих колебаний. Здесь происходят явления локальной деформации прямоугольных элементов среды без изменения их объемов. Поэтому S-волну называют также волной сдвига (вращения). На рис. 1.18, б в плоском сечении схематически показан характер деформации элементов среды при прохождении S-волны, имеющей форму одного периода синусоиды. Поперечные волны распространяются со скоростью V_s , определяемой упругими и плотностными свойствами среды:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \frac{1-\mu}{2(1+\mu)}},$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность среды (Гурвич, Боганик, 1980).

Продольная волна всегда распространяется быстрее, чем поперечная, в той же среде:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \geq \sqrt{2}, \text{ поскольку } \mu \geq 0 \text{ (Гурвич, Боганик, 1980).}$$

Все реальные среды можно рассматривать как абсолютно упругие только в приближении, позволяющем более или менее точно описывать изменения параметров волны при прохождении сравнительно небольших расстояний.

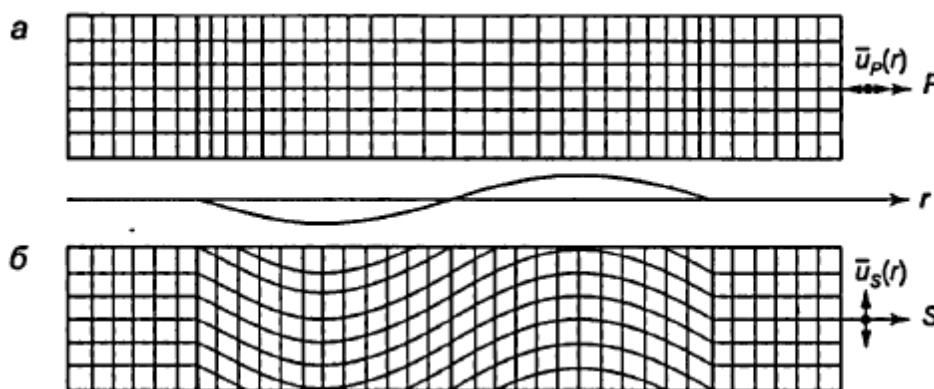


Рис. 1.18. Характер деформаций упругой среды при распространении сейсмической волны: а - продольной P; б - поперечной S (И.И.Гурвич, Г.Н.Боганик, 1980)

«Экспериментальное исследование процесса распространения упругих волн на больших расстояниях от источника показывает их более сильное ослабление, чем это вытекает из расчетов, основанных на формулах для однородных абсолютно упругих сред. Изменение интенсивности упругих волн сопровождается значительным изменением формы их колебаний. Эти явления объясняются существованием механизма *поглощения энергии* сейсмических волн, путем перехода ее в другие виды, например в тепловую энергию». Среда, в которых

происходит такое преобразование энергии упругих колебаний В.И.Бондарев (2003, с. 21) определяет как *поглощающие*. Е.А.Вознесенский (2010) отмечает, что гетерогенная среда поглощает упругую энергию, а зависимость убывания упругих волн с расстоянием может быть весьма сложной и определяться размерами неоднородностей, физико-механическими свойствами отдельных компонентов среды, частотой колебаний и др.

В соответствии с различными механизмами потерь энергии волны Е.А.Вознесенский (2010) выделяет следующие виды затухания:

1) расхождение (также геометрическое или радиационное затухание), обусловленное уменьшением удельной энергии на единицу площади фронта волны в связи с ее увеличением по мере удаления от источника;

2) рассеяние на различных неоднородностях среды, также приводящее к уменьшению энергии волны в конкретном направлении. Рассеяние волн на любом препятствии зависит от его формы и размеров, а также от плотности и сжимаемости вещества препятствия. Если сжимаемость и плотность неоднородности такие же, как и остальной среды, то она не вызовет рассеяния, каковы бы ни были ее размеры и форма. Если рассеивателей на пути первичной волны много, то по мере ее распространения произойдет накопление рассеянных волн. Если препятствие мало по сравнению с длиной волны, то возможны два типа рассеяния: а) в случае другой сжимаемости неоднородности происходит ее пульсация и рассеяние монополюсного типа; б) в случае другой плотности препятствие либо отстает от среды, либо опережает ее – возникает поступательная осцилляция и рассеяние дипольного типа;

3) собственно поглощение (или гистерезисное затухание), обусловленное затратами энергии на пластические, нелинейно-упругие деформации и тепловые потери.

К настоящему времени существующие классические теории поглощения для моделей сплошной среды исходят из представлений о реальной среде как о сплошном твердом теле, в котором наряду с чистой упругостью (описываемой законом Гука) предполагается некоторый механизм диссипации (рассеивания) сейсмической энергии, связанный с вязкостью, внутренним трением (т.н. классическое поглощение) и с упругим последствием (т.н. релаксационное поглощение). Математический аппарат этих теорий использует решение задачи теории упругости, а физические связи между приложенными напряжениями и деформациями задаются уравнениями состояния среды (Вознесенский, 2010).

Существующие в настоящее время теории (Бондарев, 2003, с. 21), «объясняющие процесс поглощения, приводят к выводу, что амплитуда смещения сейсмической волны в поглощающем слое должна дополнительно ослабляться в соответствии с зависимостью»:

$$A_p(r) = A_p(r_0) * e^{-\alpha_p(\omega)(r-r_0)},$$

где $A_p(r)$ – амплитуда волны в расчетной точке; $A_p(r_0)$ – амплитуда волны в опорной точке; r_0 – расстояние от источника до опорной точки; $r > r_0$ – расстояние до рассматриваемой точки; ω – круговая частота колебаний; $\alpha_p(\omega)$ – амплитудный коэффициент поглощения. Из этой формулы видно, что коэффициент $\alpha_p(\omega)$, определяющий интенсивность ослабления колебаний с расстоянием, зависит от частоты. Теория упругого последствия приводит к линейной зависимости этого коэффициента от частоты:

$$\alpha_o(\omega) = \alpha_1 * \omega,$$

где α_1 – постоянная поглощения.

В качестве характеристики поглощающих свойств грунтов вместо коэффициента α удобно пользоваться безразмерным коэффициентом - декрементом поглощения $\nu = \alpha \lambda$, где λ – длина волны. Декремент поглощения определяется как поглощение энергии упругих колебаний на участке пути длиной в одну волну λ .

Этот показатель удобен тем, что для значительного диапазона частот слабо зависит от частоты колебаний или совсем от нее не зависит (Методические рекомендации, 1976). Значение декремента поглощения для разных грунтов и типов волн варьирует в целом от 0,01 – 0,02 до 0,9-0,95. По мнению Е.А.Вознесенского (2010), эти вариации связаны со свойствами самих грунтов, их составом, строением, а также с напряженным состоянием массива. Затухание, вызванное поглощением, пропорционально расстоянию, измеренному в длинах волн в направлении их распространения. Поэтому чем короче длина волны, тем меньше расстояние, на котором ее удастся проследить.

«Сейсмические свойства глинистых грунтов слабо зависят от их вещественного состава» (Горайнов, 1992, с. 14, 17). Однако «при прочих равных условиях наибольшими значениями V_p обладают монтмориллонитовые глины, промежуточные – в гидрослюдистых, наименьшие – в каолиновых. Значительно слабее та же тенденция выражена для V_s ». Скорее всего, это связано с различиями в количестве контактов между частицами названных глинистых минералов, а также их разной адсорбционной способностью и количеством связанной воды с аномальными свойствами. Следует отметить, что влияние вещественного состава на сейсмические свойства грунтов, особенно глинистых, изучено мало.

Установлено (Ляховицкий, Хмелевской, Ященко, 1989; Горайнов, Ляховицкий, 1992), что сейсмические свойства грунтов существенно зависят от характера структурных связей. При наличии прочных структурных связей скорости продольных и поперечных волн значительно выше.

Наиболее сложная и наименее изученная зависимость сейсмических свойств от фазового состава глинистых грунтов. По мнению Н.Н.Горайнова, Ф.М.Ляховицкого (1992) и др., рост объемной влажности талых глинистых грунтов при постоянной пористости приводит к

увеличению скорости продольных волн (рис. 1.19), однако, по данным И.Г.Минделя (1980), это не совсем так. Как отмечено в работе Н.И.Кригера, А.С.Алешина, А.Д.Кожевникова и И.Г.Миделя (1970), при влажностях до 25% зависимость между скоростью продольных волн и влажностью обратно пропорциональна. Авторы связывают снижение скоростей с ослаблением структурных связей при увеличении влажности. Результаты исследований Е.В.Щекочиной и Ю.И.Олянского (2008) подтверждают полученные данные.

Как видно из рис. 1.19, для немерзлых грунтов величина V_p возрастает лишь до некоторого значения W , различного для глинистых грунтов разного состава, после чего начинает несколько убывать. А затем резко возрастает. Скорее всего, плавное увеличение V_p связано с особыми свойствами содержащейся в грунтах связанной воды и *воды переходного типа* (согласно современной классификации видов воды в грунтах (Грунтоведение, 2005) – *примечание автора*). Данное предположение косвенно подтверждается рядом установленных Н.Н.Горяйновым (1992, с. 20) закономерностей, а именно: «1) чем большей активностью обладает глинистый минерал и чем выше дисперсность грунта, тем сильнее возрастает V_p при увеличении W , и тем в большем диапазоне изменения W отмечается увеличение V_p ; 2) значение W , при котором прекращается увеличение V_p , приблизительно совпадает с величиной максимальной молекулярной влагоемкости для данного типа грунта, которая показывает, какое количество связанной воды (и *воды переходного типа*) содержится в грунте под воздействием поверхностных сил притяжения. Таким образом, заполнение порового пространства связанной водой (и *водой переходного типа*) далеко не тождественно увеличению содержания свободной воды, которое обычно не сопровождается увеличением V_p » – факт, который подтверждается в Методическом пособии по инженерно-геологическому изучению горных пород (1984).

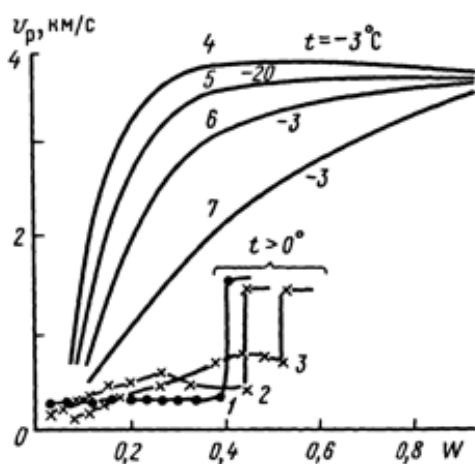


Рис. 1.19. Зависимость скорости продольных волн от объемной влажности для песчано-глинистых грунтов (результаты измерений на образцах при различной температуре).

Талые грунты: 1 - песок ($n=40\%$); 2 - каолиновая паста ($n=44\%$); 3 – гидрослюдисто-каолиновая паста ($n=52\%$); мерзлые грунты: 4 – песок; 5,6 – суглинок; 7 – глины (по Н.Н.Горяйнову, Ф.М.Ляховицкому, 1979)

Как отмечают Н.Н.Горяйнов и В.М.Ляховицкий (1979), сейсмические свойства глинистых грунтов в воздушно-сухом состоянии чрезвычайно сильно зависят от прочности структурных связей и могут варьировать в очень широких

пределах. Так, скорость продольных волн может изменяться от 200—300 м/с в спрессованном каолиновом порошке (между частицами действуют мало прочные молекулярные взаимодействия) до 1000 м/с и более в высушенных образцах природной глины того же состава и той же пористости (между частицами помимо молекулярных действуют и более прочные ионно-электростатические силы и силы химической природы, обуславливающие цементацию частиц – *прим. автора*). Известно, что скорости продольных волн в глинистых грунтах, находящихся в воздушно-сухом состоянии, выше, чем в песчано-обломочных (табл. 1.6). Это также можно объяснить ролью структурных связей, количества и типа контактов.

Таблица 1.6. Скорости распространения упругих волн в массивах дисперсных пород (в интервале глубин 0-15 м) (Методические рекомендации..., 1979)

| Грунты | V_p , м/с | V_s , м/с |
|-------------------------------|------------------|----------------|
| Валунно-галечные отложения | <u>500-1000</u> | <u>300-600</u> |
| | 2000-2800 | 300-600 |
| Галечники | <u>400-800</u> | <u>250-500</u> |
| | 1800-2400 | 250-500 |
| Пески | <u>140-500</u> | <u>90-300</u> |
| | 1600-1900 | 90-300 |
| Супеси | <u>250-550</u> | <u>120-280</u> |
| | 1450-1800 | 120-280 |
| Суглинки | <u>250-600</u> | <u>90-250</u> |
| | 1500-1900 | 90-250 |
| Глины: покровных отложений | <u>250-650</u> | <u>100-200</u> |
| | 1800-2000 | 100-200 |
| коренные | <u>2000-2400</u> | <u>200-500</u> |
| | 2000-2800 | 200-500 |

Примечание: в числителе даны значения для зоны аэрации, в знаменателе – ниже уровня грунтовых вод.

В Методических рекомендациях по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов (1979) приведены более низкие значения скоростей немерзлых глинистых грунтов по сравнению с данными рис. 1.19. Так, например, для немерзлых суглинков значения V_p не превышают 600 м/с для зоны аэрации и 1900 м/с для условия водонасыщения (табл. 1.6), а в мерзлом состоянии достигают 3500 м/с (см. рис. 1.19).

Скорость поперечных волн в глинистых грунтах в водонасыщенном состоянии обычно ниже, чем в воздушно-сухом при той же пористости, что связано с уменьшением при водонасыщении прочности структурных связей. В полностью влагонасыщенных мерзлых глинах величина V_s заметно ниже, чем при тех же условиях в песчано-обломочных грунтах.

«В соответствии с изменением V_p и V_s при переходе глинистых грунтов из одного состояния в другое меняется и отношение V_s/V_p . Так, для глинистых грунтов в воздушно-сухом состоянии величина V_s/V_p достигает 0,5-0,6, при полном заполнении пор водой она

равна 0,1-0,2, в случае полного влагонасыщения при небольшой отрицательной температуре $V_s/V_p = 0,4-0,5$ » (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 28).

В целом, отмечается уменьшение величины V_p в водонасыщенных глинистых грунтах с увеличением пористости. В воздушно-сухом состоянии зависимость противоположная. Влияние пористости на значения V_s изучено недостаточно, есть единичные данные об уменьшении V_s с увеличением пористости в воздушно-сухих глинистых грунтах.

Изучению зависимости сейсмических свойств грунтов от действующих напряжений посвящены работы А.И.Савича (1986), И.О.Турчанинова и В.И.Панина (1975), В.И.Бондарева (2003) и обобщены Н.Н.Горайновым и Ф.М.Ляховицким (1992). Для модели дискретной упругой среды с учетом сил сцепления (между частицами) скорости продольных и поперечных волн возрастают с глубиной (или ростом вертикальных напряжений).

В инженерной практике часто возникает необходимость знания упругих или более общих деформационных характеристик, описывающих поведение грунтов под воздействием какой-либо нагрузки, а также при прохождении естественных или искусственных колебаний (вибрации от работающих механизмов, движущегося транспорта, а также импульсные нагрузки, сейсмические волны землетрясений и т.п.).

«Под упругими характеристиками среды понимают показатели, определяемые линейным законом связи между напряжениями и деформациями (законом Гука) и характеризующие особенности ее упругого (обратимого) деформирования. Упругие свойства однородной изотропной среды полностью определяются значениями модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ » (Гурвич, Номоконов, 1981; Горайнов, 1992; Бондарев, 2003). При малых величинах напряжений большинство горных пород ведут себя, как упругие тела. В частности, упругое деформирование горных пород наблюдается при прохождении в них сейсмических и ультразвуковых волн.

При воздействии инженерных сооружений гораздо чаще встречаются случаи, когда грунт подвергается воздействию длительной достаточно большой нагрузки; например, под различными промышленными и жилыми зданиями и техническими сооружениями. В таких случаях возникающие деформации уже не полностью обратимы, а слагаются из обратимой (или упругой) и необратимой (или остаточной) частей. Единичный объем грунта после снятия нагрузки не возвращается в первоначальное состояние. Поведение грунта в этом режиме не может описываться законами теории идеальной упругости, а подчиняется (или не подчиняется) закону пропорциональности напряжений и деформаций (см. раздел 1.1).

По Н.Н.Горайнову (1979) выделяются полная упругая, идеально-упругая, остаточная и полная деформации (рис. 1.20), а также рассчитываются модули упругости и деформации.

Сейсмоакустические методы дают возможность определять значения так называемых динамических упругих параметров как на образцах грунтов, так и в условиях их естественного залегания для любых интересующих исследователя объемов грунта — от десятков и сотен кубических сантиметров до единиц, десятков, сотен и даже тысяч кубических метров. Такой возможностью не обладает ни один из прямых методов.

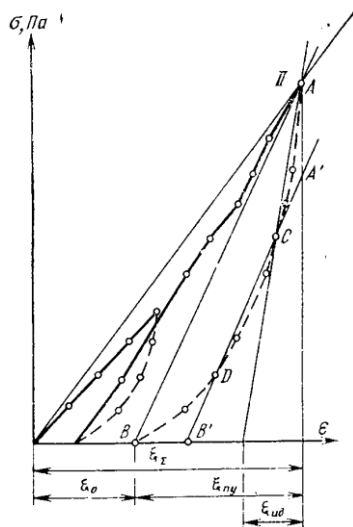


Рис. 1.20. График напряжение – деформация: σ – напряжение, Па; ε – деформация грунта; ε_{Σ} – суммарная деформация; $\varepsilon_{пу}$ – полная упругая деформация; ε_o – суммарная остаточная деформация; $\varepsilon_{ид}$ – идеально-упругая деформация (по Н.Н.Горайнову, 1979)

Значения динамического E_d и статического E_c модулей упругости различаются между собой. В идеально упругих телах величины E_d и E_c носят характер констант и различие между ними обусловлено в основном термодинамикой процесса деформации.

Из табл. 1.7 следует, что существуют значительные различия в условиях определения модуля E сравниваемыми методами; к такому выводу пришел и Е.С.Ватолин (1966). Наиболее значительным, по мнению А.И.Савича и З.Г.Ященко (1979, с. 28), является тот факт, что «данные сейсмоакустических методов в отличие от методов механики грунтов не содержат информации об остаточных деформациях изучаемых сред».

Согласно А.И.Савичу и З.Г.Ященко (1979, с. 36), одной из причин большого «разнообразия отношений E_c/E_d является неоднозначность определения E_c по результатам статических опытов. По графику деформации, являющемуся исходным для вычисления модуля E_c , его величину находят по ветвям как нагрузки, так и разгрузки. При этом в одних случаях значение E_c вычисляют по наклону касательной в какой-либо точке, в других – по наклону секущей, соединяющей начальную и конечную, или начальную или любую точку на графике деформаций». Того же мнения о неопределенности вычисления E_c придерживается В.Н.Никитин (1962).

В реальных грунтах, являющихся сложными полиминеральными агрегатами с более или менее развитой микро- и макротрещиноватостью, упругие характеристики представляют собой не константы, а параметры с численными значениями, зависящими от объема исследуемого грунта, величины напряжения, при котором определялась данная характеристика, длительности действия напряжения одного знака и некоторых других менее важных факторов. График деформации даже при малых напряжениях, обуславливающих только обратимые деформации, носит нелинейный характер.

Таблица 1.7. Сопоставление условий определения модуля упругости E методами механики горных пород и сейсмоакустическими методами (по А.И.Савичу, З.Г.Яценко, 1979, с. 28)

| Условия определения E | Методы | | Различие в значениях E |
|---|--|-------------------------------------|------------------------|
| | механики грунтов | сейсмоакустические | |
| действующее напряжение Н/м ² | 10 ⁵ -10 ⁷ | 10 ² -10 ³ | на 2-6 порядков |
| характер изменения действующих напряжений | переменный, ступенчатый | переменный, периодический, плавный | - |
| время действующих напряжений T, с | 10 ³ -10 ⁵ | 10 ⁻¹ -10 ⁻⁶ | на 4-11 порядков |
| измеряемые деформации, мм | 10 ⁻² -10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁹ | на 2-6 порядков |
| характер изменения измеряемых деформаций | переменный, скачкообразный | переменный (периодический), плавный | - |
| типы измеряемых деформаций | остаточные упруго-пластические (релаксационные), упругие | упруго-пластические, упругие | - |

По исследованиям В.Н.Никитина (1962, с. 127) «анализ данных совместных определений по стандартной методике величин динамического и статического модулей упругости на образцах различных типов *скальных грунтов* (выделение автора) позволил установить, что между E_c и E_д существует устойчивая связь. Соотношение E_д/E_c зависит только от абсолютной величины модуля упругости и не зависит от типа грунта. Математически оно выражается следующей эмпирической формулой»:

$$E_c = 0,35 * E_d^{1,141}.$$

По данным А.И.Савича и З.Г.Яценко (1979, с. 38) взаимоотношение статического и динамического модулей упругости описывается уравнением:

$$E_c = 0,97 * (E_d / E_{d \max})^{0,141} * E_d,$$

где E_{d max} = 1,3*10⁵ МПа.

Величина E_c , найденная по сейсмическим данным, называется «приведенным статическим модулем упругости» и выражает собой наиболее вероятное значение E_c , которое получилось бы при измерениях статическим методом на том же образце или участке грунта, где были измерены скорости упругих волн.

Необходимо подчеркнуть, что приведенные уравнения дают соотношение между динамическим и статическим модулями упругости при определении их на образцах преимущественно скальных грунтов в лабораторных условиях.

По данным других авторов, соотношения E_c/E_d для дисперсных грунтов обнаруживают зависимость от состава, строения и состояния (рис. 1.21).

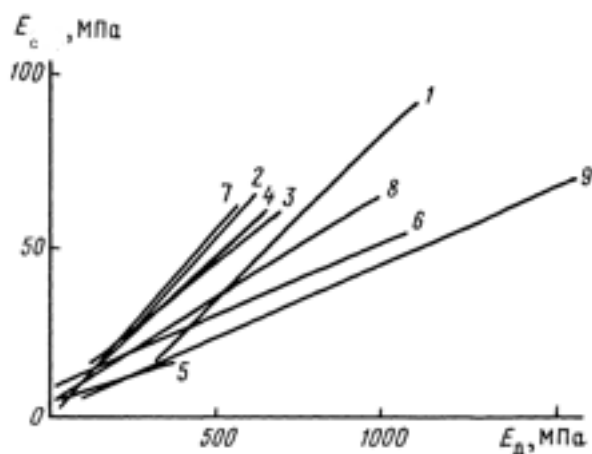


Рис. 1.21. Графики связи динамического модуля упругости E_d и модуля деформации E_c для талых грунтов:

1-щебнистые (по В.И.Бондареву); 2-пески (по В.И.Бондареву); 3-пески (по В.Н.Агееву); 4-песчано-глинистые (по В.И.Бондареву); 5-суглинки (по О.П.Аникину); 6-лессы и лессовидные суглинки (по И.Г.Минделю); 7-песчано-глинистые (по В.И.Бондареву); 8-песчано-глинистые (по Е.С.Григорчуку); 9-водонасыщенные пески (по В.Н.Агееву) (по Н.Н.Горайнову, Ф.М.Ляховицкому, 1992)

При сопоставлении E_0 , определенного в условиях естественного залегания методом нагружения штампа площадью от долей до единицы квадратного метра, с E_c , вычисленным по скоростям сейсмических волн, обнаруживается значительно большее различие, чем дается соотношением, приведенным выше. Объясняется это явление нелинейным характером деформирования больших объемов дисперсных грунтов даже в упругой области.

Это затруднение можно попытаться обойти, если, в соответствии с рекомендациями А. И. Савича и З.Г.Ященко (1979, с. 39), «по графику напряжение-деформация определить так называемый модуль идеальной упругости. Считается, что в случае, если с динамическим модулем упругости сопоставляется величина модуля идеальной упругости, то независимо от объема испытуемого грунта в статическом методе и способа определения E_c , соотношение $E_c=f(E_d)$ будет описываться выражением, указанным выше».

Следует отметить, что в опубликованной более поздней литературе нет подтверждений того, что предложенная зависимость $E_c(E_d)$ работает для глинистых грунтов. Более того, по мнению автора, такой универсальной зависимости быть не может в силу многообразия соотношений объемных долей фаз в глинистых грунтах и зависимости модуля общей деформации от нагрузки. Также необходимо понимать разницу между статическим модулем упругости E_c и модулем общей деформации E_0 для глинистых грунтов.

Как отмечают Н.Н.Горяйнов и Ф.М.Ляховицкий (1992), эффективность применения сейсмоакустических методов в инженерной геологии зависит от того, насколько тесно сейсмические свойства пород связаны с их объективными характеристиками, определяющими инженерно-геологические особенности изучаемого объекта. К основным из таких характеристик пород относятся: их вещественный и фазовый состав, характер связей между отдельными элементами твердой фазы и величина действующих напряжений. При этом для грунтов верхней части разреза главную роль играют прочность структурных связей и то, в каком состоянии - неводонасыщенном, водонасыщенном или мерзлом - находится грунт.

Использование сейсмоакустических методов для оценки модуля общей деформации E_0 основано на том, что как скорости упругих волн и динамический модуль Юнга E_d , определяемые при сейсмических измерениях, так и модуль общей деформации E_0 , характеризуют одно и то же свойство породы – способность деформироваться. Различия заключаются в том, что V_p , V_s и E_d характеризуют упругие деформации, возникающие при небольших кратковременных, знакопеременных нагрузках, в то время как E_0 характеризует полные деформации, соответствующие значительным и длительным нагрузкам одного знака. Таким образом, величины V_p , V_s и E_d , с одной стороны, и E_0 , с другой, соответствуют лишь разным стадиям одного и того же процесса - деформирования.

1.4.2. Использование сейсмоакустических методов для изучения деформационных свойств дисперсных грунтов

В общем виде сейсмоакустические методы исследований хорошо описаны И.И. Гурвичем, В.П.Номоконовым (1981), В.В. Палагиным и др. (1989), Ф.М. Ляховицким и др. (1989), У. Притчетом (1999), В.И. Бондаревым (2003) и др. Исходя из интересов изучения свойств грунтов и слагаемых ими массивов, наибольшее значение, по мнению автора, имеют работы И.Г. Минделя (1970, 1980), В.Н.Никитина (1981), А.И.Савича и З.Г.Яценко (1989), Н.Н. Горяйнова и Ф.М.Ляховицкого (1992), в которых отражены особенности применения сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии.

По мнению автора работы, наиболее полно и в обобщенном виде возможности и значение сейсмоакустических исследований в инженерной геологии представил А.И.Савич (1979) (табл. 1.8). Методика выполнения работ достаточно подробно изложена в работах (Турчанинов, Панин (1975), Горяйнов, Ляховицкий (1979), Савич, Яценко (1979), Никитин (1981), Рекомендациях по изучению напряженного состояния пород сейсмоакустическими методами (1986), Санфиоров, Ярославцев (2007)). Комплекс сейсмоакустических исследований обеспечивает возможность измерения скоростей продольных и поперечных волн в различных частях массива и практически с любой требуемой детальностью. Основными достоинствами методов геофизики являются возможность оценки деформационных свойств в естественном

Таблица 1.8. Характеристика основных видов сейсмоакустических исследований (по А.И.Савичу, З.Г.Яценко, 1979, с. 73)

| Виды исследований | Используемые частоты (для продольных волн) f , Гц | База измерений l , м | Объем (масштаб) единичных измерений, m^3 | Назначение исследований |
|---|---|---------------------------------|--|--|
| Сейсмические профильные наблюдения на поверхности земли (КМПВ, МПВ) | 30-100 | 50-200 и более | 10^4 - 10^7 и более | Схематизация строения массива; определение обобщенных показателей деформируемости |
| Сейсмическое просвечивание горных массивов | 30-100 | 50-200 и более | 10^4 - 10^7 и более | То же |
| Сейсмическое профилирование и просвечивание в горных выработках | 70-300 | 10-100 | 10^2 - 10^5 | Детальное изучение строения массива и свойств слагающих массив грунтов. Определение свойств пород в отдельных структурных зонах |
| Сейсмический каротаж | 70-300 | 10-100 | 10^2 - 10^5 | То же |
| Акустическое профилирование и просвечивание в горных выработках и на обнажениях | 1000-5000 | 1-20 | $1,0$ - 10^2 | Детальное изучение свойств грунтов. Определение динамических параметров в масштабе измерений, сопоставимом с масштабом статических опытов |
| Акустический и ультразвуковой каротаж | 1000-5000 20000-50000 | 1-10 и более 0,2-1,0 и более | 10^{-2} -1,0 | Детальное изучение свойств и состояния грунтов |
| Ультразвуковые наблюдения в шпурах и на обнажениях | 20000-50000 | 0,02-0,1 и более | 10^{-3} -1,0 | Детальное изучение структуры массива вокруг горных выработок. Определение значений V_p и E_d в масштабе, сопоставимом с масштабом статических опытов |
| Ультразвуковые исследования образцов | 20000-50000 | 0,02-0,1 | 10^{-4} | Детальное изучение свойств и состояния грунтов |

Примечание: КМПВ – корреляционный метод преломленных волн; МПВ – метод преломленных волн.

залегании грунтов, применение методов не вызывает изменений в состоянии грунтов и не приводит к нарушению естественных процессов. Кроме того, масштабы исследований могут меняться от 10^{-4} до 10^{10} м³, что позволяет получать объективную информацию о деформационных свойствах исследуемых грунтов и слагаемых ими массивов.

«Применение сейсмических методов исследования на стадии обоснования проектов строительства является наиболее сложившейся областью инженерной геофизики. Из широкого круга решаемых при этом инженерно-геологических задач выделяют: построение модели участка будущего строительства и изучение физико-механических свойств грунтов. Особенности применения методов, т.е. их комплексирование, разработка сети профилей и параметров сетей наблюдений, определяются конкретной сейсмогеологической обстановкой, а также экономическими соображениями. Определяющим фактором при этом является глубина исследований и желаемая детальность» (Санфилов, Ярославцев, 2007, с. 27).

«Методика сейсмических исследований для целей инженерной геологии чрезвычайно разнообразна. Основными факторами, определяющими выбор методики наблюдений, являются: 1) назначение исследований; 2) масштаб и стадия работ; 3) сейсмогеологические условия исследуемой территории (участка); 4) состав, назначение и объемы других видов работ — инженерно-геологических и геофизических» (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 34).

Перечисленными факторами определяются конкретные задачи сейсмических исследований, чем, в свою очередь, обуславливаются: 1) выбираемый частотный диапазон (сейсмический, акустический, ультразвуковой); 2) вид наблюдений (профилирование на поверхности, профилирование в горных выработках, просвечивание, каротаж и т. д.); 3) сеть наблюдений (расположение на местности наземных профилей, размещение профилей внутри массива и т. д.); 4) азимут наблюдений (ориентировка линий наблюдений, направление измерений при просвечивании и т. д.); 5) база измерений (расстояние между пунктами возбуждения и точками приема); 6) шаг измерений (расстояние между двумя соседними измерениями); 7) методика наблюдений (продольное или неперодольное профилирование, либо просвечивание); 8) система наблюдений (одиночная, встречная, нагоняющая и т. д.); 9) схема наблюдений (Z—Z, Y—Y, Z—X и т. д.); 10) периодичность наблюдений при стационарных исследованиях (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 34).

«Граница является сейсмической в том случае, если с ней связано изменение сейсмических свойств грунтов: скоростей волн, коэффициентов (декрементов) поглощения, акустической жесткости. Для изучения сейсмических границ стараются использовать наземные сейсмические измерения. В случае, когда форма рельефа сложная прибегают к сейсмическим измерениям во внутренних точках среды» (Горайнов, 1992, с. 157). Ультразвуковыми методами проводят изучение физических, водно-физических и физико-

механических свойств грунтов. Кроме того, все перечисленные выше методы применимы для изучения неоднородности и анизотропности грунтов.

Из различных методов сейсмических исследований ниже рассматриваются акустические и ультразвуковые.

«Акустические и ультразвуковые исследования в естественных условиях проводятся, как правило, во внутренних точках среды. Их целью является изучение строения массива с выделением неоднородностей более высоких порядков, чем при использовании сейсмического диапазона частот, а также оценка свойств грунтов в объемах, соизмеримых с объемами, участвующими в стандартных инженерно-геологических испытаниях. Кроме того, задачей акустических и ультразвуковых исследований является изучение скоростного строения среды с целью последующего использования полученных данных для интерпретации результатов наземных сейсмических наблюдений» (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 40).

Акустические и ультразвуковые исследования применяются для профилирования в горных выработках, просвечивания и каротажа. Кроме того, ультразвуковые измерения проводятся при изучении образцов грунта и моделировании.

Как отмечают Н.Н.Горайнов и Ф.М.Ляховицкий (1979), при изучении массивов, сложенных песчано-глинистыми грунтами, акустические и ультразвуковые методы находят гораздо более ограниченное применение по сравнению со скальными. Основная трудность заключается в быстром затухании волн высокой частоты в дисперсных грунтах (см. выше), что при отсутствии источников колебаний достаточной мощности позволяет производить измерения только на малых базах. Помимо этого, при ультразвуковых исследованиях песчано-глинистых грунтов сложно создать надежный контакт датчика и приемника с грунтом, причем их прижим, во избежание изменения естественных напряжений, должен быть несильным и идентичным при измерениях в различных точках.

«При изучении массивов песчано-глинистых грунтов ультразвуковые методы используют для измерений в шурфах, котлованах, канавах, а также для каротажа» (Горайнов, Ляховицкий, 1979, с. 40).

Во всех случаях, когда это возможно, измерения проводят при совместном использовании профилирования и просвечивания. С помощью первого метода удается получать наиболее надежные данные о скорости волн Рэлея, а второго — данные о скорости продольных волн, что позволяет осуществлять последующий расчет скорости поперечных волн. Следует отметить, что применение профилирования для определения скорости продольных волн обычно затрудняется наличием волны по воздуху, скорость которой соизмерима со скоростью продольных волн в неводонасыщенных песчано-глинистых грунтах.

Это обстоятельство затрудняет также использование ультразвукового каротажа при измерениях в неводонасыщенных песчано-глинистых грунтах.

«Каротажные наблюдения ведутся с применением трех- или пятиэлементного зонда с расстоянием между соседними датчиками от 5 до 10 см. По возможности используются встречные системы наблюдений с попеременным выполнением крайними элементами функций датчика и приемника. Ультразвуковые измерения широко используются при изучении образцов как скальных, так и песчано-глинистых грунтов. Целью исследований на образцах является получение данных о скоростях и коэффициентах поглощения упругих волн при одновременном изучении возможной анизотропии грунтов, а также установление связей между их сейсмическими и инженерно-геологическими характеристиками» (Горяйнов, Ляховицкий, 1979, с. 41).

Измерения на образцах ведутся с помощью просвечивания. Следует отметить, что ультразвуковые измерения достаточно часто ведутся в процессе производства стандартных инженерно-геологических испытаний, что позволяет изучать характер изменения сейсмических свойств грунтов под воздействием различных нагрузок. Говоря об измерениях на образцах, следует упомянуть резонансный метод, основанный на определении собственной частоты колебаний образца правильной формы. Он позволяет получать наиболее точные данные о скорости и поглощении волн в изучаемом материале.

Кроме того, ультразвуковые методы применяются для сейсмического моделирования, с помощью которого изучаются многие вопросы физики распространения упругих волн в реальных средах.

Как отмечают Н.Н.Горяйнов и Ф.М.Ляховицкий (1979), при решении инженерно-геологических задач все большее распространение получает особый вид моделирования, когда с помощью ультразвука исследуют модели, имитирующие развитие тех или иных геологических процессов. Такое моделирование служит для изучения характера отображения происходящих в массиве изменений в поле упругих колебаний и разработки на этой основе сейсмических способов контроля за динамикой процессов и методов их прогнозирования.

Упругие свойства глинистых грунтов зависят от их состава, плотности, влажности и, как отмечают Ф.М. Ляховицкий, В.К. Хмелевской, З.Г. Яценко (1979) и многие другие, изучены еще недостаточно.

«Значения динамических упругих параметров — модуля упругости E_d и коэффициента Пуассона μ вычисляются на основании формул теории упругости по найденным в результате лабораторных ультразвуковых наблюдений или полевых сейсмических наблюдений скоростей распространения продольной V_p и поперечной V_s упругих волн» (Никитин, 1981, с. 128):

$$E_d = V_s^2 * \rho * (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)$$

$$\text{или } E_d = V_p^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) / (1 - \mu);$$

$$\mu = (V_p^2 - 2V_s^2) / (2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)),$$

где ρ – плотность грунта; μ – коэффициент Пуассона.

Входящее в формулы значение плотности ρ предполагается известным (например, по данным лабораторных определений) и принимается равным некоторой постоянной величине для всего участка исследований.

По В.Н.Никитину (1981), в тех случаях, когда по тем или иным причинам известна только скорость продольных волн, может быть сделана приближенная оценка динамического модуля упругости для скальных грунтов на основании эмпирических корреляционных соотношений $E_d = f(V_p)$. Возможность экспериментального определения коэффициента Пуассона и модуля Юнга по скорости продольных волн посвящена работа В.В.Калинина и М.Л.Владова (2001).

Многие исследователи занимались изучением взаимосвязи статического и динамического модулей упругости для скальных грунтов (Никитин, 1962; Ухов, Паненков, 1968; Савич, Яценко, 1979), данных по изучению дисперсных грунтов значительно меньше. В.Е. Василевский получил корреляционное уравнение связи между скоростью продольных волн и модулем деформации (рис. 1.22) для широкого класса песчано-глинистых грунтов Украины (Никитин, 1981):

$$E_d = \rho \cdot e^{V_p / (0.126 \cdot V_p + 31)},$$

где ρ — плотность, г/см³; V_p — скорость продольных волн, м/с; E_d — модуль деформации, 10⁻¹ МПа.

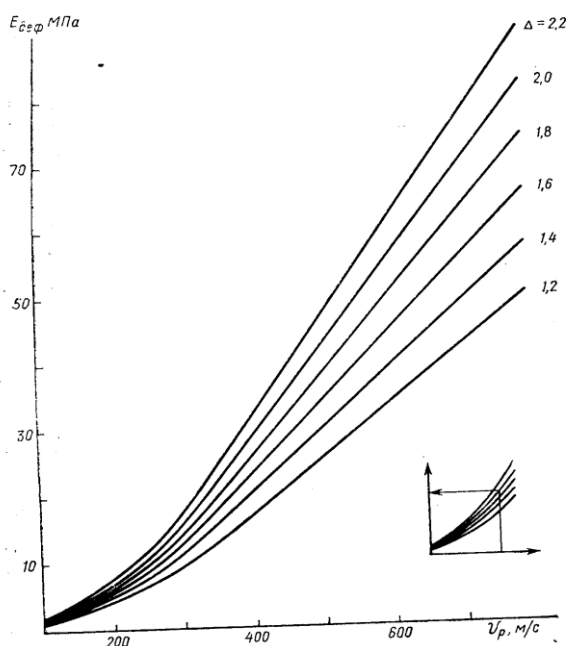


Рис. 1.22. Связь между модулем деформации и скоростью продольных волн для песчано-глинистых грунтов юга Украины (данные В.Е.Василевского, по Никитину, 1981)

Участие в корреляционном соотношении третьего параметра — плотности — делает уравнение более универсальным и повышает точность определения E_d .

Зависимость скорости поперечных волн от плотности скелета (ρ_d) для нескальных грунтов на глубине z имеет следующий вид:

$$V_{sz}=(A*\rho_d+B)*z^c,$$

где A и B — параметры, зависящие от составов твердой, жидкой и газообразной фаз, а также от динамических модулей упругости твердой фазы; C — параметр, зависящий от «сцепления» между отдельными зернами и равный примерно — для песков $C=1/6$, для суглинков $C=1/8$, для глин $C=1/10$ (Никитин, 1981).

Из анализа формулы следует, что на небольших глубинах, где величина z^c невелика, зависимость между V_s и ρ_d должна быть близка к линейной. Это подтверждается экспериментальными данными. В частности, установлена следующая расчетная формула для величины ρ_d в лёссах Средней Азии (Никитин, 1981):

$$\rho_d = 1,19 + 475*10^{-6}*V_s.$$

На практике для оценки плотностных свойств грунтов обычно используют величину V_p , которая определяется значительно проще, чем V_s . Чаще всего устанавливают корреляционные связи между V_p и естественной плотностью грунтов ρ . Следует отметить, что физическая обоснованность таких связей $V_p=f(\rho)$ дает возможность их широкого использования при решении обратных задач.

На рис. 1.23 показаны корреляционные зависимости $V_p=f(\rho)$ для различных сред (воздух, вода, лед) и грунтов. Большинство из них получено по результатам лабораторных измерений на образцах. При использовании этих зависимостей для грунтов в естественном залегании необходимо учитывать, что горное давление (напряженное состояние) в большей степени увеличивает скорость, чем плотность.

«В зоне аэрации ($V_p < 1,5$ км/с) наблюдаются следующие закономерности. Диапазон 0,2—0,5 км/с соответствует плотности 1,7—1,8 г/см³ для всех типов дисперсных грунтов (пески, суглинки, глины). При увеличении ρ нарастание V_p в наименьшей степени идет для зернистых (песчаных) грунтов, в большей — для суглинков и в еще большей — для глин. Это, по-видимому, объясняется тем, что в глинистых грунтах возрастание плотности вызывает не только увеличение числа контактов, но и быстрый рост сил сцепления. Таким образом, для неводонасыщенных дисперсных грунтов наблюдается достаточно четкая зависимость $V_p=f(\rho)$, однако, ее вид для грунтов различного состава неодинаков. В диапазоне 1,5—2,8 км/с заметно большое разнообразие корреляционных графиков. Для высокопористых, но жестких туфов, известняков характерны высокие V_p при малой ρ , для морских илов и осадков V_p практически не меняется при значительном изменении ρ » (Горяйнов, Ляховицкий, 1979, с. 125).

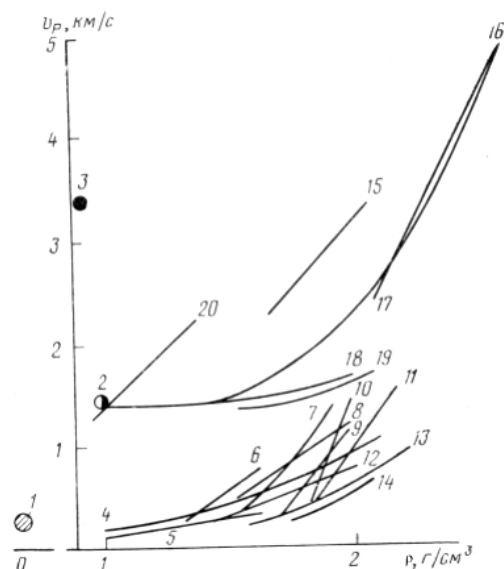


Рис. 1.23. Графики связи плотности ρ и скорости V_p : 1-воздух; 2-вода; 3-лед; 4-пролювий; 5-лессовая паста; 6-лессы; 7,10-глины; 8,9-суглинки; 11-аллювий; 12- гравий; 13-аллювий; 14-рыхлые грунты; 15-известняки; 16-зависимости Нейфа и Дрейка; 17-данные, полученные расчетом; 18,19-водонасыщенные илы; 20-пористый туф (по Н.Н.Горайнову, Ф.М.Ляховицкому, 1979)

У некоторых авторов (Савич, Яценко, 1979; Миндель, 1980 и др.) приводится ряд корреляционных зависимостей между показателями деформационных свойств, полученных инженерно-геологическими методами и по результатам геофизическими исследований. Приведем некоторые из них (Методические рекомендации..., 1976):

$$\text{модуль Юнга: } E = 102,94 \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu) / (1 - \mu);$$

модуль общей деформации (для нагрузки $< 0,2 \text{ МПа}$):

$$E_0 = 0,0549V_p + 0,666V_s + 145,4\rho_d + 20,66(I_p - 27,8) \cdot (\rho_d - 1,56) - 266,1$$

(уравнение имеет коэффициент корреляции $r = 0,83$);

$$E_0 = 0,0709V_p + 0,6064V_s - 47,7;$$

для штамповых испытаний (по И.Г. Минделю): $E_0 = 0,045E_d + 70$ ($r = 0,81$);

для компрессионных испытаний (по И.Г. Минделю): $E_0 = 0,27V_p - 88$ ($r = 0,73$).

Из приведенного выше материала следует, что применение геофизических методов для оценки инженерно-геологических параметров используется довольно давно и дает неплохие результаты.

Физической основой использования сейсмических методов для оценки модуля общей деформации является то, что скорости упругих волн, динамический модуль упругости, также как и модуль общей деформации характеризуют способность грунта деформироваться (хотя при этом действуют разные нагрузки) и отражают особенности его состава, строения и состояния.

E_d и E_0 , как можно предположить, в большинстве случаев зависят от одних и тех же причин и, следовательно, связь между ними должна быть функциональной, что подтверждают и Paul M. Santi и др (2000).

Однако на практике составление прямых расчетных формул затруднительно вследствие сложности реакции грунта на внешнее воздействие и необходимости учета различных трудноопределяемых величин. В этих условиях прибегают к установлению связей между E_0 и E_d экспериментальным путем, имея в виду, что с физической точки зрения эти связи обоснованы.

Для песчано-глинистых неводонасыщенных грунтов подобные зависимости можно найти в опубликованной литературе. Наиболее общая из них представлена ниже (Материалы к совещанию..., 1969):

$$E_c = 0,061E_d + 28,5 \text{ (кгс/см}^2\text{)}.$$

Эта формула получена при сопоставлении измерений в сейсмическом диапазоне частот с результатами полевых определений E_c с помощью штампов и применима для $4,5 < E_c < 61,6$ МПа.

Все приведенные выше уравнения связи между E_0 , E_c и E_d были опробованы в различных природных условиях и дали результаты с погрешностью, не превышающей 10—15%.

В литературных источниках имеются сведения по сопоставлению статического модуля деформации, получаемого при инженерно-геологических исследованиях и динамического E_d , определяемого по данным сейсморазведки. Такие исследования проводились, например, для песчаных грунтов Западной Сибири и песчано-глинистых грунтов Урала. Оказалось, что характер корреляционной связи существенно различен для сухих и водонасыщенных грунтов. Точность определения E_d по данным сейсморазведки составляет 3-5 МПа. Определение статического модуля деформации с помощью сейсморазведки осуществляется в 2-3 раза быстрее, чем инженерно-геологическими методами (Материалы к совещанию..., 1969).

К сожалению, на сегодняшний день отсутствуют обобщающие литературные данные по результатам использования сейсмоакустических методов для оценки деформационных свойств наиболее сложных объектов – глинистых грунтов и слагаемых ими массивов. Анализ опубликованной литературы свидетельствует, что универсальных взаимосвязей между скоростями упругих волн и инженерно-геологическими показателями деформационных свойств глинистых грунтов нет и, по-видимому, не может быть в принципе. Однако решение задачи поиска корреляционных связей между динамическими характеристиками среды (V_p , V_s , E_d и др.) и деформационными показателями, полученными при действии статических нагрузок (в образце и массиве), в каждом конкретном случае следует считать возможным и перспективным для практического использования.

По данным многих авторов, как отечественных, так и зарубежных, отмечается недостаточное внимание исследователей к затуханию сейсмических волн (Денисов, 2007; Сысоев, 2008; Файзуллин и др., 2008; Singh, 2008 и др.). Как отмечают А.В.Баев, Н.В.Куценко, И.С.Файзуллин (2007), коэффициент затухания по экспериментальным данным более значимый, чем по литературным. Это направление исследований является перспективным и может внести коррективы в обработку результатов инженерно-геофизических исследований.

Выводы по главе

1. В большинстве работ по изучаемой теме отмечается, что при изучении процесса деформирования глинистых грунтов одним из основных допущений при расчете показателей деформационных свойств является применение теории линейного деформирования.

2. Можно считать установленным на качественном уровне влияние внешних (давления, температуры, условий нагружения) и внутренних (вещественного состава, строения, структурных связей, состояния) факторов на деформируемость глинистых грунтов. При этом вариации значений модуля общей деформации и коэффициента поперечного расширения под влиянием вышеперечисленных действующих факторов не определены.

3. Применяемые инженерно-геологические методы исследования деформационных свойств глинистых грунтов (прямые и косвенные) 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 в зависимости от метода.

Корреляционные взаимосвязи деформационных показателей глинистых грунтов, полученные различными инженерно-геологическими методами (лабораторными и полевыми) и описанные в литературе, немногочисленны.

4. До настоящего времени нет единой, принятой для твердых материалов и механических условий нагружения методики экспериментального определения коэффициента поперечного расширения.

5. Существуют различные сейсмические методы исследований деформационных свойств грунтов и слагаемых ими массивов. Их применение имеет ряд преимуществ (в сравнении с инженерно-геологическими), связанных с возможностями сохранения естественного строения и состояния грунтов, обеспечением разной степени детальности и почти неограниченной глубинности исследований, непрерывности измерений в пространстве, меньшей трудоемкостью и экономической выгодой. Для лабораторных исследований целесообразно использование ультразвукового метода.

6. Влияние действующих факторов на сейсмические свойства дисперсных грунтов изучено слабо. Полученные зависимости различны для грунтов разного типа.

7. Большинство исследователей сходятся во мнении, что установление эмпирических корреляционных соотношений между показателями деформационных свойств, полученными инженерно-геологическими и ультразвуковым методами, является актуальной задачей и имеет большое практическое значение.

Исходя из вышеизложенного были сформулированы **задачи** настоящей работы, приведенные во введении.

Глава 2. Выбор объектов и методик исследования

2.1. Обоснование выбора объектов исследования

При выборе объектов исследования автор руководствовался следующими принципами: 1) все образцы должны быть глинистыми по дисперсному составу; 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.

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).

Моренные суглинки донского горизонта ($gQ_{I\text{dns}}$) были выбраны для исследований преимущественно из одного места опробования как грунты близкого минерального состава и дисперсности, маловлажные, с низкой коллоидной активностью, небольшой усадкой, схожими физическими и физико-механическими свойствами, невысокой сжимаемостью.

Юрские глинистые грунты оксфордского яруса (J_{3ox}) были выбраны как отличающиеся от моренных суглинков большей дисперсностью, слоистостью, пористостью, сжимаемостью (несмотря на присутствие цементационных контактов и связей).

Для исследований были отобраны 35 образцов четвертичных моренных глинистых грунтов, 25 из них в г. Москве, в ЮЗАО, коммунальной зоне Щербинка (район Южное Бутово) (табл. 2.1) (Отчет, ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2011). В геологическом строении участка до глубины 30 м встречаются:

- современные техногенные образования (tQ_{IV});
- среднечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения московского горизонта ($f,lgQ_{II\text{ms}}$);
- нижнее-среднечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения донского-московского горизонта ($f,lgQ_{I\text{dns-QIIms}}$);
- нижнечетвертичные ледниковые отложения (морена) донского горизонта ($gQ_{I\text{dns}}$);
- отложения нижнего отдела меловой системы (K_1).

Еще десять образцов четвертичных моренных суглинков были отобраны в ходе инженерно-геологических изысканий для проекта реконструкции тепломагистрали в районе «Измайлово» Восточного АО г. Москвы, между ул. Верхняя Первомайская и ул. Измайловский бульвар (табл. 2.1).

В геологическом строении участка опробования на глубину до 10 м выделяются:

- современные техногенные отложения (tQ_{IV});
- нижне-среднечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения донского-московского горизонта ($f, lgQ_{I\dots IV}$);
- нижнечетвертичные ледниковые отложения донского горизонта ($gQ_{I\dots IV}$) (Отчет, «Карбон», 2011).

Кроме того, были исследованы 15 образцов юрских оксфордских глин, 10 из которых отобраны в районе д. Аносина Истринского района Московской области (табл. 2.1). В геологическом строении участка опробования до глубины 30 м сверху вниз выделяются:

- современные аллювиальные отложения поймы р. Истры (aQ_{IV});
- среднечетвертичные водно-ледниковые отложения московского горизонта ($fQ_{I\dots IV}$);
- нижнечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения сетуньско-донского горизонта ($flgQ_{I\dots IV}$);
- отложения титонского яруса верхнего отдела юрской системы (J_{3tt});
- отложения оксфордского яруса верхнего отдела юрской системы (J_{3ox}) (Отчет, ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2010).

4 образца юрских оксфордских отложений отобраны по адресу: г. Москва, Олимпийский проспект, д. 16 (табл. 2.1). В геологическом строении этой территории до глубины 37 м сверху вниз выделяются:

- современные техногенные отложения (tQ_{IV});
- современные озёрно-болотные отложения (l, bQ_{IV});
- современные аллювиальные отложения поймы р. Непрудной (aQ_{IV});
- среднечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения московского горизонта ($f, lgQ_{I\dots IV}$);
- нижнечетвертичные ледниковые отложения (морена) донского горизонта ($gQ_{I\dots IV}$);
- нижнечетвертичные водно- и озерно-ледниковые отложения сетуньско-донского горизонта ($flgQ_{I\dots IV}$);
- отложения верхнего отдела юрской системы: титонского яруса (J_{3tt}) и оксфордского яруса (J_{3ox});
- отложения верхнего отдела каменноугольной системы: измайловская пачка (C_{3izm}), мещеринская пачка (C_{3msc}), перхуровская пачка (C_{3prh}) (Отчет, «Карбон», 2009).

Один образец юрской оксфордской глины отобран в районе ЦАО г. Москвы на Новолужнецком проезде, у электроподстанции «Золотаревская» (табл. 2.1). В геологическом строении этого участка до глубины 25 м сверху вниз выделяются:

Таблица 2.1. Общие сведения об объектах исследования

| № п/п | Местоположение участков опробования | Элемент рельефа | Геологический индекс | Глубина залегания кровли грунтов, м | Мощность, м | Описание грунтов | Номера и количество образцов |
|-------|--|--|----------------------|-------------------------------------|-------------|---|---|
| 1 | Москва, ЮЗАО коммунальная зона Щербинка, Южное Бутово | водораздел рек Гвоздянка и Пустышка | gQ ₁ dns | 8-15 | 5-10 | суглинки коричневые, темно-коричневые, от полутвердых до тугопластичных, опесчаненные, с включениями гравия и гальки преимущественно карбонатного состава | Щ.с-123; Щ.с-120 (25) |
| 2 | Москва, ВАО, между ул. Верхняя Первомайская и ул. Измайловский бульвар | водораздельная равнина | gQ ₁ dns | 5-6 | 15-17 | суглинки тяжелые, темно-коричневые, от полутвердых до твердых, с гравием, галькой 5-10 % | 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2, 7.1, 7.2, 8.1, 8.2, 9.1, 9.2, 10.1, 10.2 (20) |
| 3 | Москва, ЮАО, МР Москворечье-Сабурово, ст. м. Каширская | долина р. Чертановка | gQ ₁ dns | 7-9 | 2.7-13.3 | суглинки тяжелые, коричневые, полутвердые, с прослоями тугопластичных, с гравием, галькой 5-10 % | М1,М2,М3,М4 (120) |
| 4 | д. Аносино Истринского района Московской области | правобережная пойма р.Истры | J ₃ ox | 20-22 | 7-10 | глины тяжелые, серые, темно-серые, твердые, слюдистые, жирные, тонкослоистые, с включениями обломков раковин моллюсков и ростров белемнитов | А.с-123 (10) |
| 5 | Москва, ЦАО, Олимпийский проспект, д. 16 | склон долины р.Непрудная (сейчас засыпана) | J ₃ ox | 15-17 | 5-9 | глины тяжёлые, черные, к подошве тёмно-серые, слабо слюдистые, с редкими обломкам раковин аммонитов и белемнитов | с-5, с-9(19,5 м), с-9(20,5 м), с-11 (4) |
| 6 | Москва, ЦАО, ПС «Золотаревская» | пойма р. Москвы | J ₃ ox | 10-12 | 6,5-8 | глина тяжёлая, тёмно-серая, твёрдая, слюдистая, с включениями обломков раковин моллюсков и ростров белемнитов | З.с-12(15,4 м) (1) |

- современные техногенные образования (tQ_{IV});
- современные аллювиальные отложения поймы р. Москвы (aQ_{IV});
- отложения юрской системы верхнего отдела титонского яруса (J_{3tt});
- отложения юрской системы верхнего отдела оксфордского яруса (J_{3ox});
- отложения юрской системы среднего отдела келловейского яруса (J_{2k}) (Отчет, ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2008).

Глубины отбора образцов для лабораторных исследований изменяются от 10 до 30 м у юрских грунтов и от 5 до 19 м у четвертичных (табл. 2.1).

Для изготовления модельных глинистых грунтов использовались образцы, отобранные в ходе инженерно-геологических изысканий для строительства многофункционального торгово-развлекательного комплекса в г. Москве, районе Москворечье-Сабурово, пересечении проектируемого проезда №3888 и ул. Москворечье (табл. 2.1).

В геологическом строении территории на глубину до 15 м выделяются:

- современные техногенные отложения (tQ_{IV});
- среднечетвертичные ледниковые отложения московского горизонта (gQ_{IIms});
- нижне-среднечетвертичные флювиогляциальные отложения донско-московского горизонта ($fQ_{Idns-Q_{IIms}}$);
- нижнечетвертичные ледниковые отложения донского горизонта (gQ_{Idns}) (Отчет, ЗАО «ИНЖЭКО ЦЕНТР», 2008).

Подготовка модельных образцов глинистых грунтов

Для минимизации факторов, влияющих на скорости упругих волн в сериях экспериментов, были подготовлены модельные образцы нарушенного сложения.

При создании модельных образцов использовались достаточно широко распространенные на территории г. Москвы моренные суглинки донского оледенения (gQ_{Idns}), измельченные с помощью электрической мельницы ЛДИ-65 для исключения влияния крупнообломочного материала (гравия, дресвы), содержащегося в исходных отложениях морены. Растертый грунт соответствовал суглинку тяжелому пылеватому по ГОСТ 25100-2011 (модельный грунт М1). Для создания второго модельного грунта (М2) к исходному грунту было добавлено 10% среднепесчаной фракции флювиогляциального песка ($fQ_{Idns-Q_{IIms}}$), третьего (М3) - 25 % , четвертого (М4) – 35 % (рис. 2.1). Средняя фракция песка (0,25-0,5 мм) была выбрана как характерная для отложений ледникового и водно-ледникового генезиса и «скелетообразующая» для модельных грунтов.

Выбор перемолотого моренного суглинка в качестве основы для модельных грунтов обоснован их близостью по минеральному составу к природным моренным суглинкам четвертичного возраста.



Рис. 2.1. Пасты для приготовления модельных грунтов с весовой влажностью $W=20\%$

Для проведения исследований были приготовлены образцы цилиндрической формы диаметром около 3,6 см и высотой около 7,2 см. Они изготавливались формованием в специальных сборных металлических формах (рис. 2.2) при разных значениях влажности и разных нагрузках уплотнения. Исходные влажности составляли: 7, 10, 15, 20 %. Конечная влажность образцов контролировалась, так как в процессе приготовления пасты, ее уплотнения и дальнейших исследований образцы теряли часть влаги, что связано с отжимом жидкости при изготовлении водонасыщенных образцов, подсыханием образцов во время экспериментов и др. Нагрузка предварительного уплотнения менялась от 2 до 14 кг (0,02-0,12 МПа) для образцов одной и той же влажности и прикладывалась в течение 1 суток (для стабилизации деформаций, равномерного распределения влаги и уплотнения). После извлечения образцов из форм они взвешивались. Всего было подготовлено около 120 образцов. Затем, с помощью штангенциркуля (с трехкратной повторностью для определения средних значений) измерялись их линейные размеры – высота и диаметр.

Для всех модельных грунтов были определены *оптимальные нагрузки уплотнения* (см. приложение 1, рис. 1) – нагрузки, при которых достигается почти постоянная и близкая к максимальной для данного грунта прочность; а также *оптимальные влажности* (см. приложение 1, рис. 2) – значения влажности, при которых достигается максимальная плотность скелета при постоянной нагрузке уплотнения (Воронкевич, 2005).



Рис. 2.2. Формы для изготовления образцов модельных глинистых грунтов

По графикам зависимости прочности образцов от нагрузки предварительного уплотнения $R_c=f(P)$ для суглинков тяжелых М1 было установлено, что нагрузка оптимального уплотнения меняется в зависимости от влажности от 10 кг при $W=10\%$ до 3 кг при $W=15-20\%$ (приложение 1, рис. 1, а). Для суглинков легких М2 значение нагрузки оптимального уплотнения уменьшается от 14 до 7 кг при увеличении влажности от 10 до 20% (приложение 1, рис. 1, б). Для супесей М3 нагрузка оптимального уплотнения меняется от 14 до 7 кг при W от 7 до 20% (приложение 1, рис. 1, в). У супеси М4 при увеличении начальной влажности от 7 до 20% оптимальная нагрузка уплотнения снижается от 14 до 10 кг (приложение 1, рис. 1, г). Таким образом, в большинстве случаев при одинаковой задаваемой влажности наблюдается рост оптимальной нагрузки уплотнения с повышением количества песчаных частиц (переходе от суглинков М1, М2 к супесям М3, М4), снижением дисперсности. Оптимальная нагрузка уплотнения уменьшается с повышением задаваемой влажности для каждой из исследуемых моделей. Последнее обстоятельство связано с тем, что сжимающая нагрузка в мало влажных грунтах воспринимается преимущественно скелетом, а в грунтах с большей влажностью еще и поровым раствором. При оптимальной нагрузке уплотнения формируется наиболее «водоустойчивое» строение грунта (Воронкевич, 2005).

Максимальная плотность скелета в суглинках М1 достигается при нагрузках уплотнения от 12 до 7 кг с ростом влажности от 10 до 20% (приложение 1, рис. 2, а). У суглинков М2 в том же диапазоне влажности от 10 до 5 кг (приложение 1, рис. 2, б). У супесей М3 при повышении влажности от 7 до 20% максимальная плотность скелета достигается при нагрузках от 10 до 3 кг, а у супесей М4 от 8 до 5 кг (приложение 1, рис. 2, в, г). С ростом задаваемой влажности максимальная плотность скелелта снижается, это связано с тем, что, с одной стороны, вода выполняет роль смазки и облегчает сближение частиц, с другой, - нагрузку уплотнения воспринимает не только скелет грунта, но и жидкая составляющая, заполняющая поры и пустоты. Для суглинков (М1, М2) характерны большие значения оптимальных нагрузок уплотнения при одинаковой влажности, чем для супесей (М3, М4).

Возможно, это связано с тем, что с ростом количества высокодисперсных частиц необходимо большее количество энергии на выполнение одной и той же работы.

Значения оптимальной влажности для модельных суглинков (М1, М2) выше, чем для супесей (М3, М4), и составили 12-15% и 10-12% соответственно (приложение 1, рис. 2). С ростом количества глинистых частиц, в грунте удерживается большее количество влаги, в менее дисперсных образцах отжатие воды идет активнее. Поэтому значения оптимальной влажности выше в суглинках. Минимальным нагрузкам уплотнения соответствуют максимальные значения влажности оптимального уплотнения. Это связано с тем, что связанная вода выполняет роль смазки во время уплотнения грунта, соответственно чем ее больше, тем легче идет процесс при малых нагрузках.

Разница в значениях плотности скелета грунта при уплотнении меняется в наибольшем диапазоне у суглинков (М1, М2) на 0,4-0,6 г/см³ при влажности 10 % и 0,15-0,30 г/см³ при задаваемой влажности 20 %. Для супесей (М3, М4) при задаваемой влажности от 7 до 20 % диапазон изменения ρ_d меняется от 0,3 до 0,1 г/см³. Таким образом, для всех модельных грунтов прослеживается снижение интервала изменений плотности скелета с ростом влажности и уменьшением дисперсности. Полученные закономерности связаны с меньшей сжимаемостью жидкого компонента по сравнению с газом и большей уплотняемостью высокодисперсных модельных грунтов по сравнению с менее дисперсными. Значения плотности скелета при оптимальных значениях влажности при нагрузках от 2 до 14 кг ниже у суглинков М1, М2 (1,90-2,05 г/см³) по сравнению с супесями М3, М4 (2,05-2,15 г/см³).

Изучение влияния влажности и дисперсности на уплотняемость глинистых грунтов проводилось автором совместно с Таракановским М.К. (2011).

2.2. Методики экспериментальных исследований

Для решения задачи изучения скоростных характеристик глинистых грунтов и анализа влияющих факторов были проведены ультразвуковые исследования, а также по стандартным грунтоведческим методикам определены показатели состава, строения, состояния и свойств модельных и природных грунтов. По результатам проведенных исследований получены скорости продольных (V_p) и поперечных волн (V_s), рассчитаны отношения скоростей (V_s/V_p). Показатели состава, строения и свойств образцов глинистых грунтов приведены ниже.

Для исследования деформационных свойств глинистых грунтов с помощью лабораторных инженерно-геологических методов проведены наиболее широко распространенные компрессионные испытания природных грунтов, а также одноосное сжатие природных и модельных образцов. Выбор одноосного сжатия для определения деформационных характеристик обусловлен следующими причинами: 1) возможностью

ультразвукового просвечивания тех же самых образцов и в том же продольном направлении, что и сжатие; 2) наличием приборной базы и возможностями установки приборов производства ООО «НПП «Геотек»» регистрировать поперечные и продольные деформации; 3) малыми по сравнению с компрессией и трехосным сжатием временными затратами. По результатам проведенных исследований были получены модули относительной деформации, начальные модули сжатия и коэффициенты поперечного расширения грунтов. По скоростям упругих волн рассчитаны динамические характеристики – модуль упругости и коэффициент Пуассона исследуемых грунтов.

Таким образом, проводя запланированный эксперимент, мы должны получить следующие данные (консистенция грунтов меняется от твердой до мягкопластичной):

- коэффициенты сжимаемости для различных интервалов нагрузок при компрессии;
- модули компрессионной и общей деформации для тех же интервалов нагрузок;
- начальный модуль сжатия, модуль относительной деформации и коэффициент поперечного расширения по результатам одноосного сжатия;
- скорости продольных и поперечных волн, их соотношение;
- динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона, рассчитанные по результатам сейсмоакустических исследований.

Анализ этих данных позволит исследовать закономерности распространения упругих волн в глинистых грунтах, а также дать сравнительную характеристику деформационных свойств исследуемых грунтов, полученных разными методами.

Статистическая обработка полученных данных и установление корреляционных взаимоотношений между показателями деформационных свойств и скоростями упругих волн, полученных при ультразвуковом просвечивании, проводилась с использованием программы Statistica 6.0 и Excel.

Методики изучения состава, строения и свойств грунтов

Минеральный состав модельных грунтов изучался с помощью метода рентгеновской дифрактометрии (Лабораторные работы, 2008). Рентгенодифракционный количественный анализ проводился при помощи рентгеновского дифрактометра Ultima-IV фирмы Rigaku (Япония). Рабочий режим – 40 кВ-40 мА, медное излучение, никелевый фильтр, диапазон измерений – $3.6-65^\circ 2\theta$, шаг по углу сканирования $0.02^\circ 2\theta$, фиксированная система фокусируемых щелей. Для ускорения съемки и повышения качества экспериментальных данных использовался полупроводниковый детектор нового поколения - DTex/Ultra: скорость сканирования – $10^\circ 2\theta/\text{минуту}$ (исследования проведены снс. В.В.Крупской). Кроме того,

использовались опубликованные данные и фондовые материалы кафедры инженерной и экологической геологии.

Содержание карбонатов в природных грунтах определялось с помощью кальциметра по методике И.Ф.Голубева (Голубев, 1963).

При изучении *гранулометрического состава* грунтов природного сложения и модельных были проведены пипеточные анализы. Подготовка грунтов была выполнена по методике П.Ф.Мельникова (растирание с пирофосфатом натрия) (Лабораторные работы, 2008). По данным гранулометрического анализа были построены интегральные кривые распределения частиц по размерам, определены средние диаметры частиц.

Изучение внутренней неоднородности образцов и оценка открытой пористости проводилась с помощью метода рентгеновской компьютерной томографии и комплекса для анализа пространственной структуры образцов с высоким разрешением и рентгеновским 3D сканером Yamato TDM 1000H-II. Физические основы метода и описание методик проведения эксперимента описаны, например, в статье Luiz F.Pires, Jaqueline A.R.Borges и др. (2010). Съемка образцов выполнена асп. Л.Г.Булыгиной.

Микростроение изучалось с применением высокоразрешающей растровой электронной микроскопии (РЭМ) с помощью микроскопа LEO 1450VP и программного комплекса по анализу изображений «STIMAN» (Соколов, Юрковец, Разгулина, 2008; Лабораторные работы, 2008). Получение и обработка РЭМ-изображений проведены под руководством проф. В.Н.Соколова.

Рентгеновский дифрактометр и 3D сканер, а также микроскоп LEO 1450VP позволяют проводить исследования с высокой точностью и на высоком технологическом уровне. Приборы приобретены по программе развития Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Плотность грунтов (ρ) определялась для всех образцов естественного сложения методом режущего кольца (ГОСТ 5180-84) (Лабораторные работы, 2008).

Плотность частиц (ρ_s). Определение плотности твердого компонента (частиц) образцов проводилось с помощью методики и прибора В.Я. Калачева «Пэла-2». (Лабораторные работы, 2008).

Плотность скелета (ρ_d), *пористость (n)*, *коэффициент пористости (e)* определялись расчетными методами, с использованием следующих формул (Грунтоведение, 2005):

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+0,01 \times W_e}; \quad n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}; \quad e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}.$$

Влажность грунтов (W_e), естественная и задаваемая в экспериментах, определялась весовым способом (Лабораторные работы, 2008).

Расчетными методами были определены объемные доли фаз – твердой ΔT , жидкой $\Delta Ж$ и газовой $\Delta Г$:

$$\Delta T = 100 - n; \Delta Ж = W_{об} = \frac{W_e \times \rho_d}{\rho_{воды}}; \Delta Г = n - \Delta Ж.$$

Значения *степени влажности* (S_r) и *показателя текучести* (I_L) получены с помощью следующих формул (Лабораторные работы, 2008):

$$S_r = \frac{W \times \rho_d}{n \times \rho_v}; I_L = \frac{W_e - W_p}{I_p}.$$

Для характеристики физико-химических свойств грунтов определялись *показатели пластичности*: верхний предел пластичности W_L методом балансирующего конуса; нижний предел пластичности W_p методом раскатывания в шнур (ГОСТ 5180-84; Лабораторные работы, 2008). По их разности рассчитывалось число пластичности I_p , по которому давалось название грунтам в соответствии с ГОСТ 25100-2011.

Влажность максимальной молекулярной влагоемкости ($W_{ммв}$) определялась с помощью метода влагоемких сред по А.Ф. Лебедеву с использованием гидравлического пресса (Лабораторные работы, 2008).

Максимальная гигроскопическая влажность ($W_{мг}$), характеризующая общее количество связанной воды в грунте, определялась по методу Митчерлиха, который считается наиболее обоснованным (Грунтоведение, 2005). В качестве косвенного показателя адсорбционных свойств грунтов и для подготовки модельных образцов разной влажности определялась *гигроскопическая влажность* (влажность воздушно-сухого грунта W_e) весовым способом (Лабораторные работы, 2008).

Методики изучения деформационных свойств глинистых грунтов инженерно-геологическими методами

Для оценки деформационных свойств в лабораторных условиях, проводились *компрессионные испытания* на приборах АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек»» (рис. 2.3, а). Испытания проводились при пяти ступенях нагрузки: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 МПа, до условной стабилизации деформаций 0,01 мм за 12 часов. При этом определялись значения показателей плотности и влажности до и после компрессионных испытаний. Обработка данных компрессионных испытаний для оценки деформационных свойств проводилась по традиционной схеме (см. главу 1), значения коэффициента стеснения поперечной деформации β (по Гольдштейну, 1971) были взяты по ГОСТ 12248-96.

Модули деформации по результатам компрессионных испытаний рассчитывались по стандартной методике (ГОСТ 12248-2010, Лабораторные работы, 2008) 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

(для некоторых грунтов проявлялась структурная прочность, и значения деформационных характеристик при малых нагрузках были очень высокими). Для минимизации этого фактора расчет модулей деформации проводился по участку нагружения от природного давления $P_{пр}$ до давления предела пропорциональности $P_{пп}$ (участок I на рис. 2.4) по аналогии со штамповыми испытаниями (рис. 2.5). Подробные рекомендации и описание методики определения модулей деформации приведены в стандарте МОСГОРГЕОТРЕСТ (2009) и опубликованы в статье Р.С.Зиангирова, А.Г. Кошелева (2010).

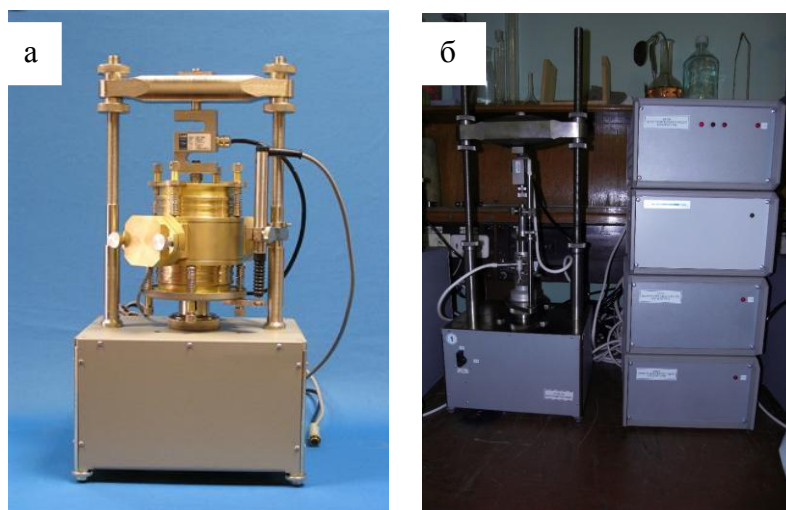


Рис. 2.3. Установки приборов АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек»» для компрессионных испытаний (а) и одноосного сжатия (б)

Участок I характеризует уплотнение грунта в результате сближения его структурных элементов и более плотной их упаковки. На этом участке зависимость $S=f(P)$ аппроксимируется прямой линией (см. рис. 2.4, 2.5). Величину давления в конце прямолинейного участка компрессионной кривой называют пределом пропорциональности $P_{пп}$. Пересечение этой прямой линии с осью давления (нагрузки) позволяет определить величину структурной прочности грунта при сжатии $P_{стр}$.

Поскольку в целом ход испытаний и типы кривых в компрессионных и штамповых испытаниях сходны, автором применен этот способ обработки данных компрессии. Таким образом, для каждого образца на графике был найден участок $P_{пр}-P_{пп}$ (в интервале нагрузок от природной $P_{пр}$ до предела пропорциональности $P_{пп}$) и по этому участку проведены расчеты модулей компрессионной ($E_{ок}$) и общей (E_o) деформации.

Для образцов моренных суглинков исследуемый диапазон нагрузок составляет 0,15 – 0,35 МПа, а для юрских глинистых грунтов 0,3-0,5 МПа.

В англоязычной литературе (Larsson 1997, 2001) при сопоставлении результатов штамповых испытаний на разных глубинах предлагается нормирование модулей деформации в зависимости от глубины залегания грунта. А именно, проводится расчет модуля деформации в зависимости от бытового давления грунта ($P_{быт}$).

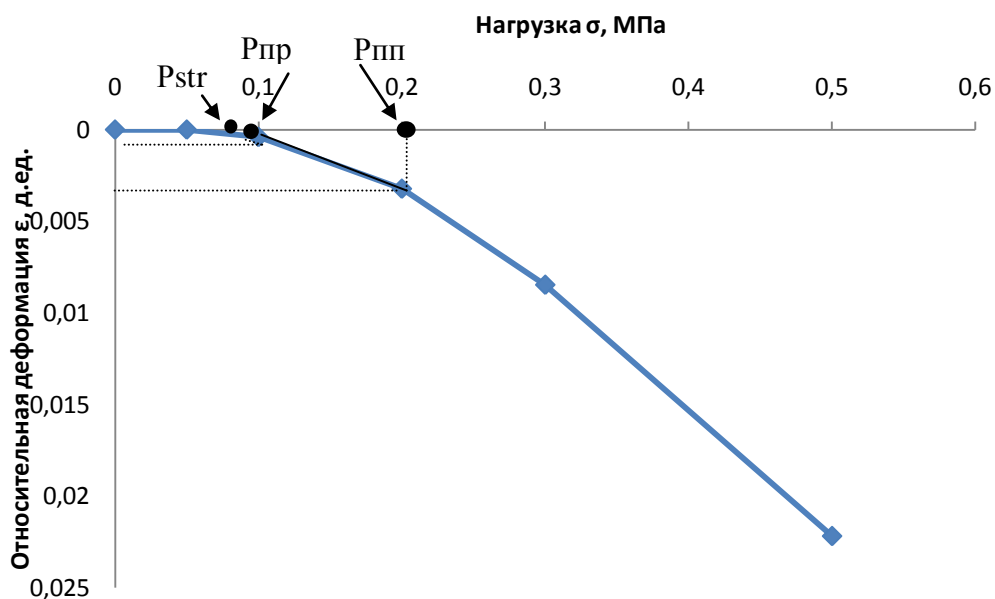


Рис. 2.4. Пример выделения прямолинейного участка на графике $\epsilon(\sigma)$ для расчета модуля деформации по результатам компрессионных испытаний: P_{str} – структурная прочность; $P_{пр}$ – природное давление; $P_{пп}$ – предел пропорциональности

В рамках данной работы и с точки зрения практики наиболее обосновано проведение расчета модуля деформации на участке от $P_{быт}$ до значения $1,5P_{быт}$, поскольку именно последнему значению давления соответствуют типовые нагрузки от сооружения. Значение бытового давления грунта определяется по формуле $P_{быт} = \rho * z$, где ρ – плотность грунта, z – глубина его залегания. 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) $P_{быт}$ - $1,5P_{быт}$.

Метод *одноосного сжатия* использован для определения прочностных и деформационных свойств образцов. Испытания проводились также на приборах АСИС производства компании ООО «НПП «Геотек»», удобство применения которых обусловлено тем, что эта автоматизированная система сокращает время испытаний, дает значения изменяемых и измеряющихся параметров в электронном виде, что облегчает проведение опыта и процесс интерпретации данных, а также дает возможность получить значение модуля деформации по расчетам благодаря программному обеспечению.

Установка АСИС производства ООО «НПП «Геотек»» для одноосного сжатия (см. рис. 2.3, б) представляет собой информационно-измерительную систему, предназначенную для автоматизации механических испытаний образцов грунтов в лабораторных условиях. Применялось устройство кинематического нагружения ГТ-1.0.4, предназначенное для реализации механического воздействия на испытываемый образец грунта цилиндрической формы.

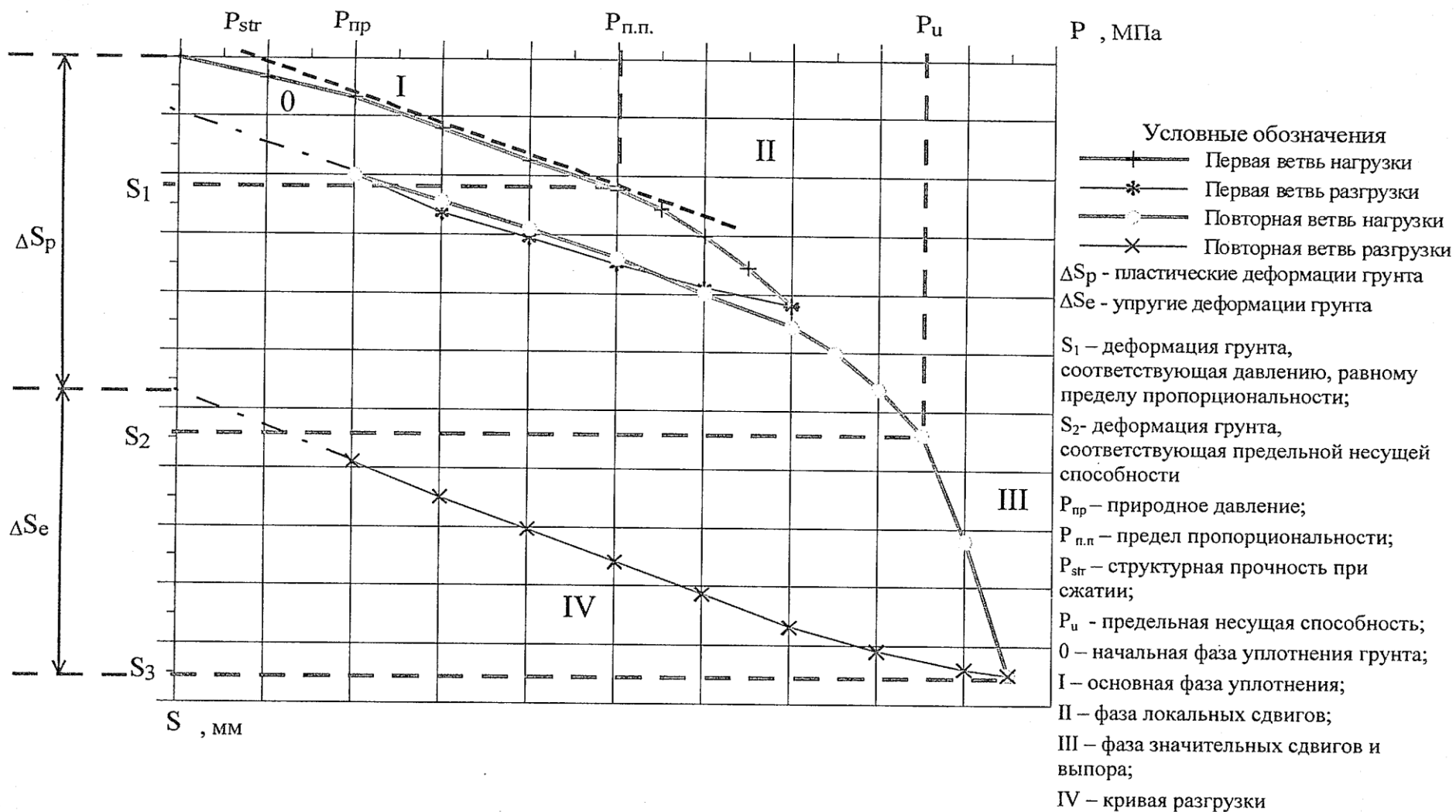


Рис. 2.5. Зависимость осадки штампа S от давления P на грунт (по Зиангирову, Кошелеву, 2010)

Нагружение образца глинистого грунта производилось до его разрушения или (в случае пластичного характера разрушения грунта) до достижения относительной вертикальной деформации 15%. При этом скорость приращения относительной вертикальной деформации образца выбиралась от 0,5 до 4 мм/мин, в зависимости от предполагаемой прочности грунта таким образом, чтобы время проведения испытания составило 5-7 мин (в соответствии с требованиями ГОСТ 12248-2010).

Разрушающаяся нагрузка фиксировалась ($R_{сж}$) по точке перегиба на графике напряжение-деформация $\sigma(\varepsilon)$ (рис. 2.6, а); площадь образца (S_0) рассчитывалась по измеренному диаметру. Временное сопротивление грунта одноосному сжатию (R_c) определялось известным соотношением:

$$R_c = \frac{P_{сж}}{S_0} \text{ при } (\varepsilon \leq 0,1); \quad R_c = \frac{P_{сж}}{S} \text{ при } (\varepsilon > 0,1),$$

где S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца; $S = \frac{S_0}{1-\varepsilon}$ – площадь поперечного сечения образца после сжатия (Лабораторные работы, 2008).

По результатам испытаний на одноосное сжатие производился расчет начального модуля сжатия E_n и модуля относительной деформации $E_{отн}$ (Гольдштейн, 1952), что стало возможным благодаря тому, что для каждого образца был получен график зависимости величины относительной деформации от приложенного напряжения. Графики зависимости были получены в электронном виде.

Расчет начального модуля сжатия основан на применении закона Гука и проводился по начальному линейному участку графика $\sigma(\varepsilon)$ (рис. 2.6, б):

$$E_n = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon},$$

где $\Delta\varepsilon$ – изменение относительной деформации образца, $\varepsilon = \Delta h/h_0$ (h_0 – начальная высота образца), $\Delta\sigma$ – изменение напряжений в выбранном интервале (Гольдштейн, 1952). Диапазон нагрузок менялся от 0 до 0,1 МПа. Оценку деформационных свойств по тангенсу угла наклона графика $\sigma(\varepsilon)$ на начальном прямолинейном участке проводили и другие авторы, например, Г.Т.Кирничанский (1989), а на территории США такой метод определения закреплен нормативным документом ASTM D 3148-96.

Согласно Н.М.Герсеванову и М.Н.Гольдштейну (1952), для расчета модуля относительной деформации глинистых грунтов $E_{отн}$ принимается спрямленный участок кривой $\sigma(\varepsilon)$ от нуля до значения $\sigma = \frac{R_c}{3}$, причем, считается, что при этих напряжениях в глинистых грунтах еще не возникает пластическое течение. Кроме того, по графику взаимосвязи относительных поперечной и продольной деформаций был рассчитан коэффициент поперечного расширения μ_0 ; вычисление проводилось по линейному участку

графика соотношения поперечной и продольной относительной деформации (рис. 2.6, в) в пределах значений вертикальной (продольной) деформации 0,5-1%:

$$\mu_0 = -\frac{\Delta\varepsilon_{\text{поп}}}{\Delta\varepsilon_{\text{прод}}}$$

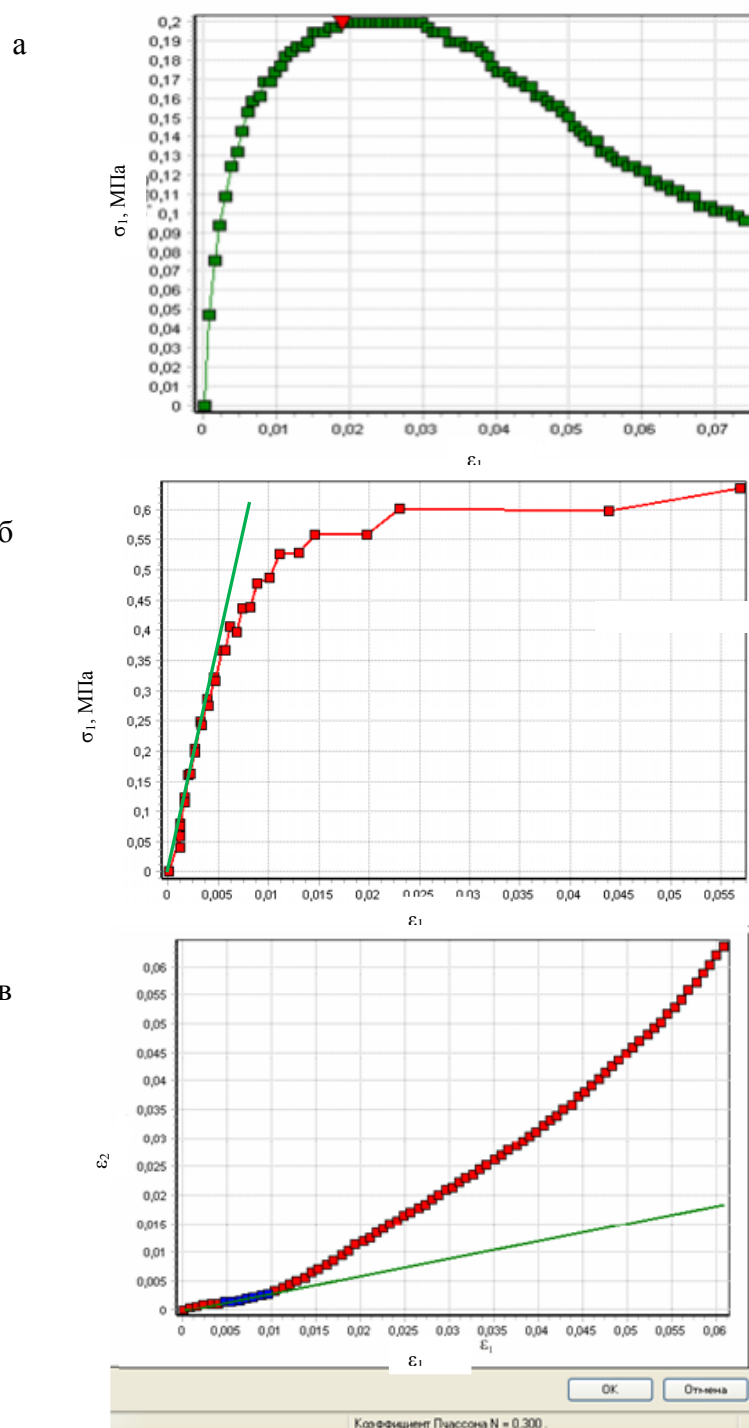


Рис. 2.6. Пример обработки результатов опыта по одноосному сжатию для определения: а – разрушающей нагрузки; б – начального модуля сжатия; в – коэффициента поперечного расширения

Как известно, скорость нагружения оказывает влияние на значения деформационных и прочностных характеристик глинистых грунтов (см. главу 1), поэтому для проверки

возможности сопоставления полученных данных был поставлен специальный эксперимент: искусственно сформованы 15 наиболее дисперсных (модельный грунт М1) образцов с достаточно высокими значениями влажности (12%), затем проведены испытания этих образцов методом одноосного сжатия при различных скоростях нагружения (от 0,5 до 4 мм/мин). По результатам проведенных исследований получено, что значения прочности на одноосное сжатие повышаются с ростом скорости нагружения (рис. 2.7, а), а начальный модуль сжатия при нагрузках до $\sigma=0,3$ МПа не зависит от скорости нагружения (рис. 2.7, б, приложение 2) в исследуемом диапазоне скоростей.

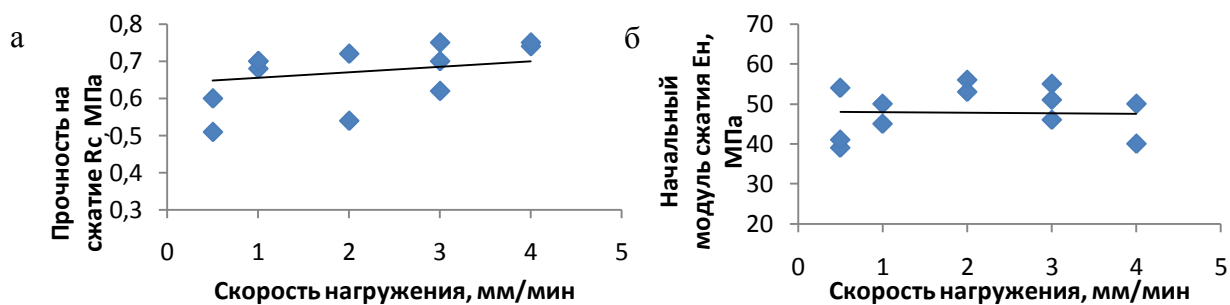


Рис. 2.7. Соотношения скорости нагружения с прочностью на сжатие (а), начальным модулем сжатия (б)

По данным компании ООО «НПП «Геотек»» допустимая погрешность определения нагрузок грунтов не превышает ± 1 %, а деформаций $\pm 0,2$ %.

Определение скоростей упругих волн при ультразвуковом просвечивании

Измерение скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн производилось по методике прямого просвечивания. В качестве генератора и усилителя упругих колебаний использовался дефектоскоп УД2Н-П (рис. 2.8), отличающийся большой мощностью излучаемого сигнала, необходимого для работы с сильно поглощающими грунтами. В качестве источников и приемников сдвиговых колебаний использовались датчики Panasonic V1548 с центральной частотой 100 кГц (рис. 2.9, а). Для контроля правильности выделения продольной волны применялись пьезодатчики П-111 (рис. 2.9, б) с центральной частотой 100 кГц. Выбор именно этих частот датчиков обусловлен оптимальным для наших исследований соотношением длины волны и размера образца. Источник и приемник располагались на противоположных гранях образца на одной оси. Взаимное расположение датчиков и образца показано на рисунке (рис. 2.10). Для обеспечения надежного и постоянного прижима датчиков использовалась гиря массой 1 кг.

Измерения скоростей на модельных образцах выполнялись сразу после их изготовления, причем измерения производились на переменной базе, т.е. образец несколько раз укорачивался для увеличения точности расчета скорости V_s .

Измерения для природных грунтов также проводились на переменной базе на монолитах грунтов при вырезании образцов для компрессионных испытаний (рис. 2.11) и после

компрессии, а также на образцах для испытаний на одноосное сжатие. Отметим, что похожая методика испытаний приведена в ASTM D 2845-05.



Рис. 2.8. Внешний вид дефектоскопа УД2Н-П

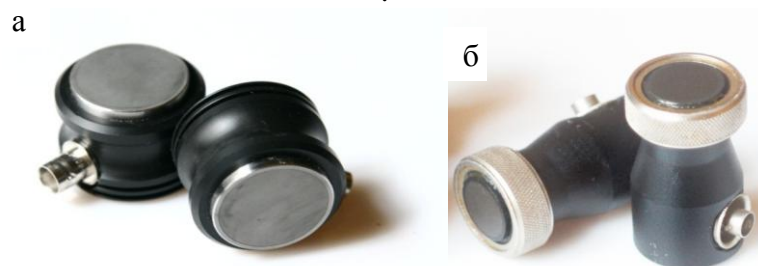


Рис.2.9. Внешний вид датчиков: а - сдвиговых колебаний (100 кГц); б - датчиков поршневого типа (100 кГц)



Рис. 2.10. Взаимное расположение датчиков и образца

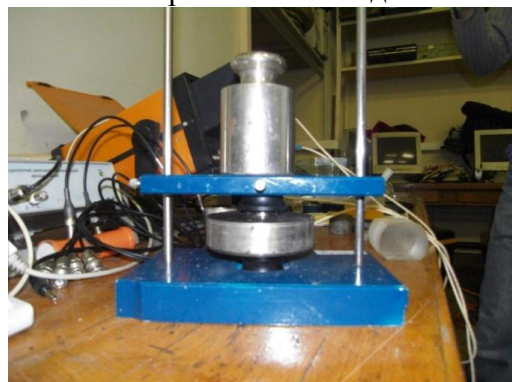


Рис. 2.11. Ультразвуковое просвечивание образца в компрессионном кольце

Для изучения влияния влажности на скорости упругих волн были изготовлены 12 модельных образцов (по 3 образца каждой модели М1, М2, М3, М4), а также 20 образцов природных моренных суглинков. Каждые сутки по мере их дегидратации (в эксикаторе с CaCl_2 для медленного обезвоживания) проводились измерения скоростей упругих волн.

При этом каждый раз проводились измерения линейных размеров образцов, веса, бралась проба на влажность.

При расчете скоростей упругих колебаний определялись времена вступлений продольных и поперечных волн (рис. 2.12). Выделение на записи продольной волны не вызывает никаких проблем, так как волна приходит первая. Выделение поперечной волны вызывает определенные трудности из-за ее интерференции с продольной. Одновременный вывод на экран всех записей позволяет увидеть изменение времен прихода S-волны при вариации некоего параметра (им может быть изменение длины («базы») образца или изменение влажности). В этом случае удастся однозначно определить вступление этой волны.

Тем не менее, в ряде случаев выделить S-волну на записях не представляется возможным. На рис. 2.12, а приведен пример, когда на двух трассах (крайние слева) поперечная волна слишком сильно интерферирует с продольной, и достоверно выделить момент ее вступления невозможно. Такое происходит, если волны не успевают разойтись во времени, т.е. на коротких образцах с высокой скоростью. В ходе исследований подобное случалось в нескольких образцах при низких значениях влажности. Один из наиболее удачных примеров записи представлен на рис. 2.12, б, в для датчиков Р- и S-волн соответственно (Ошкин, 2008).

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, приведенными в главе 1. Значения статического модуля не определялись, поскольку есть результаты прямых лабораторных определений модулей деформации инженерно-геологическими методами. Погрешность определения значений скоростей упругих волн составляет 1-2 %.

Статистическая обработка данных

Применение статистических методов исследования было связано с большим количеством фактического материала, который необходимо систематизировать для установления взаимосвязей между интересующими параметрами, а также в связи с необходимостью оценки роли различных факторов в формировании интересующих свойств грунтов. Для решения поставленных задач использовалась программа Statistica 6.0.

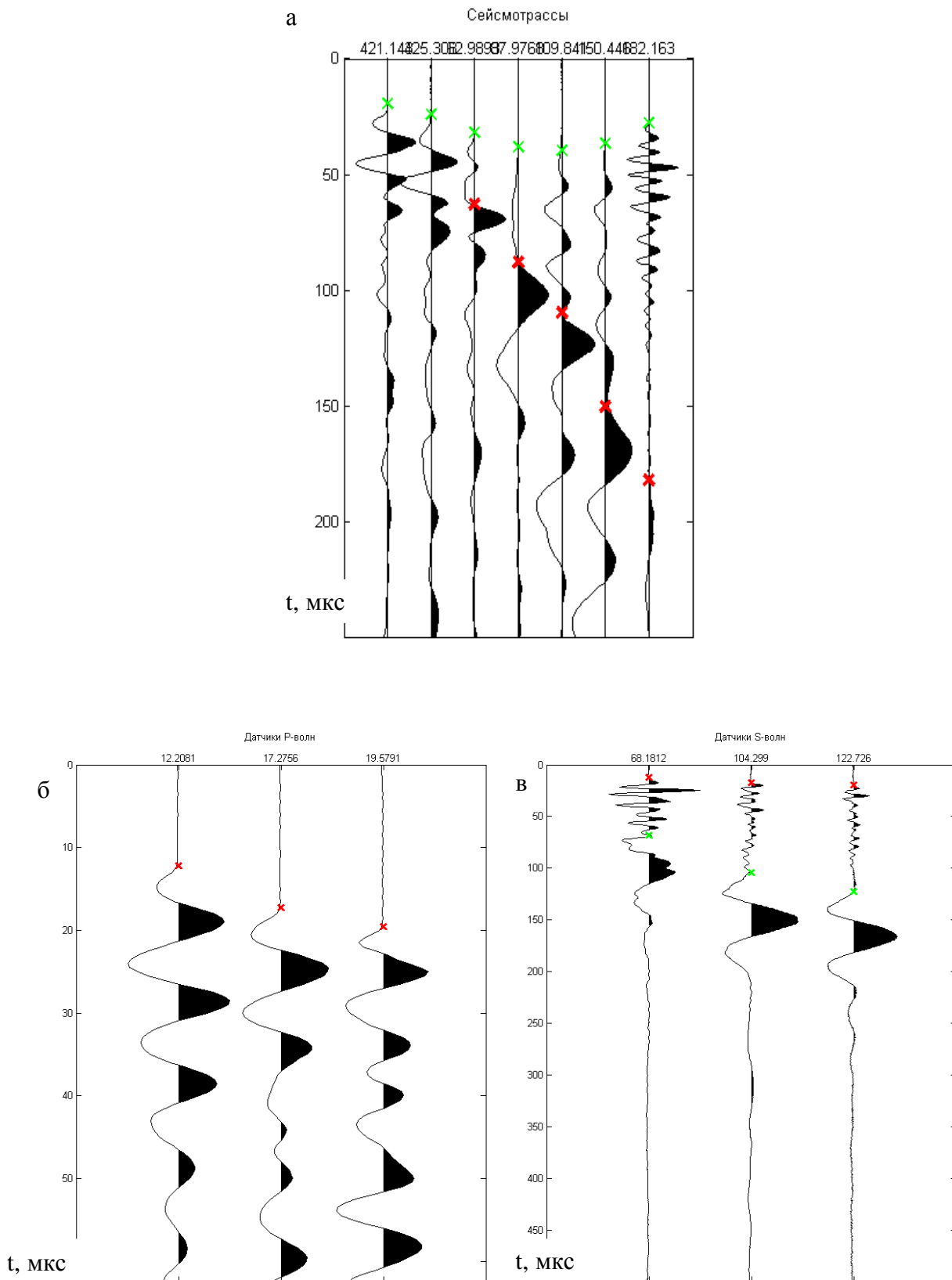


Рис. 2.12. Пример записи с использованием описанной методики. Сейсмограммы расставлены по горизонтальной оси в соответствии с порядком измерений. Зелеными крестиками отмечены моменты вступления продольных волн, красными – поперечных (а, б, в - см. пояснения в тексте)

На первом этапе анализа проводились проверка *нормальности закона распределения* величин и выделение аномальных значений по правилу «трех σ »: вычислялось среднеквадратическое отклонение по каждому признаку и проверялось, не превысит ли величина отклонения утроенное среднее квадратическое отклонение. Кроме того, для более точного определения закона распределения исследуемых величин проведена проверка с помощью критерия Уилко-Шапиро с уровнем значимости $\alpha=0,05$. Теоретические значения критерия взяты в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Результаты расчетов приведены в приложении 3.

В целом для всех исследуемых параметров модельных и четвертичных природных грунтов значение расчетного критерия меньше теоретического, что говорит о том, что они могут быть аппроксимированы нормальным законом распределения.

Для юрских суглинков и глин в связи с широким разнообразием полученных значений и показателей свойств и относительно малым количеством образцов около 50% всех параметров имеют закон распределения отличный от нормального.

На втором этапе была построена матрица *парных корреляций* для всех интересующих параметров. Величина коэффициента корреляции может принимать значения в интервале от -1 до +1. Эти крайние случаи соответствуют линейной связи между признаками: обратной, когда $r=-1$, и прямой при $r=+1$.

При отсутствии линейной связи $r=0$, промежуточные величины r соответствуют разной степени тесноты связи. При линейной связи на точечном графике, отражающем эту связь между значениями нормально распределенных величин x и y , корреляционное поле точек имеет вид более или менее вытянутого эллипса. По мере увеличения тесноты связи, приближения к $r=|1|$, он превращается в прямую линию. При $r=0$ корреляционное поле точек имеет форму круга.

Величина квадрата коэффициента корреляции может иметь самостоятельный интерес, поэтому ее выделяют в качестве особого параметра, именуемого коэффициентом детерминации (r^2). Квадрат коэффициента корреляции является оценкой в долях единицы (или процентах) той части варьирования одного признака, которая связана с варьированием другого признака.

Если оценить разные абсолютные значения коэффициента корреляции, то за весьма тесную связь считают такую, при которой $|r|>0,85$ (т.к. при этом $r^2>0,75$, то варьирование признаков взаимосвязано приблизительно на 75% и более), за тесную связь – когда $0,85\geq r\geq 0,7$ (взаимосвязанная вариация признаков лежит в пределах 75-50%) и слабой считают связь, если $0,5<r<0,7$ (варьирование одного признака менее чем на 50% связано с варьированием другого признака) (Самарин, Бершов, Фоменко, 2004).

Дальнейшее исследование заключалось в установлении *корреляционной зависимости* между несколькими параметрами. Подробное описание методики приведено в работах А.А.Халафян (2005); Э.А.Вуколова (2008). Применительно к исследованиям автора проводилась пошаговая процедура регрессионного анализа, позволяющая для каждого параметра определить наиболее значимые переменные, которые учтены в уравнении регрессии. Таким образом были исключены мало значащие переменные, а также переменные, взаимосвязанные между собой. В качестве критерия включения признака использовался коэффициент корреляции.

В природных грунтах для выявления групп грунтов с относительно похожими по данным статистики свойствами был применен *факторный анализ*. Методика проведения этого анализа подробно описана в работе (Халафян, 2005). Смысл факторного анализа заключается в линейном преобразовании многомерной информации в признаковом пространстве и выделении совокупности некоррелированных признаков. В основу анализа положено предположение, что различные природные процессы и явления находят отражение в определенном характере взаимосвязи признаков (параметров или переменных) многомерных наблюдений. Изменение отдельных переменных обусловлено действием соответствующих факторов (или группы факторов).

В факторном анализе вес фактора пропорционален его вкладу в общую дисперсию. Факторные нагрузки отражают вклад каждой переменной в дисперсию, определяемую соответствующим фактором. Анализ взаимного расположения точек проекций образцов в координатах факторных осей и является основой для классифицирования образцов, характеризующихся целым рядом параметров – многомерных наблюдений. Однородным классам многомерных наблюдений соответствуют обособленные группы точек в факторном пространстве. Дальнейшее классифицирование сводится к выделению этих групп точек. Обычно ограничиваются рассмотрением проекций наблюдений в плоскостях первых главных факторов. Эти факторы вносят наибольший вклад в суммарную дисперсию (Осипов, Соколов, Румянцева, 1989).

2.3. Характеристика объектов исследования

Данные о **минеральном составе** моренных грунтов взяты из литературы (Черемисов, Кошелев, 2003; Чернов, 2003, 2007). В составе *суглинков донской морены* преобладающим минералом является кварц (52-88 %). Минимальное количество кварца (4-5 %) отмечается в глинистой фракции. По мере увеличения размеров структурных элементов от мелко- до среднепесчаных фракций происходит возрастание содержания кварца до максимального количества 90 %. В более крупных фракциях его содержание снижается до ≈65 %.

Содержание плагиоклаза и калиевых полевых шпатов (КПШ) изменяется от первых процентов до ≈ 15 %. В глинистой фракции эти минералы отсутствуют или содержатся в очень малых количествах. С увеличением размера фракций содержание плагиоклаза и КПШ постепенно повышается.

Карбонатные минералы (кальцит и доломит) присутствуют в количестве до ≈ 16 %. Небольшое количество карбонатных минералов содержится в высокодисперсной форме (≈ 3 %). С увеличением размеров фракции от $<0,001$ мм до $0,01-0,05$ мм содержание кальцита и доломита в суглинках донской морены увеличивается до $10-15$ %. В более крупных фракциях содержание этих минералов не превышает первых процентов (Чернов, 2007). В исследованных автором образцах моренных суглинков содержание карбонатов варьирует от 1 до 12 %, в среднем 4 %. Помимо обломков карбонатных минералов можно предположить наличие небольшого числа цементационных связей и контактов за счет новообразований карбонатов кальция.

Глинистые минералы (иллит, гидрослюда, каолинит, хлорит, смектиты и смешанослойные) присутствуют во всех образцах, и их суммарное содержание не превышает $10-12$ %. Все глинистые минералы сконцентрированы во фракциях $<0,1$ мм. Их содержание максимально в глинистой фракции. Так, во фракции $<0,001$ мм содержание слюдоподобных минералов (иллит-гидрослюда) составляет 42 %, смешанослойных минералов $15-20$ %, каолинита $7-12$ %. При возрастании размеров фракций до $0,1-0,05$ мм содержание глинистых минералов постепенно снижается до первых процентов.

Во многих образцах отмечается присутствие рентгеноаморфного вещества (РАВ). Его максимальное содержание во фракции $<0,001$ мм иногда достигает 78 %. С увеличением размеров фракций содержание РАВ постепенно уменьшается (Чернов, 2007).

В минеральном составе *юрских глинистых грунтов* оксфордского яруса (по данным рентгеноструктурного анализа) присутствуют следующие группы минералов: первичные силикаты и слюды (обломочные), карбонаты (обломочные и аутигенные), а также пирит, гипс, гетит, цеолиты (аутигенные) и глинистые минералы.

Содержание кварца меняется, как правило, в незначительных пределах $11-14$ %. Полевые шпаты, менее устойчивые к выветриванию, чем кварц, сохраняются в меньшем количестве – $2-9$ %. Содержание слюды (обычно серицита-мусковита) мало, но может повышаться до $6-14$ % в неветрелых разностях.

Содержание карбонатов характеризуется высокой изменчивостью (от $1-5$ до 25 %), связанной с различным происхождением (обломочным, органогенным, хемогенным). По составу это кальцит (в обломках раковин и скелетов, в тонкодисперсном виде), арагонит (в остатках раковин моллюсков и головоногих), редко сидерит (Апаркина, 2002). В

исследованных образцах юрских суглинков и глин содержание карбонатов меняется от 9 до 14 %, в среднем 11 %.

Особо следует отметить роль карбонатов в формировании цементационных связей в юрских глинах, а также присутствие твердых и плотных обломков раковин и кокколитов (скелетов кокколитофорид) пылеватой и более крупной размерности, что может определять неоднородность образцов юрских глин и вариации в значениях скоростей упругих волн.

В юрских глинистых грунтах в небольшом количестве присутствуют пирит (1-2 %, обычно образует скопления по окаменевшим остаткам живых организмов) и продукты его выветривания – гипс и гидроксиды железа.

Глинистые минералы представлены иллитом и гидрослюдой (в среднем 10 %), смектитами и смешанослойными (9 %), хлоритом (до 8 %) и каолинитом (8 %). Их общее содержание вместе с рентгеноаморфной силикатной составляющей варьирует от 41 до 68 %, и именно оно определяет количество высокодисперсных и поэтому активных частиц.

Содержание водорастворимых солей в юрских глинах составляет 0,1-1,8 %. По составу это в основном сульфаты и галоиды, которые могут способствовать агрегации частиц.

Характерной особенностью состава юрских глин является присутствие органического вещества (0,8-3,7 %), придающего вместе с закисными соединениями железа темно-серый до черного цвет. Органическое вещество высокодисперсное, может способствовать формированию органо-минеральных комплексов, то есть агрегированию грунта (Апаркина, 2002).

По результатам исследований методом рентгеновской дифрактометрии модельные глинистые грунты характеризуются относительно близким минеральным составом. Преобладающим минералом является кварц, содержание которого минимально у суглинков М1 (48 %) и составляет 58-62% у других модельных грунтов. Содержание иллита меняется от 14 до 19 %. Наименьшее количество микроклина обнаружено в суглинках М2 (6 %), наибольшее - в суглинках М1 (19%), у супесей (М3, М4) около 12 %. Содержание альбита ниже у модельных суглинков (М1, М2) (4-5 %) по сравнению с супесями (М3, М4) (8-9 %), а каолинита наоборот – 1-2 % у супесей М3, М4 и 5-7 % у суглинков М1, М2. Содержание кальцита невелико, в среднем 3-5 %. Необходимо подчеркнуть, что в модельных грунтах кальцит обломочный и не участвует в образовании цементационных связей.

Строение исследуемых грунтов

Для изучения строения грунтов был проведен гранулометрический анализ, результаты которого представлены в табличном виде и с помощью интегральных кривых (см. приложения 4, 5).

Природные грунты

Гранулометрический состав четвертичных грунтов разнообразен. Большинство образцов характеризуется преобладанием пылеватых и глинистой фракций, их суммарное содержание достигает 75 %, причем для всех образцов содержание частиц <0,001 мм преобладает. Встречаются также образцы с большой долей песчаных фракций, содержание которых достигает 64%.

Среди частиц песчаной размерности преобладают зерна мелкого песка. Средний диаметр частиц грунтов меняется от размера мелкой пыли до мелкого песка.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что с учетом гранулометрического состава и показателей пластичности (см. ниже) четвертичные грунты по ГОСТ 25100-2011 представлены суглинками легкими пылеватыми (8 образцов) и песчанистыми (8 образцов), суглинками тяжелыми песчанистыми (1 образец), пылеватыми (1 образец) и песчанистыми супесями (2 образца).

Результаты исследований В.Н.Соколова и М.С.Чернова (2007) с помощью растрового электронного микроскопа показали, что моренные глинистые грунты имеют близкую матричную микроструктуру, сложенную листообразными анизометричными ультрамикроагрегатами (60-70 %) преимущественно иллит-гидрослюдистого и каолинитового минерального состава и более мелкими пластинчатыми микроагрегатами глинистых частиц (25 %). В глинистой матрице встречается большое количество песчаных и пылеватых зерен (Чернов, 2007). Тип контактов точечный, коагуляционный, встречаются и цементационные (фазовые) контакты за счет присутствия карбонатов.

Механизмы образования, природа сил, действующих в зоне контактов, и другие особенности контактов и контактных взаимодействий описаны в работах П.А.Ребиндера (1966), В.Н.Соколова (1974), В.И.Осипова (1974, 1979), Е.Д.Щукина (1965, 1981, 1982, 1988), В.В.Яминского (1982) и др. На эти представления опирался автор при интерпретации полученных данных.

Гранулометрический состав юрских грунтов отличается существенным преобладанием пылеватых и глинистой фракций, суммарное содержание которых меняется от 75 до 95%, отражая некоторую фаціальную изменчивость мелководного моря в позднеюрское время. Характерно преобладающее содержание частиц <0,001 мм. Количество песчаных частиц незначительно, оно меняется от 1 до 25%, практически все песчаные частицы относятся к тонкой фракции. Преобладающий средний диаметр частиц соответствует фракции тонкой пыли, однако, встречаются образцы со средним диаметром во фракции тонкого песка (например, образец А.с-23(24,7)). Типы контактов те же, что и в четвертичных грунтах, но с

большой долей цементационных контактов, поскольку количество карбонатов выше в юрских глинистых грунтах, имеющих морской генезис.

Грунты юрского возраста, отобранные для исследований, по классификации ГОСТ 25100-2011 менялись от легких пылеватых глин до легких пылеватых суглинков (см. приложение 4).

Модельные грунты

Гранулометрический состав модельных грунтов закономерно изменяется в ряду от М1 к М4 – дисперсность уменьшается. Так, например, содержание частиц <0,005 мм в грунте М1 составляет 45 %, в М4 – 22 %. В соответствии с методикой изготовления образцов содержание частиц песчаных фракций в грунтах увеличивается от М1 к М4, что подтверждается результатами гранулометрических анализов, и в образцах М3 и М4 оно уже преобладает над суммарным содержанием частиц пылеватых и глинистой фракций и составляет более 50 %. Средний диаметр частиц меняется так же: увеличивается в ряду от М1 к М4. У суглинков М1, М2 средний диаметр частиц соответствует крупнопылеватой размерности, у супесей М3, М4 – тонкой песчаной. Закономерное увеличение содержания песчаных частиц прослеживается и при анализе РЭМ-изображений (рис. 2.13).

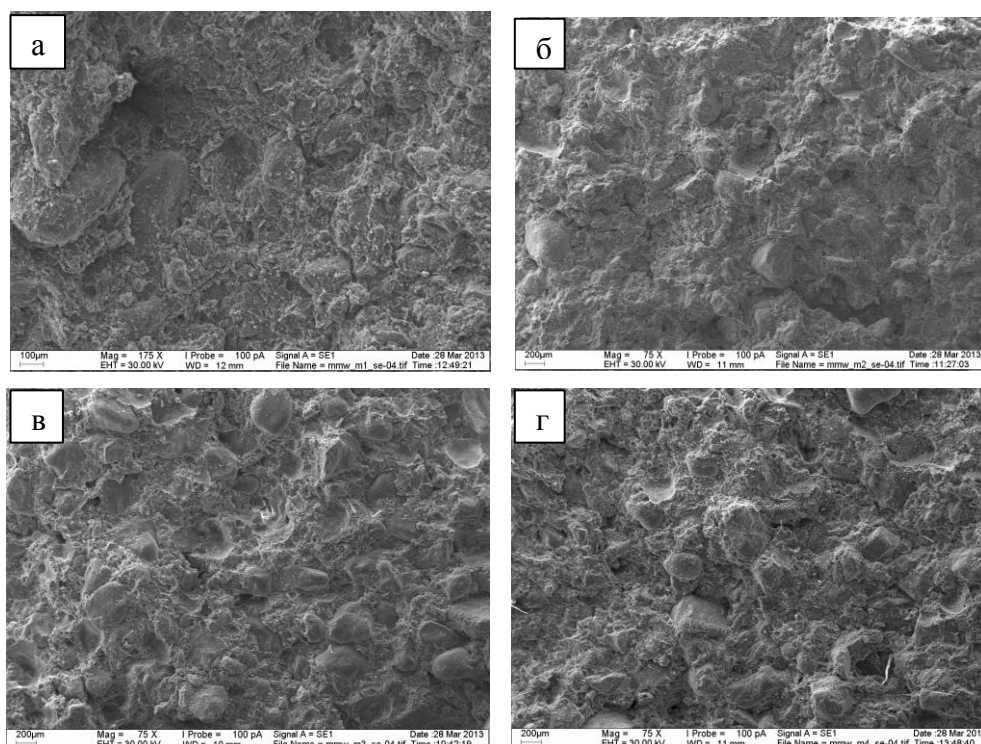


Рис. 2.13. РЭМ-изображения микростроения модельных суглинков пылеватых М1 (а) и песчаных М2 (б), супесей песчаных М3, М4 (в, г) (×75)

По классификации ГОСТ 25100-2011 модельные грунты соответствовали суглинкам тяжелым пылеватым (М1), суглинкам легким песчаным (М2), супесям песчаным (М3, М4). Характер контактов между структурными элементами модельных грунтов точечный и

коагуляционный. Соотношения между этими типами контактов (и соответственно структурных связей разной прочности) будут определяться плотностью и влажностью.

Для изучения степени неоднородности модельных грунтов была проведена компьютерная томография образцов приготовленных при нагрузках 2 кг и 5 кг (0,02-0,04 МПа).

При рассмотрении поперечных сечений образцов суглинков М1 и супесей М3 (рис. 2.14) отчетливо выделяются неоднородности внутренней структуры при нагрузках уплотнения 2 кг, причем для образцов супесей это характерно в меньшей степени, по сравнению с суглинками. При увеличении нагрузки уплотнения до 5 кг отмечается значительное снижение степени недоуплотненности, структура образца однородна по всей его длине. Для модельных суглинков (М2) и супесей (М4) отмечаются те же закономерности.

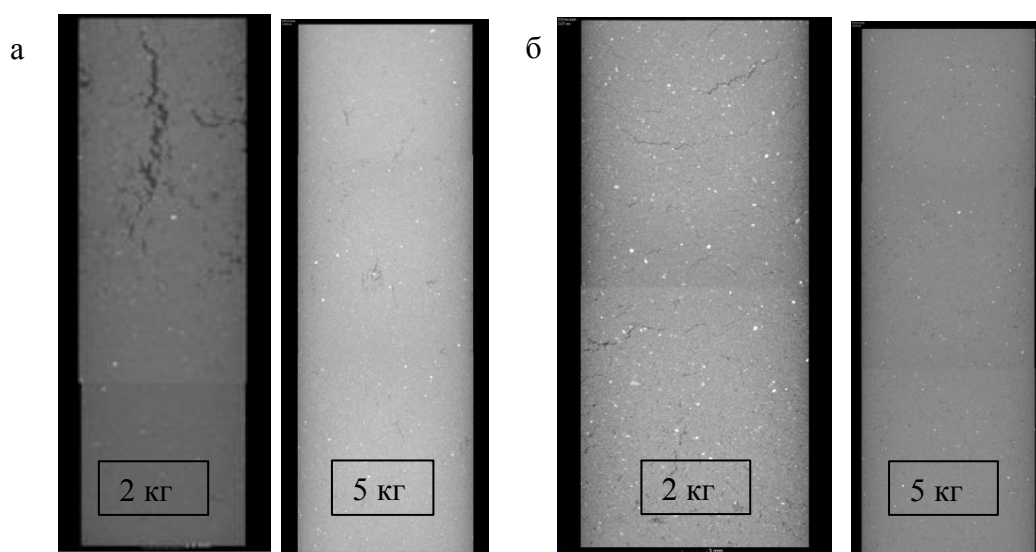


Рис. 2.14. Пространственная структура модельных суглинков (а) и супесей (б) под действием нагрузки уплотнения 2 и 5 кг

Для модельных глинистых грунтов проведены исследования методом растровой электронной микроскопии. Для этого были специально приготовлены образцы разной дисперсности (от суглинков М1 до супесей М4), каждый образец анализировался при двух значениях влажности: максимальной гигроскопической и максимальной молекулярной влагоемкости. Кроме того, для образца суглинка М1 рассматривались образцы (М1. 1 час) время уплотнения которых было сокращено до 1 часа, как при исследованиях скоростей упругих волн во время дегидратации (см. главу 3).

По результатам проведенных исследований (приложение 6) получено, что практически для всех образцов характерно наличие пяти категорий пор (Осипов, Соколов, Румянцева, 1989): межчастичные, межультрамикрoагрегатные, межмикрoагрегатные, межагрегатные, межзернистые; исключение составляют лишь суглинки М1, где отмечаются только первые четыре типа. Преобладающими для всех образцов являются межагрегатные поры, содержание

которых в среднем около 50 % для всех образцов при влажности близкой $W_{\text{ммв}}$, увеличиваясь до 65 % при $W_{\text{мг}}$. В меньшем количестве встречаются межмикроагрегатные поры, доля которых, наоборот, уменьшается при снижении влажности от 34-43 % до 20–40 % соответственно. Количество других типов пор составляет преимущественно первые проценты.

По значениям коэффициента формы прослеживается повышение изометричности пор с уменьшением времени уплотнения, при этом для образцов, которые уплотнялись в течение суток, поры более однообразны по форме в сравнении с уплотнением за один час. Та же закономерность прослеживается при уменьшении дисперсности грунтов, в образцах супесей (М3, М4) чаще встречаются изометричные поры по сравнению с суглинками (М1, М2). Это обстоятельство связано с формой частиц, образующих структуру грунта: для суглинков – это преимущественно глинистые частицы (в форме пластинок, чешуек и трубочек) и их агрегаты, а для супесей – пылеватые и песчаные зерна, разной степени окатанности. Максимальный размер пор выше в супесях по сравнению с суглинками, а также при влажности близкой максимальной гигроскопической (последнее объясняется возникновением трещин усадки при дегидратации образцов). Общая и разобшенная пористость несколько снижаются с уменьшением дисперсности.

Параметр дисперсности D (см. приложение 6) является интегральной оценкой степени крупности частиц и закономерно увеличивается от суглинков (М1, М2) к супесям (М3, М4). Коэффициент анизотропии (K_a) и параметр анизотропии (A) меняются незначительно и характеризуют структуру всех образцов как близкую к изотропной.

Влажностные характеристики грунтов

При изучении отобранных образцов были определены показатели пластичности грунтов: влажности верхнего (W_L) и нижнего (W_p) пределов, число пластичности, которое в дальнейшем использовалось для классификации грунта по ГОСТ 25100-2011. Полученные данные представлены в приложении 7.

Значения показателей пластичности *модельных глинистых грунтов* уменьшаются от грунта М1 к М4 в соответствии с уменьшением дисперсности: верхний предел пластичности снижается от 28 % до 17 %, нижний – от 15 % до 11 %. По числу пластичности по классификации ГОСТ 25100-2011 можно отнести грунты М1, М2 к тяжелым и легким суглинкам, М3, М4 – к супесям.

Гигроскопическая влажность модельных образцов закономерно меняется от 0,8 % до 0,2 % при переходе от грунта М1 к М4.

Максимальная гигроскопическая влажность низкая, меняется в пределах от 3 до 1 %; максимальная молекулярная влагоемкость варьирует от 9 % до 6 %, причем большие значения соответствуют более дисперсным разностям (приложение 7).

Природные грунты

Наибольшими значениями показателей пластичности для природных четвертичных грунтов обладают образцы суглинков 1.1-10.2, для них верхний предел пластичности равен 34 - 44 %, нижний 22 – 33 %. Для остальных образцов четвертичного возраста показатели пластичности относительно близки и составляют 8-16 % W_p и 16-25 % W_L . Число пластичности моренных суглинков 1.1-10.1 изменяется от 8 до 16, у остальных образцов - от 5 до 16.

Моренные глинистые грунты обладают низкой коллоидной активностью (по Скемptonу) $K_p < 0,75$.

По значению показателя текучести в соответствии с ГОСТ 25100-2011 большинство четвертичных грунтов находятся в полутвердой - твердой консистенции. Исключение составляют образцы из района Щербинки: Щ.с-123 (18,3), Щ.с-120 (18,5), Щ.с-120 (16,0) – суглинки тугопластичной консистенции; Щ.с-120 (16,5), Щ.с-123 (18,7) – суглинки мягкопластичные; Щ.с-120 (18,0), Щ.с-123 (18,0) – супеси пластичные. Юрские суглинки и глины относятся к твердым и полутвердым, за исключением образца А.с-23 (27,6) тугопластичной консистенции.

Гигроскопическая влажность воздушно-сухого грунта, меняется у четвертичных грунтов от 0,2 до 2,4 %, у юрских суглинков и глин от 3,1 до 7 %, что соответствует различиям этих грунтов в минеральном составе и дисперсности.

Максимальная гигроскопическая влажность, которая позволяет оценить общее количество связанной воды в грунте, для образцов 1.1-10.2 составляет 6 - 7 %, для остальных четвертичных грунтов 2,5 – 5,2 %. Юрские грунты, более глинистые по своему составу, отличаются высокими показателями максимальной гигроскопической влажности 9-12 % (приложение 7). Юрские глинистые грунты более гидрофильны, чем четвертичные моренные суглинки.

Максимальная молекулярная влагоемкость, которая позволяет оценить максимальное количество капиллярных менисков в грунте и примерное начало формирования осмотической воды, имеет наиболее высокие значения у суглинков 1.1-2.2 и составляет 20 %, далее по убыванию идут суглинки 9.1-10.2 со значением 17 %, и примерно в одном диапазоне находятся суглинки 3.1-8.2, у них максимальная молекулярная влагоемкость - 15-16 %. Остальные моренные глинистые грунты обладают более низкими значениями максимальной

молекулярной влагоемкости 8-10,5%. Значения $W_{\text{ММВ}}$ у юрских суглинков и глин выше, чем у четвертичных и меняются в относительно небольшом диапазоне 22-25 %.

В целом, все исследованные показатели содержания влаги в грунтах закономерно увеличиваются с ростом дисперсности (удельной поверхности) исследуемых образцов. Это связано с тем, что глинистые частицы на своей поверхности содержат активные центры гидратации и, соответственно, с их увеличением растет количество связанной воды, а за ней и воды переходного типа.

Состояние и физические свойства грунтов

Для всех отобранных образцов были определены значения естественной влажности, плотности и плотности частиц грунта; затем расчетными методами были получены величины пористости, степени влажности и показателей консистенции, объемных долей фаз для каждого грунта (см. раздел 2.2). Результаты представлены в приложениях 8 - 10.

Природные грунты

Плотность четвертичных глинистых грунтов менялась от 2,02 до 2,21 г/см³, однако, для большинства образцов этот диапазон уже и составляет 2,14-2,16 г/см³. Пористость грунтов менялась от 29 до 37% у образцов из района Щербинки и 37-44 % у суглинков 1.1-10.2, отобранных на водораздельной равнине (в районе Измайловского бульвара). Юрские суглинки и глины отличаются более низкими значениями плотности 1,66-1,83 г/см³ и высокими значениями пористости 47-57 %. Коэффициент пористости у большинства четвертичных суглинков 0,42-0,58; выделяются суглинки 1.1-10.2 со значениями коэффициента пористости от 0,59 до 0,77 ед. Юрские глинистые грунты, как и ожидалось для образцов оксфордского яруса, обладают самыми высокими значениями коэффициента пористости 0,88-1,33 ед.

Плотность частиц четвертичных грунтов высокая, изменяется от 2,93 до 3,00 г/см³ у грунтов 1.1-10.2, и несколько ниже у остальных четвертичных грунтов 2,69-2,87 г/см³. В широком диапазоне меняется плотность твердых частиц юрских суглинков и глин 2,63-2,97 г/см³.

Плотность скелета четвертичных моренных суглинков и супесей района Щербинки меняется от 1,80 до 1,98 г/см³, у четвертичных суглинков 1.1-10.2, значения ниже и меняются от 1,66 до 1,93 г/см³. Плотность скелета юрских суглинков и глин 1,28-1,41 г/см³; значения достаточно низкие и отражают особенности диагенеза оксфордских осадков.

По степени влажности практически все четвертичные грунты являются влажными ($0,5 < S_r < 0,8$), за исключением образца супеси песчанистой Щ.с-120(18,0), который является

водонасыщенным. Группа суглинков 1.1-10.2 полностью относится к водонасыщенным ($S_r > 0,8$).

Расчетными методами были получены значения объемных долей фаз для каждого грунта, которые достоверно отражают состояние грунтов. Среди природных грунтов объемная доля твердого компонента является наибольшей для образцов района Щербинки и составляет 63-71 %, более низкие значения получены для юрских грунтов 43-53 % (рис. 2.15, а), области существования этих образцов на треугольной диаграмме раздвинуты. Соотношение объемной доли жидкого и газового компонентов отражает степень заполнения пор жидкостью или газом.

Модельные грунты

Так как при изготовлении образцов модельных глинистых грунтов нагрузка уплотнения менялась от 2 до 14 кг (0,02-0,12 МПа), плотность всех искусственных образцов различна. Так, по мере увеличения нагрузки уплотнения плотность модельного грунта М1 изменяется от 1,40 до 2,32 г/см³, М2 – от 1,77 до 2,23 г/см³, М3 – от 1,88 до 2,28 г/см³, М4 – от 1,76 до 2,30 г/см³ (Пиоро, 2010).

Плотность частиц модельных грунтов меняется от 2,66 до 2,69 г/см³.

По степени влажности образцы М1.1-10 – М1.8-10, М2.2-10 – М2.5-10, М3.2-7 – М3.12-7, М4.2-7 – М4.12-7 являются маловлажными, М1.10-10 – М1.5-15, М2.7-10 – М2.14-15, М2.12-10 – М2.14-20, М3.14-7 – М3.7-10, М3.12-10, М3.8-15, М4.14-7 – М4.10-10, М4.14-10, М4.14-15, М4.2-20, М4.5-20-М4.8-20 - влажными, остальные образцы – насыщенными водой. По значению показателя текучести в соответствии с ГОСТ 25100-2011 модельные грунты находятся в твердой консистенции.

Расчетными методами были получены значения объемных долей фаз для каждого модельного грунта (рис. 2.15, б, приложение 10).

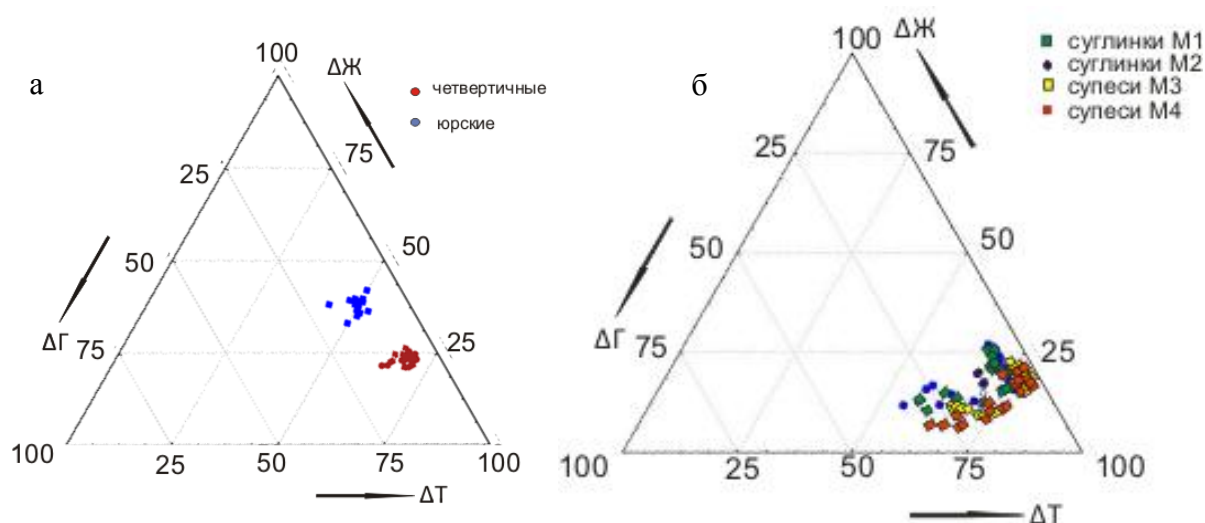


Рис. 2.15. Диаграмма фазового состава природных (а) и модельных (б) глинистых грунтов (ΔТ, ΔЖ, ΔГ – объемные доли твердой, жидкой и газовой фаз)

Можно наблюдать ожидаемую закономерность – у образцов, изготовленных с большей нагрузкой уплотнения (при одинаковой влажности), объемная доля твердого компонента больше, а жидкого и газообразного меньше.

Прочность структурных связей

Прямые измерения прочности индивидуальных контактов являются сложной экспериментальной проблемой и требуют проведения прецизионных по своей точности опытов. Изучением теории и практики этого вопроса занимались такие ученые как П.А.Ребиндер (1966), Е.Д.Щукин (1981), В.Н.Соколов (2001), В.И.Осипов (2013) и др.

Затруднений при измерении прочности контактов прямым методом можно избежать, если воспользоваться следующим утверждением: исходя из представлений физико-химической механики, структурно-механические параметры глинистых пород зависят не столько от механических свойств материала самих частиц, сколько от силы сцепления между твердыми структурными элементами и количества контактов в сечении разрушения. Поэтому прочность дисперсной структуры R_c при одновременном разрушении контактов пропорциональна средней силе сцепления между частицами P_1 и числу разрушенных контактов χ в единице площади поверхности разрушения:

$$R_c = P_1 \chi.$$

Данное соотношение устанавливает связь между классическими представлениями о прочности дисперсных систем и их микроструктурными особенностями (Щукин, 1981; Осипов, Соколов, Еремеев, 2001). Принимая во внимание это соотношение, оценку влияния прочности структурных связей на скорости упругих волн будем проводить через прочность грунта по результатам одноосного сжатия.

Полный перечень значений прочности на сжатие всех исследуемых образцов грунтов приведен в приложении 11, интервалы изменения этих параметров приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики прочности на одноосное сжатие R_c

| Названия грунтов | Количество испытаний | Интервал изменения R_c , МПа |
|--|----------------------|--------------------------------|
| Суглинки легкие пылеватые (М1) | 27 | 0,23-1,10 |
| Суглинки легкие песчанистые (М2) | 19 | 0,20-1,05 |
| Супеси песчанистые (М3) | 30 | 0,08-0,63 |
| Супеси песчанистые (М4) | 25 | 0,11-0,64 |
| Четвертичные моренные суглинки и супеси gQ_{1dn} | 25 | 0,10-0,54 |
| Юрские суглинки и глины J_3ox | 3 | 0,31-0,47 |

По полученным данным видно, что прочность на сжатие снижается практически в 2 раза при переходе от модельных суглинков к супесям. Это связано с тем, что в более дисперсных

грунтах большее количество контактов, следовательно, необходимо больше усилий на их разрушение. С ростом влажности прочность снижается, это связано с эффектом П.А.Ребиндера (1958) - при увлажнении уменьшается работа по разрыву связи между отдельными частицами грунта. Максимальные значения прочности на сжатие наблюдаются в грунтах с задаваемой влажностью 10-15%. Прочность повышается с ростом плотности модельных грунтов и снижением пористости.

Согласно ГОСТ 25100-2011 по прочности на одноосное сжатия исследуемые образцы относятся к грунтам низкой (M1 и M2) и очень низкой (все остальные) прочности.

При исследовании образцов методом одноосного сжатия скорость нагружения выбиралась так, что бы время испытания менялось от 5 до 7 минут (в соответствии с ГОСТ 12248-2010). Замечено, что выбираемая скорость нагружения максимальна у суглинков легких пылеватых (M1) и составляет 2 мм/мин. Средняя скорость нагружения постепенно снижается с уменьшением дисперсности, и у супесей M3 и M4 составляет 0,5 мм/мин (повышаясь для более влажных модельных грунтов до 1 мм/мин и снижаясь до 0,3 мм/мин у «сухих»).

Разрушение модельных грунтов имело преимущественно пластичный (рис. 2.16, а) и хрупко-пластичный (рис. 2.16, б) характер, однако, в наиболее мало влажных образцах встречалось и хрупкое разрушение (рис. 2.16, в).

Для образцов юрских глинистых грунтов возникли сложности с вырезанием образцов цилиндрической формы, поскольку они расслаивались по напластованию и крошились. В связи с этим данных очень мало (всего 3 эксперимента), и возможности дать характеристику влияния прочности структурных связей на скорости упругих волн для этих грунтов нет.



Рис. 2.16. Различный характер разрушения модельных грунтов при одноосном сжатии: а - пластичный; б – хрупко-пластичный; в – хрупкий

На основании данных по прочности образцов на одноосное сжатие и пластичности по классификации В.Н.Соколова (Осипов, Соколов, Румянцева, 1989) исследуемые четвертичные суглинки относятся к классу крупнодисперсных грунтов (подклассу структур со средней степенью ориентации) с коагуляционными, переходными и фазовыми контактами (в-II-б), а юрские суглинки и глины - к классу крупнодисперсных грунтов (подклассу структур с высокой степенью ориентации) с коагуляционными, переходными и фазовыми контактами в-III-б.

Выводы по главе

1. В качестве объектов исследования выбраны широко распространенные на территории Москвы природные грунты:

- моренные суглинки (gQ_{1dns}) от легких пылеватых до тяжелых песчаных и супеси песчаные, влажные, плотные, с невысокими значениями характеристических влажностей (низкой коллоидной активностью), со смешанным характером структурных связей (контакты коагуляционные, переходные и фазовые), среднеориентированные, с низкой прочностью;

- морские юрские грунты (J_{3ox}) от легких пылеватых глин до легких пылеватых суглинков, с большим содержанием карбонатов, со смешанным характером структурных связей (контакты коагуляционные, переходные и фазовые), высокоориентированные, влажные, с низкой плотностью и высоким коэффициентом пористости (около 1,00 и выше), более дисперсные и гидрофильные.

2. Для исследования факторов, влияющих на скорости распространения упругих волн в глинистых грунтах, и минимизации количества одновременно действующих факторов были подготовлены модельные (искусственные) грунты близкого минерального состава к природным четвертичным суглинкам. Модельные грунты были изготовлены на основе перемолотого моренного суглинка (gQ_{1dns}) с добавлением среднеспесчаной фракции в разных количествах. Гранулометрический состав искусственных грунтов менялся от суглинков тяжелых пылеватых до супесей песчаных. Приготовленные грунты обладали близким минеральным составом, различной дисперсностью, влажностью и плотностью.

3. Для изучения деформационных свойств глинистых грунтов были выбраны компрессионные испытания, одноосное сжатие. Для изучения скоростей упругих волн в глинистых грунтах выбраны ультразвуковые методы исследования. По результатам компрессионных испытаний планируется получить значения модулей компрессионной и общей деформации; испытаниям на одноосное сжатие – начальный модуль сжатия, модуль относительной деформации и коэффициент поперечного расширения, а по ультразвуковому просвечиванию - динамический модуль упругости и коэффициент Пуассона.

4. Полученный в результате исследований фактический материал должен стать основой для выявления закономерностей распространения упругих волн в глинистых грунтах (путем анализа факторов, влияющих на скорости упругих волн), а также для сопоставления показателей деформационных свойств, полученных разными методами.

Глава 3. Закономерности распространения упругих волн в образцах глинистых грунтов на основании анализа их скоростей

По результатам измерений и расчетов скорости продольных волн (V_p) модельных глинистых грунтов менялись от 450 до 2000 м/с; скорости поперечных волн V_s от 160 до 580 м/с, а отношение V_s/V_p от 0,16 до 0,54. Скорости продольных V_p волн природных четвертичных образцов менялись от 1050 до 2000 м/с, поперечных V_s – от 170 до 700 м/с, отношение V_s/V_p находилось в пределах 0,08÷0,43. Для образцов юрских суглинков и глин изменения скоростей продольных волн V_p составили от 970 до 1870 м/с, поперечных V_s от 240 до 340, отношение скоростей V_s/V_p от 0,18 до 0,25 (табл. 3.1). Для всех исследуемых грунтов скорости продольных волн изменяются в достаточно широком диапазоне, в среднем от 1000 до 1800 м/с. Скорости поперечных волн варьируют в основном в пределах 200 – 500 м/с, причем минимальные изменения скоростей V_s наблюдаются у юрских глин.

Таблица 3.1. Результаты ультразвуковых исследований

| Образцы грунтов | Число определений | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Суглинки М1 | 27 | 850-1950 | 220-520 | 0,16-0,50 |
| Суглинки М2 | 20 | 450-2000 | 200-580 | 0,20-0,54 |
| Супеси М3 | 30 | 520-1700 | 160-500 | 0,22-0,52 |
| Супеси М4 | 32 | 700-1500 | 200-420 | 0,18-0,43 |
| Четвертичные суглинки и супеси (gdns) | 25 | 1050-2000 | 170-700 | 0,08-0,42 |
| Юрские суглинки и глины (J3ox) | 15 | 970-1870 | 240-340 | 0,18-0,25 |

Скорости продольных V_p и поперечных V_s волн модельных грунтов снижаются с уменьшением дисперсности (при переходе от М1, М2 к М3, М4). Эта закономерность согласуется с литературными данными, например, Н.Н.Горайнова (1992). Однако в данном случае влияние оказывает не только количество песчаных частиц в образцах, а еще и различные значения плотности, влажности и других параметров. Их совместное влияние на скорости упругих волн будет рассмотрено ниже.

Разброс значений скоростей упругих волн модельных грунтов уменьшается при переходе от более дисперсных грунтов к менее дисперсным. В этом же направлении уменьшается диапазон изменения отношения V_s/V_p .

3.1. Влияние дисперсности глинистых грунтов на распространение упругих волн

Изучение влияния дисперсности на скорости упругих волн в глинистых грунтах проводилось с помощью следующих косвенных и прямых показателей: W_p – влажность нижнего предела пластичности; W_L – влажность верхнего предела пластичности; I_p – число пластичности; количество частиц размерности меньше $M_c < 0,001$; $M_c < 0,005$; $M_c < 0,01$ мм и d_{50} – средний диаметр частиц. Изменения этих показателей для исследуемых грунтов приведены в табл. 3.2. Характеристика полученных данных приведена в главе 2.

Таблица 3.2. Диапазоны изменения показателей строения и свойств грунтов

| Образцы | $W_p, \%$ | $W_L, \%$ | I_p , ед. | d_{50} , мм | $M_c < 0,001$ мм, % | $M_c < 0,005$ мм, % | $M_c < 0,01$ мм, % |
|--|-----------|-----------|-------------|---------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Суглинки М1 | 15 | 28 | 13 | 0,013 | 18 | 30 | 37 |
| Суглинки М2 | 12 | 20 | 8 | 0,025 | 16 | 29 | 32 |
| Супеси М3 | 12 | 18 | 6 | 0,050 | 14 | 22 | 28 |
| Супеси М4 | 12 | 17 | 6 | 0,100 | 12 | 18 | 25 |
| Четвертичные суглинки и супеси (gQ_{1dns}) | 9-13 | 15-25 | 5-12 | 0,030-0,120 | 8-32 | 12-40 | 16-53 |
| Юрские суглинки и глины (J_3ox) | 26-34 | 39-47 | 10-20 | 0,007-0,050 | 8-39 | 19-63 | 28-78 |

Для природных моренных грунтов была построена корреляционная матрица (табл. 3.3), из которой следует, что связь скоростей упругих волн с выбранными показателями дисперсности (или «глинистости») слабая ($0,5 < r < 0,7$) или практически отсутствует ($r < 0,5$).

Таблица 3.3. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и показателей дисперсности четвертичных грунтов

| Показатели дисперсности | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| $W_p, \%$ | -0,43 | 0,55 | 0,67 |
| $W_L, \%$ | -0,22 | 0,46 | 0,41 |
| I_p , ед. | 0,00 | 0,22 | 0,08 |
| $M_c < 0,001$ мм, % | 0,06 | -0,04 | -0,08 |
| $M_c < 0,005$ мм, % | 0,01 | -0,06 | -0,05 |
| $M_c < 0,01$ мм, % | 0,15 | -0,08 | -0,16 |
| d_{50} , мм | 0,19 | -0,16 | -0,20 |

Максимальным значением коэффициента корреляции $r=0,67$ связаны отношение скоростей V_s/V_p и влажность нижнего предела пластичности W_p . Из этого следует, что на 46% (коэффициент детерминации r^2 , см. раздел 2.2) отношение скоростей определяется этим параметром.

Таким образом, простых линейных зависимостей скоростей упругих волн и отношения скоростей от показателей дисперсности («глинистости») для изучаемых четвертичных моренных грунтов не выявлено.

Для образцов юрских суглинков и глин также были найдены парные коэффициенты корреляции (r) между показателями дисперсности и скоростями упругих волн. Данные анализа приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и показателей дисперсности юрских грунтов

| Показатели дисперсности | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| W_p , % | 0,06 | -0,12 | -0,24 |
| W_L , % | 0,39 | 0,31 | -0,22 |
| I_p , ед. | 0,35 | 0,36 | -0,15 |
| $M_c < 0,001$ мм, % | 0,02 | -0,19 | -0,24 |
| $M_c < 0,005$ мм, % | 0,01 | -0,25 | -0,26 |
| $M_c < 0,01$ мм, % | -0,13 | -0,37 | -0,18 |
| d_{50} , мм | -0,10 | 0,19 | 0,38 |

Все корреляционные связи оказались слабыми или вообще отсутствуют, результаты множественного регрессионного анализа тоже не позволили выявить каких-либо уравнений связи. Возможно, определяющую роль играет малое количество образцов и их небольшая изменчивость по дисперсности.

В целом, можно сделать вывод о том, что на данном этапе исследований средний диаметр частиц грунтов, показатели пластичности, содержания частиц менее 0,01, 0,005, и 0,001 мм не оказывают статистически значимого влияния на скорости упругих волн и их отношение для изученных моренных суглинков (gQ_{1dns}) и морских глин (J_{3ox}).

Кроме поиска статистических взаимосвязей между показателями глинистости и скоростями упругих волн, было выбрано 7 образцов четвертичных моренных суглинков для которых влажность составляла 12-13%, плотность 2,14-2,16 г/см³, пористость 30,5-31,5 % и проведено сопоставление изучаемых параметров внутри группы. Отметим, что среди выбранных образцов присутствовали как суглинки, так и супеси. По результатам проведенного анализа внутри выбранной группы образцов не удалось выявить каких-либо связей и зависимостей параметров дисперсности со скоростями упругих волн.

С юрскими грунтами задача усложняется меньшим количеством образцов и высокой изменчивостью их физических свойств, поэтому выбрать группу образцов с одинаковыми параметрами не представлялось возможным.

Изучение влияния дисперсности для модельных грунтов методами статистики не проводилось, поскольку было взято всего четыре различных по дисперсности модели, что не достаточно для выявления каких-либо связей. При рассмотрении образцов разных моделей с близкими значениями плотности, пористости и влажности (табл. 3.5) прослеживается

снижение скоростей продольных и поперечных волн при переходе от суглинков М1, М2 к супесям М3, М4.

Таблица 3.5. Изменение скоростей упругих волн образцов близкой плотности и влажности

| Образцы | Плотность ρ , г/см ³ | Влажность W , % | Пористость n , % | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|----------|--------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| М1.14-15 | 2,23 | 9 | 24 | 1930 | 480 | 0,25 |
| М2.10-15 | 2,21 | 11 | 26 | 1900 | 500 | 0,26 |
| М3.5-20 | 2,21 | 9 | 24 | 1530 | 370 | 0,24 |
| М4.5-15 | 2,23 | 10 | 24 | 1300 | 300 | 0,23 |

Из полученных результатов можно предположить, что дисперсность (в рамках исследованных выборок) оказывает не прямое, а опосредованное влияние на скорости упругих волн, скорее всего, через особенности порового пространства, характер связей и контактов между структурными элементами грунтов. Для значимого анализа влияния дисперсности на скоростные характеристики, как следует из полученных данных, необходим более широкий спектр дисперсных грунтов, включая пылеватые и мелкообломочные (что не входило в задачи данной работы).

3.2. Влияние плотности и пористости

Плотностные характеристики грунта – одни из основных в инженерной геологии, они закладываются в основу практически всех расчетов. Изучение этих характеристик проводилось по следующим показателям: плотность (ρ); плотность скелета грунта (ρ_d); плотность твердых частиц (ρ_s). Кроме того, были проанализированы характеристики пористости (n) и коэффициента пористости (e), связанные с показателями плотности.

Результаты собственных исследований автора по анализируемым показателям отражены в тезисах на XXIII молодежной научной школы-конференции имени К.О.Кратца (Петрозаводск, 2012 г.), докладывались на конференциях в ПНИИИСе в 2011г., «Ломоносов-2011» и обсуждаются в тексте ниже.

Изучением влияния плотностных свойств на скорости распространения упругих волн занимались И.Г.Миндель (1970), В.Н.Никитин (1982), Н.Н.Горяйнов, (1992) и другие (получены зависимости скоростей упругих волн различных грунтов при переменных плотности и плотности скелета).

Диапазоны изменения основных изучаемых параметров физических свойств образцов глинистых грунтов приведены в табл. 3.6, а подробная характеристика полученных данных приведена в главе 2.

Модельные грунты

В программе Statistica 6.0 произведен расчет парных коэффициентов корреляции интересующих признаков сначала для образцов модели М1 (табл. 3.7). Параметр плотности твердого компонента не анализировался, поскольку он одинаков для всех образцов.

Таблица 3.6. Диапазоны изменения показателей физических свойств грунтов

| Образцы | Плотность ρ , г/см ³ | Плотность скелета ρ_d , г/см ³ | Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³ | Пористость n , % | Коэффициент пористости e , ед. |
|--|--------------------------------------|--|---|--------------------|----------------------------------|
| Суглинки М1 | 1,54-2,30 | 1,42-2,14 | 2,69 | 20-47 | 0,25-0,88 |
| Суглинки М2 | 1,77-2,23 | 1,63-2,04 | 2,68 | 24-39 | 0,32-0,65 |
| Супеси М3 | 1,88-2,28 | 1,77-2,09 | 2,67 | 20-33 | 0,25-0,50 |
| Супеси М4 | 1,76-2,30 | 1,69-2,13 | 2,66 | 21-37 | 0,26-0,58 |
| Четвертичные суглинки и супеси (gQ ₁ dns) | 2,02-2,21 | 1,80-1,98 | 2,69-2,87 | 29-37 | 0,42-0,58 |
| Юрские суглинки и глины (J ₃ ox) | 1,66-1,83 | 1,28-1,41 | 2,63-2,97 | 47-57 | 0,88-1,33 |

Таблица 3.7. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей модельного суглинка М1

| Показатели плотности, пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| ρ , г/см ³ | 0,86 | 0,20 | -0,86 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,82 | 0,44 | -0,54 |
| n , % | -0,82 | -0,46 | 0,51 |
| e , ед. | -0,81 | -0,41 | 0,54 |

Как видно из таблицы, тесной связью обладают скорость продольных волн и все плотностные характеристики. Наиболее сильной является связь V_p и плотности, она описывается уравнением $V_p=2542\rho-3816$ с $r=0,86$ (рис. 3.1, а). Таким образом, для модельного суглинка М1 плотность грунта на 69 % (r^2) определяет скорость продольных волн.

Взаимосвязь скорости продольных волн с плотностью скелета $V_p=2853\rho_d-3879$ также является тесной и имеет то же направление – то есть, при увеличении плотности скелета растет скорость волны (рис. 3.1, б). Тесными связями с V_p характеризуются пористость и коэффициент пористости $V_p=-78n+3825$, $V_p=-3513e+3018$ (рис. 3.1 в,г). Однако связи обратные, то есть с ростом этих показателей скорость падает.

Скорость поперечных волн в целом меньше связана с параметрами плотности и пористости. Однако это обстоятельство не помешало получить тесную связь ($r=-0,86$)

отношения скоростей и плотности образцов $\frac{V_s}{V_p} = -0,5\rho + 1,38$, т.е. с увеличением плотности отношение скоростей уменьшается.

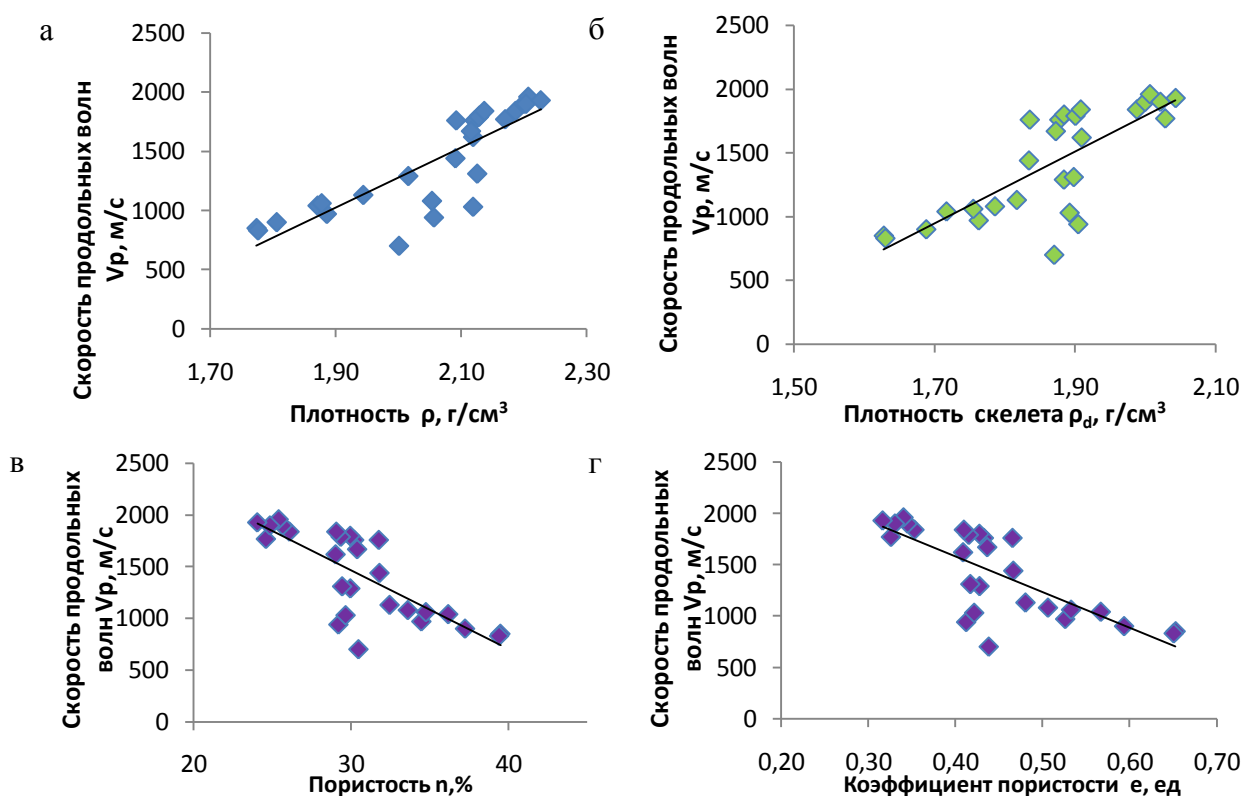


Рис. 3.1. Взаимосвязь скорости продольных волн и плотности (а), плотности скелета (б), пористости (в), коэффициента пористости (г) модельного суглинка М1

Анализ данных по образцам модели М2 проводился по той же схеме. На первом этапе найдены парные коэффициенты корреляции (табл. 3.8).

Таблица 3.8. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей модельного суглинка М2

| Показатели плотности, пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| ρ , г/см ³ | 0,91 | 0,80 | -0,60 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,90 | 0,80 | -0,60 |
| n, % | -0,90 | -0,80 | 0,60 |
| e, ед. | -0,88 | -0,81 | 0,57 |

По полученным данным видно, что связи носят тесный и весьма тесный характер, особенно в отношении скоростей упругих волн V_p , где показатели r для всех исследуемых параметров близки значению 0,9. Поскольку значения пористости и коэффициента пористости являются производными характеристиками (полученными расчетным путем из плотности частиц, плотности и влажности), особое внимание будет уделено рассмотрению влияния на скорости упругих волн плотности и плотности скелета грунта.

Были построены линейные графики зависимостей скоростей упругих волн от плотности грунтов (рис. 3.2). Зависимости скоростей от плотности скелета выглядят аналогично.

По данным проведенного регрессионного анализа скорости продольных волн на 82% зависят от плотности, а скорость поперечных волн на 67% определяется значением плотности и плотности скелета.

Уравнение связи скорости продольных волн с плотностью грунтов $V_p=2129\rho-3058$ характеризует полученную связь, как весьма тесную ($r=0,91$), а коэффициент детерминации $r^2=0,82$. Взаимосвязь скорости поперечных волн от плотности скелета грунта $V_s=419\rho_d-412$ является тесной ($r=0,80$), а коэффициент детерминации $r^2=0,67$. Необходимо отметить, что другие авторы (например, Горяйнов, 1992) эти зависимости описывают экспоненциальным уравнением связи, однако, в нашем случае коэффициент корреляции получается таким же, как и при линейной зависимости, поэтому предпочтение отдано линейному уравнению, как более простому. В литературе встречаются примеры описания полученной зависимости и линейным законом (Yasar E., Erdogan Y., 2004).

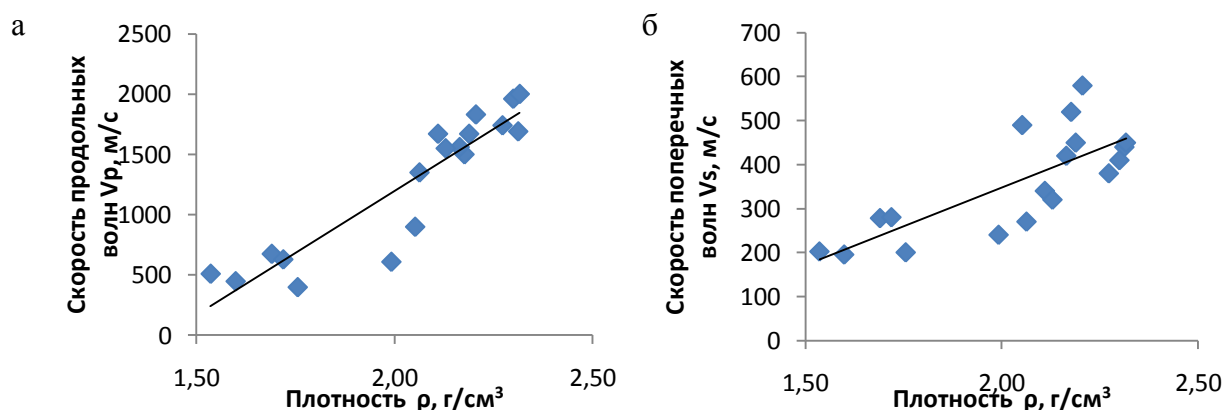


Рис. 3.2. Взаимосвязи скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн с плотностью модельного суглинка М2

Отношение скоростей упругих волн V_s/V_p определяется теми же показателями, что и сами скорости, однако, уравнение регрессии выглядит менее показательно и более громоздко.

Пористость и коэффициент пористости также обладают хорошей корреляцией со скоростями упругих волн, однако для них характерна обратная взаимосвязь (рис. 3.3). Это говорит о том, что при увеличении пористости и коэффициента пористости происходит снижение скоростей. Коэффициенты корреляции выше у взаимосвязей упругих волн с пористостью и составляют $r=-0,90$ для V_p и $r=-0,80$ для V_s .

Изучение простых линейных связей для модельной супеси М3 (табл. 3.9) показали отсутствие связи для поперечных волн со всеми плотностными характеристиками. Сохраняется общая тенденция увеличения скоростей продольных волн с ростом плотности

(рис. 3.4, а), плотности скелета и снижением пористости (рис. 3.4, б) и коэффициента пористости.

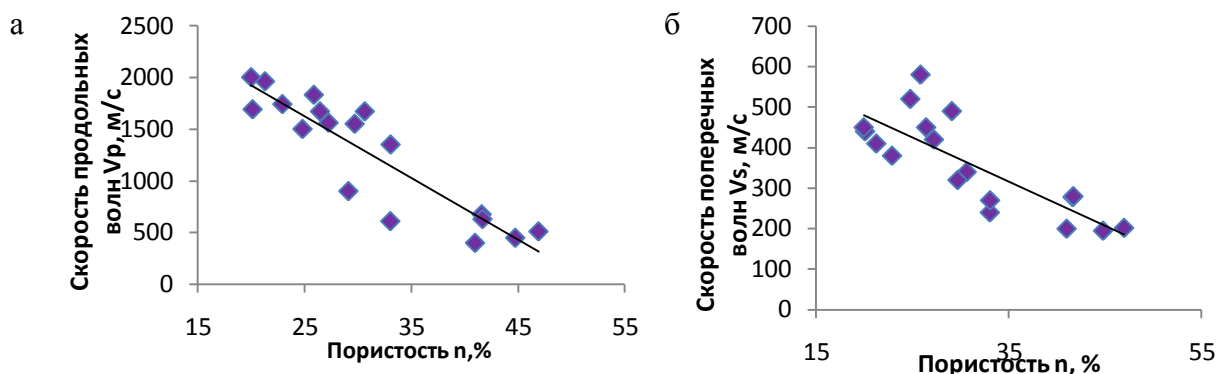


Рис. 3.3. Взаимосвязи скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн с пористостью модельного суглинка М2

На рис. 3.4 выделяется группа точек (выделены черным), не вписывающихся в общую закономерность. Эти образцы уплотнялись под минимальными нагрузками и, скорее всего, имеет место неравномерная спрессованность образцов при низких нагрузках уплотнения, наличие внутри них небольших пустот, что подтверждается результатами проведенной рентгеновской компьютерной томографии (подробнее см. главу 2).

Скорость продольных волн увеличивается с ростом плотности $V_p=1150\rho-1300$ ($r=0,77$), а отношение скоростей V_s/V_p убывает с ростом плотности: $\frac{V_s}{V_p}=-0,4\rho+1,1$ ($r=-0,58$).

Таблица 3.9. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей модельной супеси М3

| Показатели плотности, пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| ρ , г/см ³ | 0,77 | -0,10 | -0,58 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,63 | 0,12 | -0,34 |
| n , % | -0,63 | -0,13 | 0,33 |
| e , ед. | -0,64 | -0,13 | 0,34 |

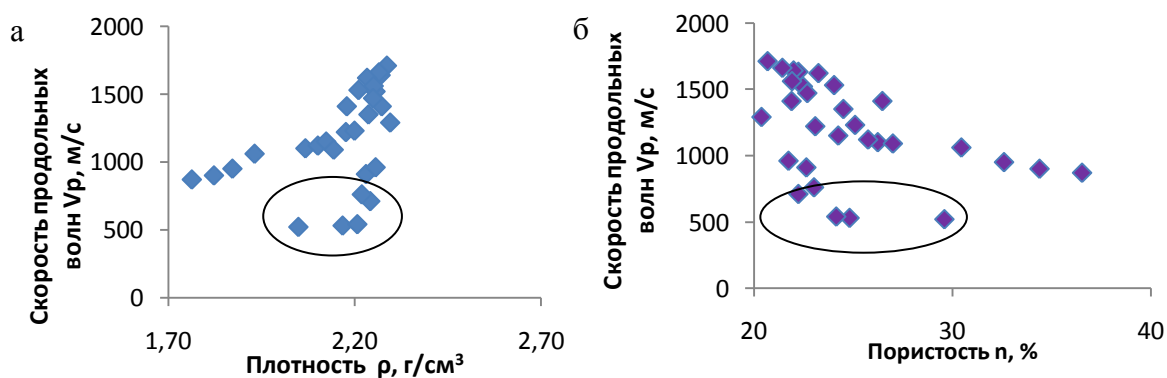


Рис. 3.4. Взаимосвязи скоростей продольных волн и плотности (а), пористости (б) модельной супеси М3

Снижение коэффициентов корреляции при уменьшении дисперсности образцов может быть связано с возрастающей ролью какого-либо иного признака, не учитываемого на данном этапе исследований.

Таблица парных корреляций для супесей модели М4 (табл. 3.10) характеризуется отсутствием весьма тесных связей. Однако сохраняется тенденция увеличения скорости продольных волн с ростом плотности (рис. 3.5, а) и плотности скелета грунта и снижения V_p с ростом пористости (рис. 3.5, б) и коэффициента пористости.

Таблица 3.10. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей модельной супеси М4

| Показатели плотности, пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| ρ , г/см ³ | 0,71 | -0,10 | -0,68 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,67 | 0,02 | -0,55 |
| n , % | -0,68 | -0,05 | 0,53 |
| e , ед. | -0,67 | -0,03 | 0,56 |

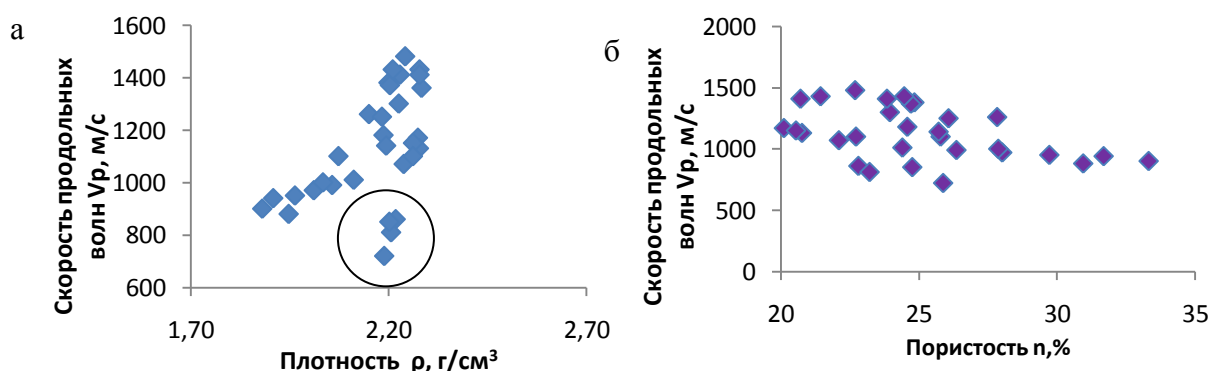


Рис. 3.5. Взаимосвязи скоростей продольных волн и плотности (а), пористости (б) модельной супеси М4

Уравнение взаимосвязи $V_p=1270\rho-1450$ обладает невысокой степенью связи ($r=0,71$). Отношение скоростей V_s/V_p убывает с ростом плотности: $\frac{V_s}{V_p}=-0,4\rho+1,2$ ($r=-0,68$).

На графике (рис. 3.5, а) выделяется облако из четырех точек, это образцы, сформованные при низких ступенях нагружения (2, 3 кг). Скорее всего, низкие значения скоростей V_p для этих образцов обусловлены наличием пустот, образовавшихся при формовании образцов (рис. 2.14). Для модельных супесей (М3, М4) при статистической обработке данных эти значения не учитывались.

Для каждого из модельных грунтов отмечается рост скоростей продольных волн V_p с ростом плотности образцов, а также снижение отношения скоростей с ростом их плотности. Эти связи являются стабильными и характеризуются достаточно высокими коэффициентами корреляции.

На следующем этапе исследований были проанализированы все модельные грунты одновременно (M1, M2, M3, M4). Парные корреляции оказались слабыми для всех связей V_s с плотностными характеристиками. Более сильные взаимосвязи характерны для V_p и V_s/V_p . Отмечается повышение скоростей упругих волн с ростом плотности для всех модельных грунтов (рис. 3.6), коэффициент корреляции $r=0,58$. Среди нелинейных функций наилучшим образом взаимосвязь описывает экспоненциальная зависимость $V_p=55,5*e^{1,5*\rho}$ ($r=0,76$).

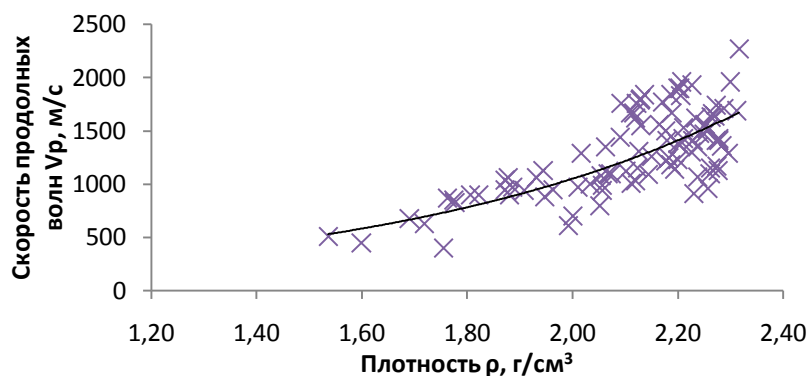


Рис. 3.6. Взаимосвязь плотности и скорости упругих волн V_p модельных суглинков и супесей M1-M4

Известно, что с повышением плотности глинистого грунта дальние коагуляционные контакты переходят в ближние, возрастает количество и прочность точечных контактов между отдельными структурными элементами (частицами), снижается объем пор и пустот, заполненных воздухом, поэтому и скорости продольных волн увеличиваются.

При этом вид уравнения связи плотности и скорости упругих волн зависит от типа грунта (рис. 3.7). Для модельных образцов тип грунта определяется преимущественно дисперсностью (разным количеством песчаных, пылеватых и глинистых частиц) и характером структурных связей, то есть количеством и типом контактов между частицами. Следует отметить, что в модельных грунтах присутствуют коагуляционные и точечные контакты, соотношение между которыми зависит от влажности (анализ влияния этого фактора будет проведен позднее).

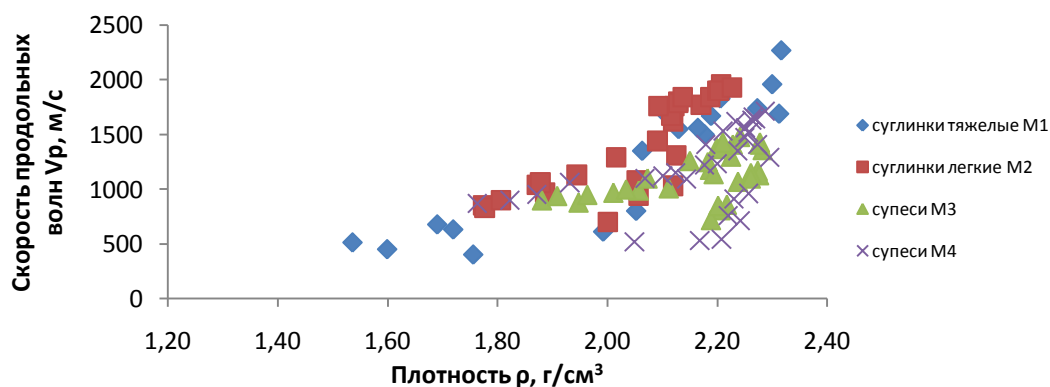


Рис. 3.7. Взаимосвязь скорости продольных волн и плотности модельных глинистых грунтов M1-M4

Повышение скоростей V_s связано с теми же факторами, что и V_p : 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 (данные по значениям скоростей см. в приложении 11). Отношение скоростей упругих волн снижается с ростом плотности $\frac{V_s}{V_p} = -0,32\rho + 0,98$, $r = -0,61$.

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) (рис. 3.8).

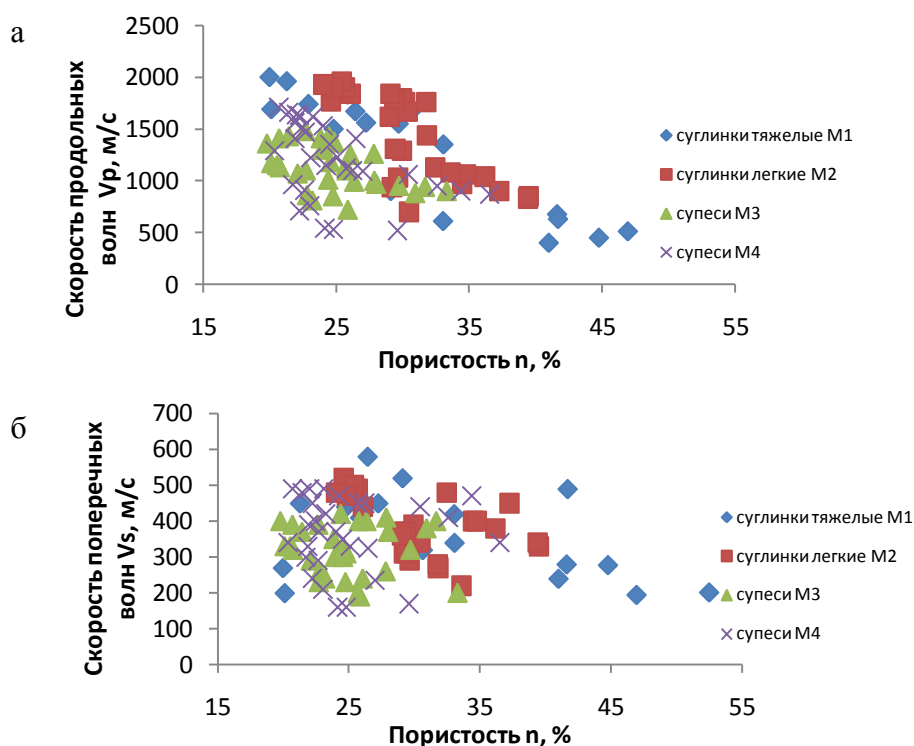


Рис. 3.8. Изменение скоростей: а) продольных волн V_p ; б) поперечных волн V_s при изменении пористости модельных суглинков (M1, M2) и супесей (M3, M4)

Для более убедительного доказательства определяющего влияния плотности грунта на скорость распространения упругих волн для каждого модельного грунта были выбраны группы образцов с одинаковыми значениями влажности. Для суглинков M1 выбраны образцы с W 9-10 %, суглинков M2 и супесей M3 от 8 до 9 %, супесей M4 от 7 до 8 %. По выбранным данным построены графики зависимости скоростей упругих волн при изменении плотности модельных грунтов, но одинаковой влажности «внутри» каждой модели (рис. 3.9).

В пределах каждой модели оставались постоянными состав, типы структурных связей и влажность образцов. Поэтому считалось, что увеличение скоростей в образцах глинистых грунтов должно было зависеть только от его плотностных характеристик.

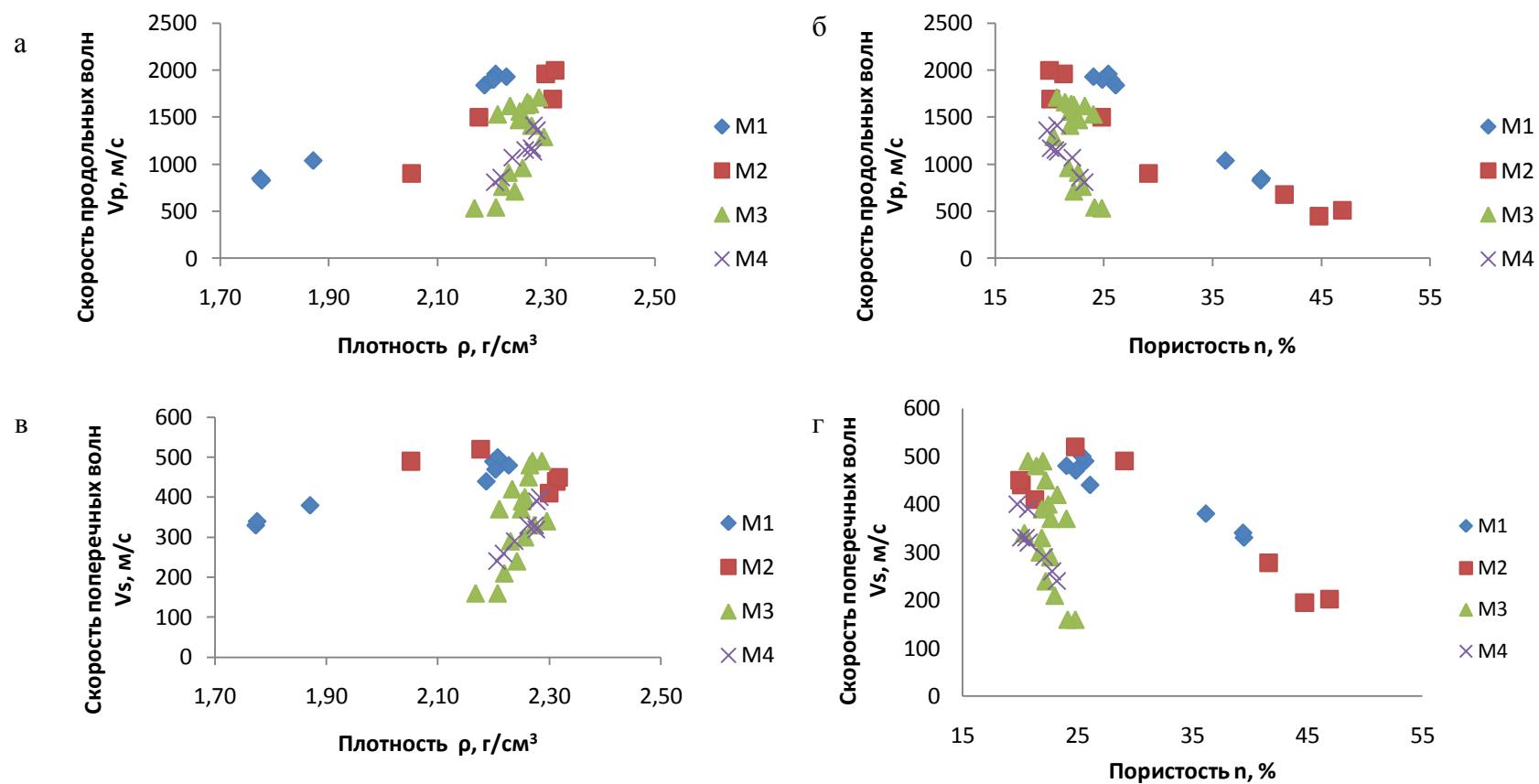


Рис. 3.9. Взаимосвязи скоростей упругих волн с плотностью (а, в) и пористостью (б,г) модельных суглинков (M1, M2) и супесей (M3, M4) для групп образцов с близкими значениями влажности

Как и при рассмотрении каждой модели в отдельности, наблюдается увеличение скоростей упругих волн с ростом плотности и плотности скелета и снижение скоростей с ростом пористости и коэффициента пористости.

При детальном изучении всех модельных грунтов можно сделать вывод о сильном влиянии плотностных характеристик (особенно самой плотности) на скорости продольных волн и отношение скоростей. Причем с увеличением дисперсности это влияние усиливается. Влияние изменения плотности на скорости поперечных волн выражено слабее.

Природные грунты

Для *природных четвертичных грунтов* (gQ_{1dns}) общий характер зависимостей $V_p(\rho, \rho_d)$ сохраняется: скорости продольных волн увеличиваются с ростом плотности и плотности скелета грунтов (табл. 3.11, рис. 3.10) и уменьшаются с ростом пористости и коэффициента пористости (рис. 3.11, а).

Таблица 3.11. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей четвертичных моренных суглинков и супесей

| Показатели плотности и пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| ρ , г/см ³ | 0,57 | -0,10 | -0,56 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,55 | -0,15 | -0,58 |
| ρ_s , г/см ³ | -0,31 | 0,40 | 0,42 |
| n , % | -0,68 | 0,35 | 0,67 |
| e , ед. | -0,70 | 0,39 | 0,72 |

Отношение скоростей снижается с ростом плотности грунта. Однако для всех приведенных графиков связи оказались слабыми ($0,5 < r < 0,7$), поэтому можно говорить скорее о наличии тенденции в изменении изучаемых параметров.

Изменения плотности твердого компонента грунта в пределах 2,71-2,90 г/см³ слабо сказываются на изменениях скоростей упругих волн.

Рост пористости и коэффициента пористости приводит к снижению скоростей продольных волн и увеличению отношения скоростей (рис. 3.11). Причем связи относятся к категории тесных ($r > 0,7$). Линейные уравнения связи выглядят так:

$$V_p = -3600e + 3408 \quad (r = -0,70); \quad \frac{V_s}{V_p} = 0,96e - 0,27 \quad (r = 0,72).$$

Проведенный анализ показывает те же закономерности влияния плотностных характеристик и показателей пористости на скорости упругих волн и отношения скоростей, как и в случае модельных глинистых грунтов.

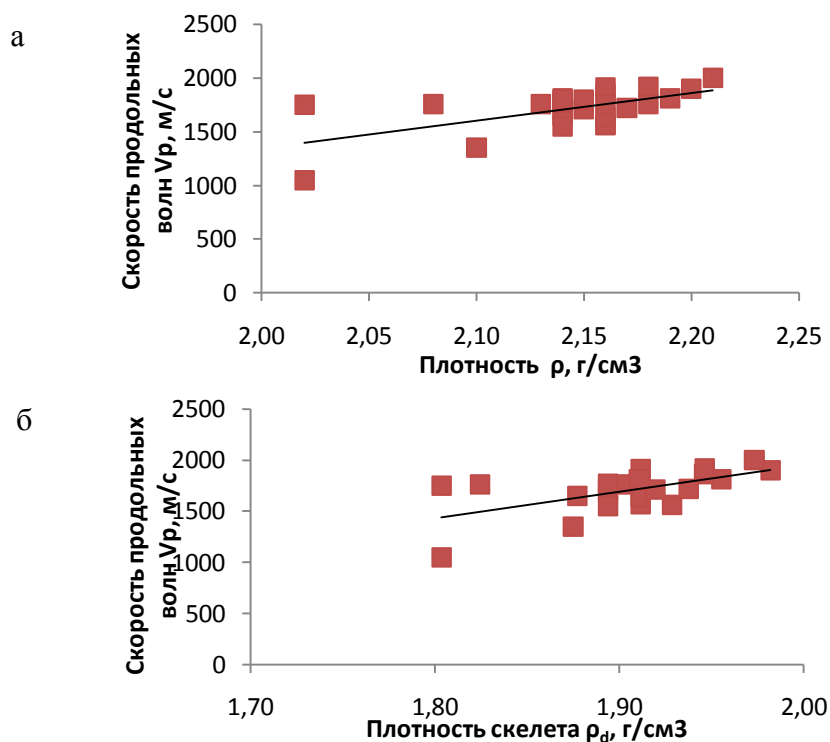


Рис. 3.10. Взаимосвязи скоростей продольных волн и плотности (а), плотности скелета (б) природных четвертичных суглинков и супесей

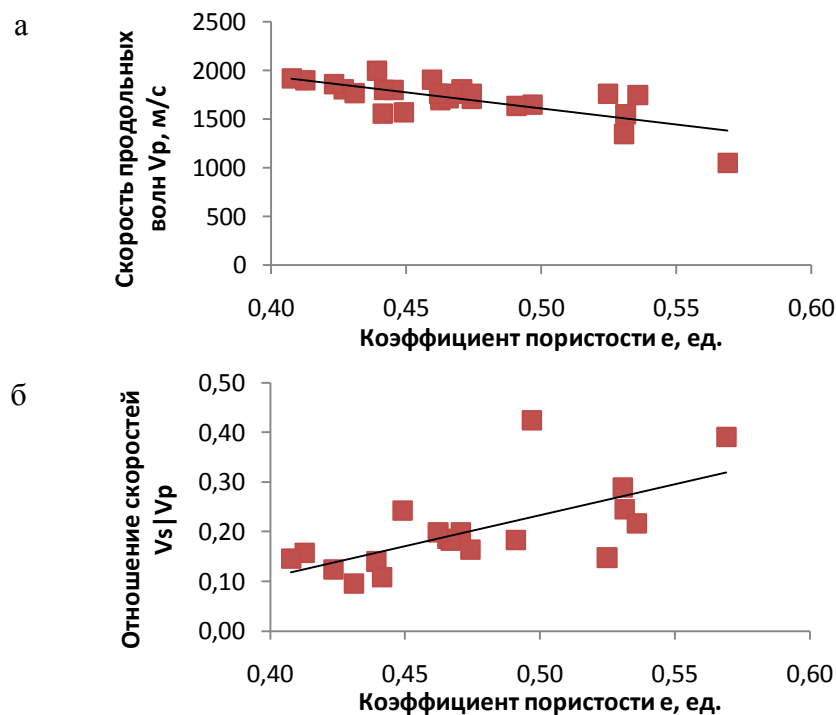


Рис. 3.11. Взаимосвязи скоростей продольных волн (а), отношения скоростей (б) с коэффициентом пористости природных четвертичных суглинков и супесей

При анализе влияния изучаемых факторов на скорости упругих волн только для природных четвертичных суглинков (без супесей) получено, что парные коэффициенты корреляции меняются незначительно, поэтому отдельно анализ проводиться не будет. Малые изменения коэффициентов корреляции связаны с небольшим количеством образцов супесей и

тем, что по своему гранулометрическому составу природные моренные супеси близки к суглинкам.

Задача оценки влияния плотности на скорости упругих волн при равенстве других факторов (состав, дисперсность, влажность) для природных грунтов в рамках этой работы была невыполнима, поскольку каждый образец обладает своими особенностями состава и строения. Отметим лишь, что влажность природных четвертичных суглинков и супесей менялась незначительно (от 11 до 14 %), поэтому ее влияние не велико. Этот факт подтверждается результатами пошагового регрессионного анализа, при выполнении которого предполагаемого увеличения коэффициентов корреляции между исследуемыми параметрами не наблюдается.

При изучении *юрских суглинков и глин (J3ox)* более показательными оказались связи скоростей с плотностью скелета грунта, чем с плотностью (табл. 3.12, рис. 3.12).

Уравнение взаимосвязи $V_p=7092\rho_d-8418$ ($r=0,71$), как и ожидалось, описывает увеличение скоростей продольных волн с ростом плотности скелета грунта (рис. 3.12, а). Связь скорости поперечных волн с плотностью скелета, хоть и является слабой ($r=0,63$), но прослеживается довольно четко (рис. 3.12, б). С ростом плотности прослеживается снижение отношения скоростей по линейному закону $\frac{V_s}{V_p} = -0,5\rho + 1,1$ ($r=-0,71$).

Таблица 3.12. Парные коэффициенты корреляции (r) скоростей упругих волн и плотностных показателей юрских суглинков и глин

| Показатели плотности, пористости | Скорости продольных волн V_p , м/с | | | Скорости поперечных волн V_s , м/с | | | Отношение скоростей V_s/V_p | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|----------|-------|--------------------------------------|----------|-------|-------------------------------|----------|-------|
| | суглинки и глины | суглинки | глины | суглинки и глины | суглинки | глины | суглинки и глины | суглинки | глины |
| ρ , г/см ³ | 0,48 | 0,51 | 0,96 | 0,19 | 0,12 | 0,88 | -0,71 | 0,63 | -0,92 |
| ρ_d , г/см ³ | 0,71 | 0,71 | 0,54 | 0,63 | 0,49 | -0,21 | -0,61 | -0,82 | -0,75 |
| ρ_s , г/см ³ | 0,16 | 0,33 | -0,02 | -0,06 | 0,00 | 0,20 | -0,38 | -0,61 | -0,10 |
| n , % | -0,36 | -0,23 | -0,22 | -0,53 | -0,39 | -0,33 | 0,05 | 0,03 | 0,12 |
| e , ед. | -0,35 | -0,23 | -0,20 | -0,49 | -0,37 | -0,29 | 0,07 | 0,06 | 0,14 |

При рассмотрении отдельно юрских суглинков (10 образцов) и глин (5 образцов) оказалось, что уравнения взаимосвязи скоростей V_p с плотностью различны: $V_p=3029\rho-4019$ ($r=0,51$) и $V_p=8360\rho-13164$ ($r=0,92$) (рис. 3.13) соответственно. Отмечаются более высокие значения коэффициентов корреляции для образцов юрских глин по сравнению с суглинками. Однако количество образцов глин не позволяет говорить о каких-либо четких закономерностях изменения свойств, а скорее показывает общее направление их изменения.

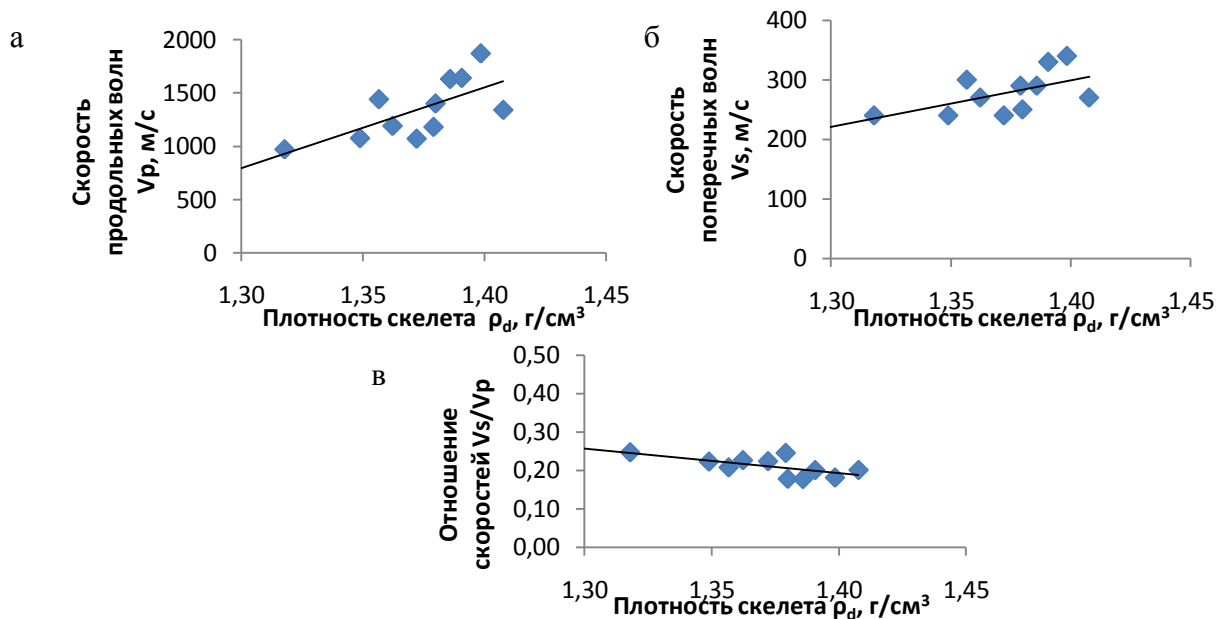


Рис. 3.12. Взаимосвязи: а) скорости продольных волн и плотности скелета; б) скорости поперечных волн и плотности скелета; в) отношения скоростей и плотности скелета юрских суглинков и глин

По полученным данным подтверждается значимая роль дисперсности и характера структурных связей в формировании скоростей упругих волн.

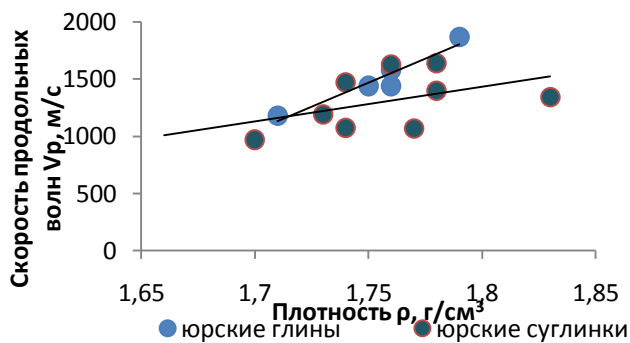


Рис. 3.13. Взаимосвязь скоростей продольных волн и плотности природных юрских суглинков и глин

Поскольку все природные и модельные образцы имели схожие закономерности изменения параметров, для более наглядного сравнения были построены графики, на которых отражены полученные уравнения изменения скорости продольных волн с ростом плотности для каждого из рассмотренных видов грунтов (рис. 3.14). Разными цветами обозначены корреляционные прямые грунтов разного вида. Кроме аппроксимации линейной функцией (рис. 3.14, а) приводятся описания зависимостей $V_p(\rho)$ экспоненциальным законом (рис. 3.14, б). Как отмечалось выше, по результатам исследований автора экспоненциальная функция не всегда статистически более тесно описывает полученные зависимости (например, для природных грунтов), однако, в ряде случаев (например, для модельных глинистых грунтов) значения коэффициентов корреляции несколько выше, чем для линейной функции.

Независимо от выбранного закона аппроксимации закономерности изменения параметров сохраняются.

Приведенный рисунок показывает, что разные глинистые грунты формируют в координатном поле разные прямые. Однако в целом можно сделать вывод о том, что угол наклона этих прямых увеличивается с ростом дисперсности (рис. 3.14, а). Тот факт, что прямые для суглинков М1, М2 и для супесей М3, М4 очень близки друг к другу можно объяснить близостью гранулометрического состава М1, М2 (суглинки тяжелые и легкие) и М3, М4 (супеси песчаные). Корреляционная прямая для четвертичных моренных суглинков близка к прямой для модельных суглинков М1, поскольку большинство исследуемых природных грунтов по своему составу соответствуют этой модели. Угол наклона приведенных прямых к оси плотности (в выбранном масштабе) соответствует 15-19° для модельных супесей М3, М4; 32-36° для модельных суглинков М1, М2 и природных четвертичных грунтов; 46° и 68° для природных юрских суглинков и глин соответственно. При значениях плотности более 1,8 г/см³ выражено увеличение скоростей продольных волн с ростом дисперсности при одном значении плотности (см. рисунок 3.14, а, б).

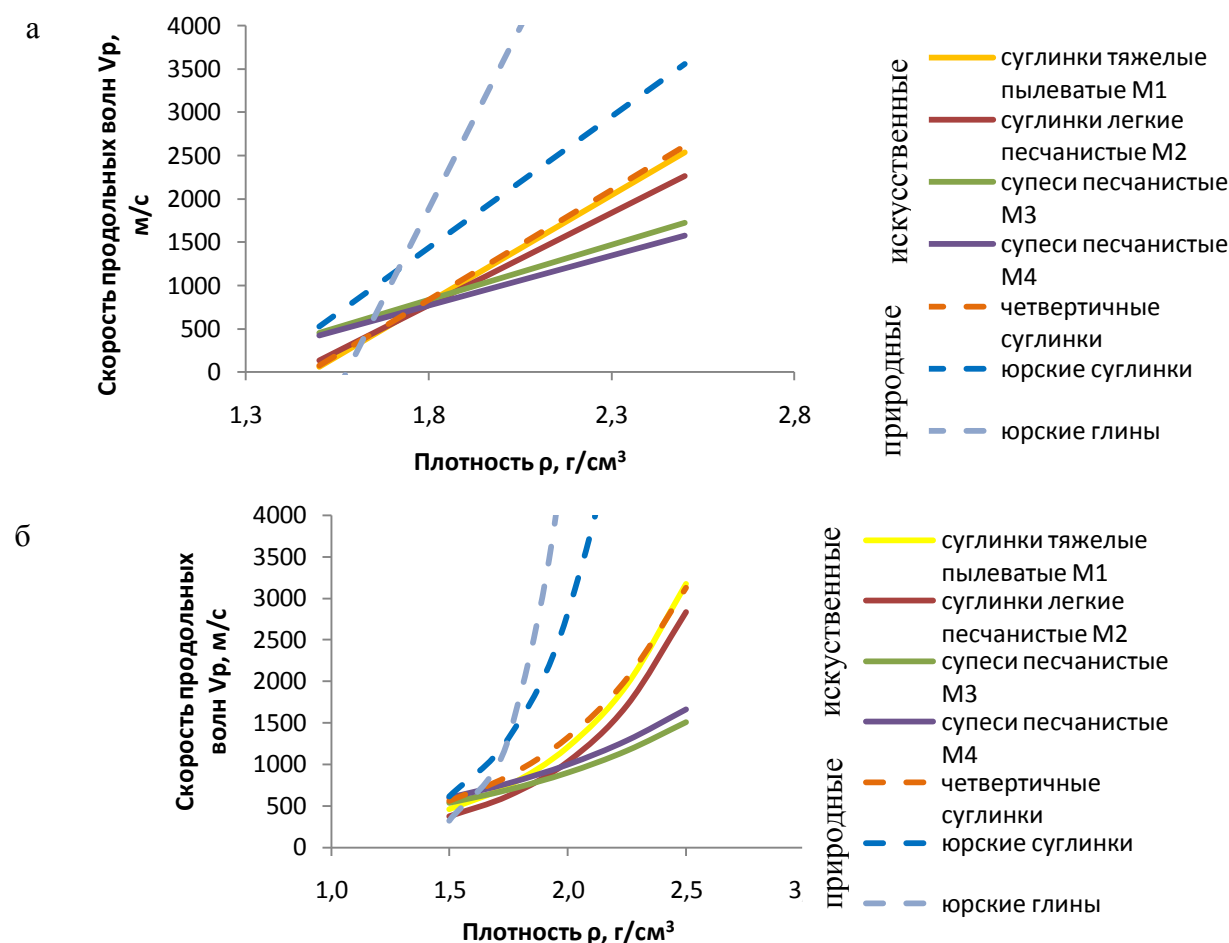


Рис. 3.14. Корреляционные прямые скоростей продольных волн и плотности всех исследуемых глинистых грунтов при аппроксимации линейной (а) и экспоненциальной (б) функциями

Увеличение угла наклона графиков корреляционных функций с ростом дисперсности предположительно 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 плотности.

Приведенные результаты экспериментальных исследований позволяют сформулировать **первое защищаемое положение:**

При близких значениях плотности, пористости и влажности грунтов скорости продольных волн глинистых грунтов 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.

Еще одной четкой закономерностью для всех исследованных образцов стало снижение отношения скоростей упругих волн с ростом плотности. Графики корреляционных прямых этих соотношений представлены на рис. 3.15.

Полагаем, что для отношения скоростей очень важным влияющим фактором является тип контактов, поскольку корреляционные прямые модельных грунтов лежат довольно близко друг к другу, а особым образом на плоскости выделяются линии связи для природных четвертичных и юрских глинистых грунтов (со структурными связями и контактами, формировавшимися в геологическом масштабе времени).

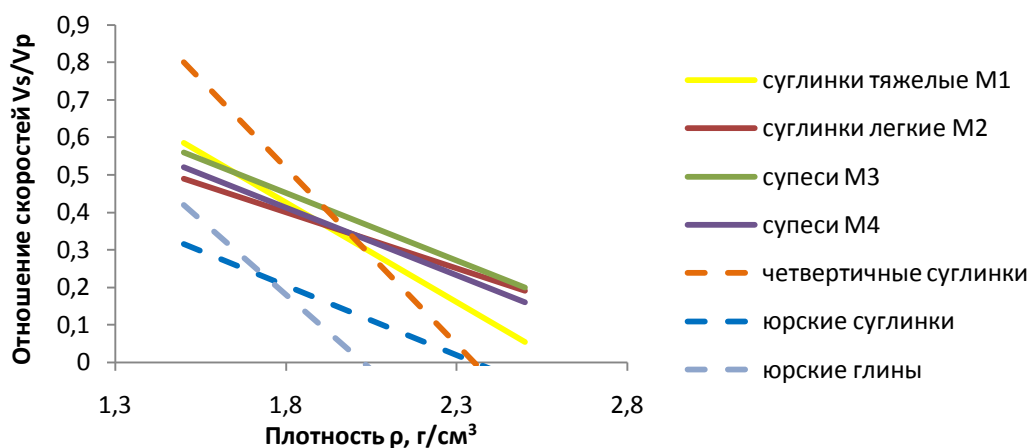


Рис. 3.15. Корреляционные прямые между отношением скоростей и плотностью для всех исследуемых глинистых грунтов

3.3. Влияние влажности и степени влажности глинистого грунта

Жидкий компонент – важнейшая составная часть глинистых грунтов. Хотя в большинстве случаев он представлен водными растворами электролитов, на практике часто говорят о «воде» в грунтах. Благодаря своей высокой подвижности и физико-химической активности вода занимает пустотное пространство грунта (трещины, поры) и взаимодействует с поверхностью твердых частиц. В зависимости от количества содержащейся влаги в грунте меняются его физические и динамические свойства, в том числе скорости упругих волн.

Экспериментальных исследований по изучению зависимостей скоростей упругих волн от количества содержащейся в грунтах влаги до настоящего времени проводилось немного, в то время как различные виды воды в грунте определяют состояние, тип структурных связей и свойства грунтов. Наиболее изучено влияние свободной воды. В формировании свойств песков главную роль играет именно свободная вода, в глинах – связанная и переходного вида, в суглинках и супесях большое значение имеют все виды влаги. В зависимости от количества влаги и ее видов в грунте могут иметь место пороговые значения влажности, при переходе через которые сейсмические свойства меняются (Тырина, Пиоро, 2012).

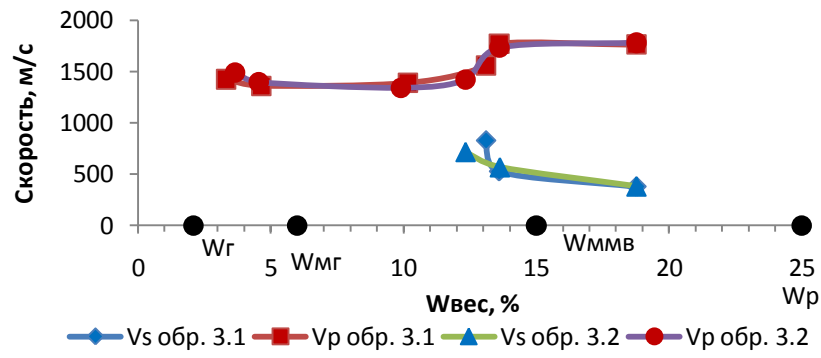
Обсуждению результатов исследования влияния жидкого компонента на распространение упругих волн в глинистых грунтах посвящена публикация с участием автора, сделаны устные доклады на VIII научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (2012 г) и международной научной молодежной конференции «Ломоносов-2012».

Вопрос о влиянии степени влажности на скорости упругих волн достаточно сложный и неоднозначный. В рамках данной работы проводились измерения скоростей на влажных образцах по мере их дегидратации, однако, в ходе этого процесса происходили изменения не только влажности, степени влажности и консистенции грунтов, но и плотностных характеристик. Для минимизации усадки брались образцы моренных суглинков, причем линейная усадка для природных образцов составила 0,029-0,054 (в среднем 0,04), а для модельных 0,017-0,073, в среднем 0,03. Линейная усадка величиной 0,03 допускается даже для оптимальных грунтовых смесей, имеющих наибольшую плотность скелета среди дисперсных грунтов (Борисова, 1954).

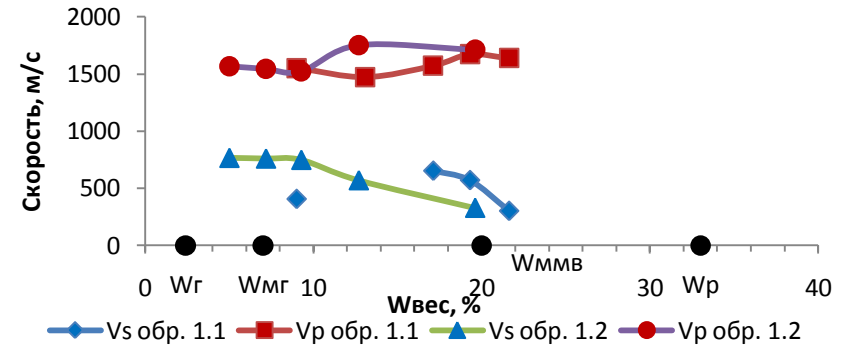
Для *природных глинистых грунтов* (образцы 1.1-10.2) рассматривался интервал влажности $3 \div 25$ %, что соответствует изменению влажности от гигроскопической до нижнего предела пластичности.

Для определения влияния **влажности** на значения скоростей упругих волн были построены соответствующие графики (рис. 3.16).

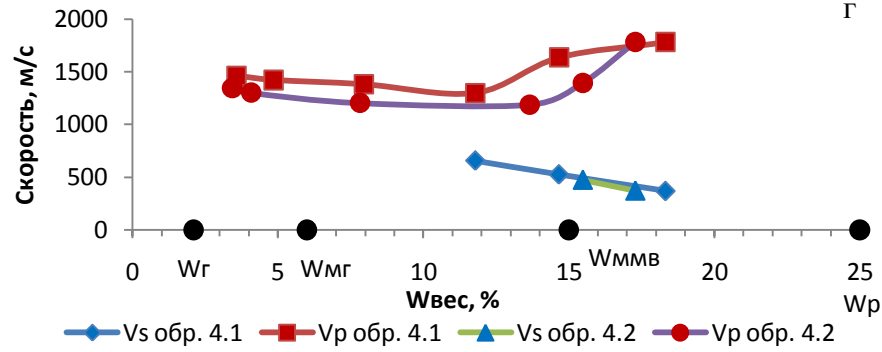
а



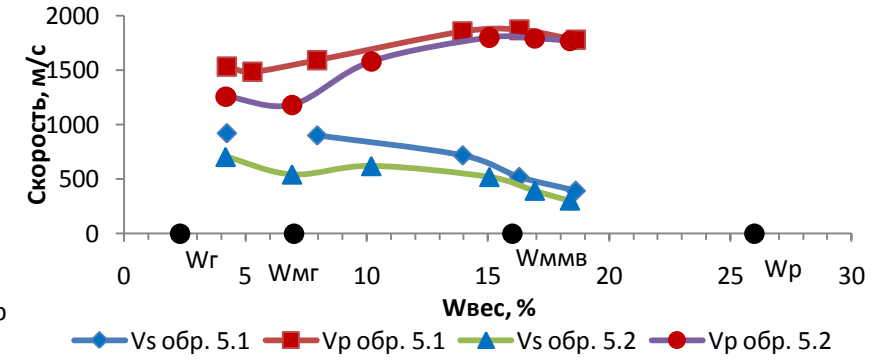
б



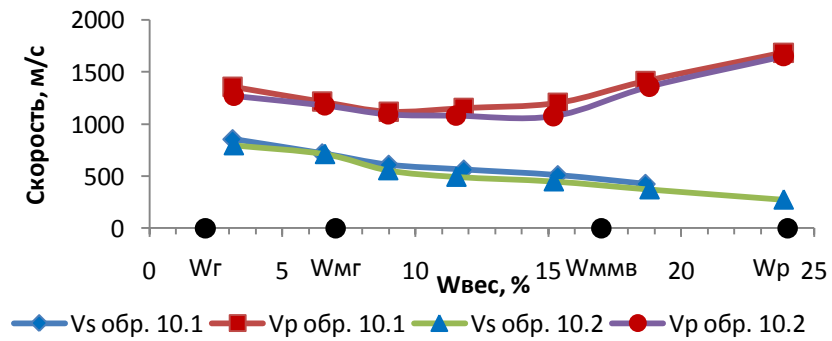
в



г



д



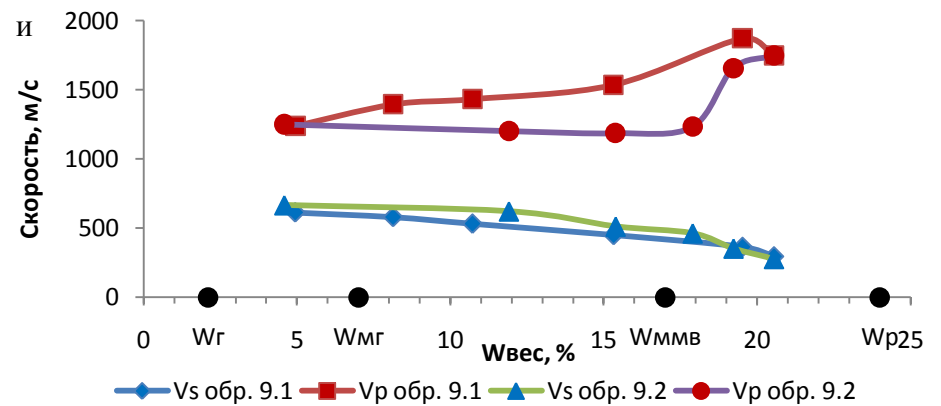
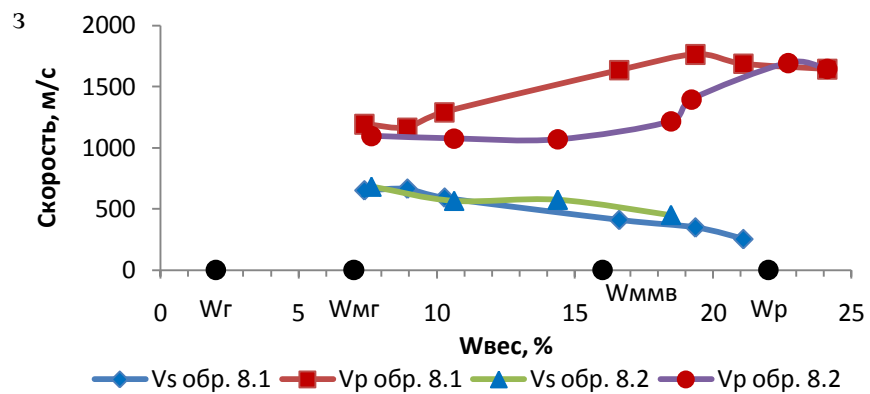
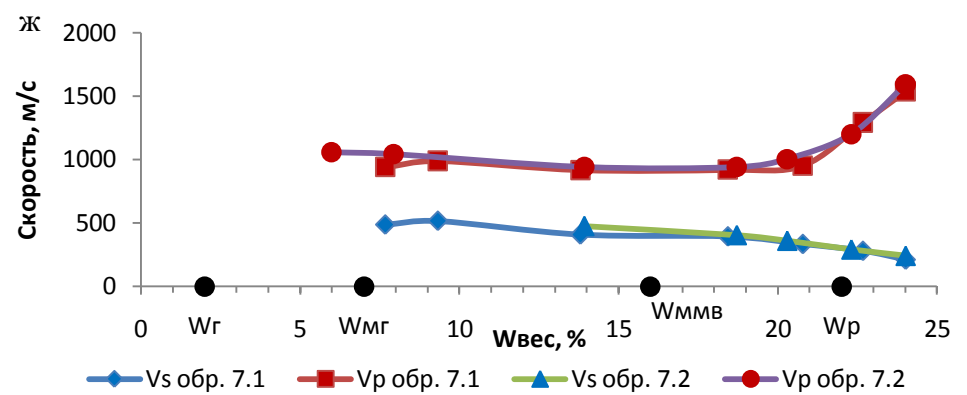
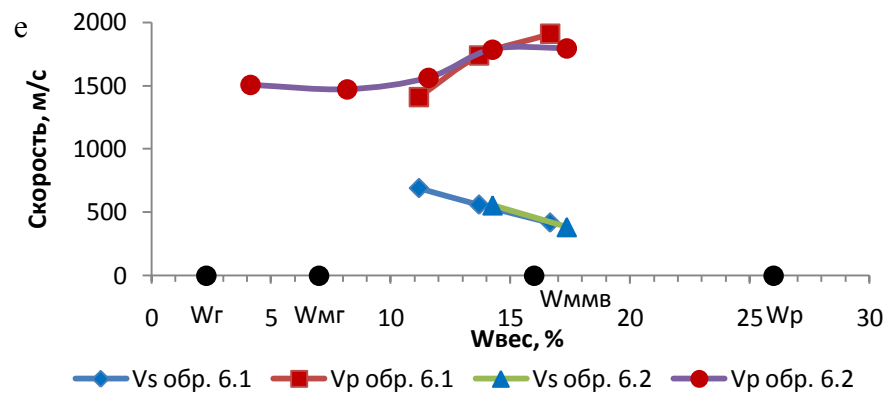


Рис. 3.16. Изменение скоростей V_s и V_p в зависимости от весовой влажности природных глинистых грунтов ($gQ_{I\text{dns}}$)

По графикам видно, что скорости продольных волн V_p уменьшаются до значения влажности, близкого максимальной гигроскопической влажности $W_{мг}$ (6÷7 %), затем в некотором интервале остаются примерно постоянными, после чего вновь возрастают.

В целом для всех образцов значение влажности, после которого скорости продольных волн начинают вновь возрастать, близко влажности максимальной молекулярной влагоемкости $W_{ммв}$, которая меняется для образцов от 15 до 20 %. В интервале влажности от максимальной гигроскопической до влажности максимальной молекулярной влагоемкости во всех образцах исследованных природных глинистых грунтов наблюдаются наиболее низкие значения скоростей продольных волн. Также можно отметить, что для более дисперсных разностей границы этого интервала приурочены к большим значениям весовой влажности, что согласуется с литературными данными о влиянии дисперсности на величины характеристических влажностей (Грунтоведение, 2005).

Такие особенности зависимостей $V_p, V_s=f(W)$ автор объясняет изменением микроструктуры глинистых грунтов при их взаимодействии с водой. Микроструктура четвертичных моренных суглинков – матричная. Она состоит преимущественно из неориентированной матрицы микроагрегатов глинистых частиц, в которой беспорядочно расположены песчаные и пылеватые зерна (Осипов, Соколов, Румянцева, 1989). Известно, что глинистые частицы имеют анизометричную форму. Поэтому микроструктуру исследуемого грунта можно представить следующим образом (рис. 3.17).

При распространении упругой продольной волны возникают силы, сжимающие и растягивающие грунт. Ввиду наличия большого количества пор в глинистых грунтах (пористость может превышать 50 %), определяющую роль в упругих свойствах глинистого грунта начинает играть именно структура минерального скелета грунта, а не упругие характеристики самих минералов, слагающих частицы грунта.

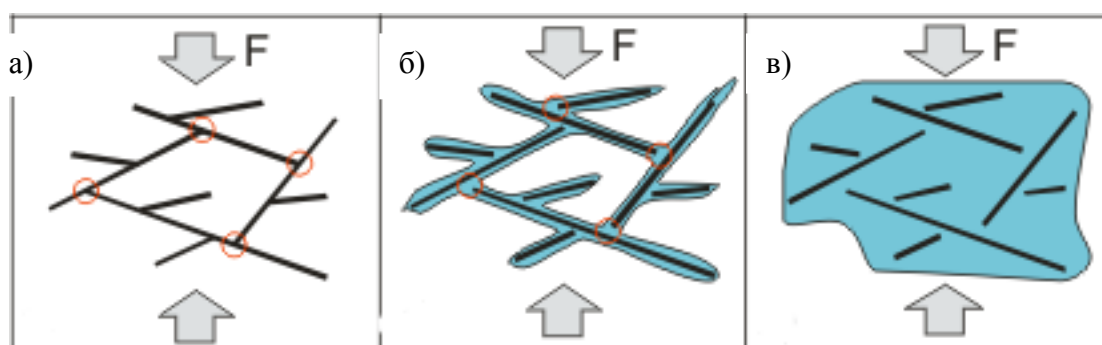


Рис. 3.17. Предлагаемая простейшая модель микроструктуры глинистых грунтов при разном заполнении пор водой (без учета набухания): а – вода отсутствует; б) – присутствует только связанная (адсорбционная) вода; в) – все поровое пространство занято водой

Рассмотрим для наглядности только момент сжатия при прохождении Р-волны. В случае абсолютно «сухого» скелета (рис. 3.17, а) особую роль будут играть места контактов (точечного или фазового типов) отдельных пластинок (выделены красным цветом), так как именно они придают жесткость такому скелету. Определенной жесткости или упругости такой структуры будет соответствовать некоторое значение скорости продольных волн.

При повышении влажности до значения максимальной гигроскопической ($W_{\text{мг}}$) вода перераспределяется по поверхностям глинистых частиц в виде тонкой адсорбционной «пленки», имеющей свои специфические свойства (рис. 3.17, б), описываемые, например, Б.В.Дерягиным (1956), В.И.Осиповым, В.Г.Бабаком (1987), В.И.Квливидзе, А.В.Краснушкиным, Р.И.Злочевской (Физико-химическая механика..., 1982). Эта вода оказывает влияние на контакты между отдельными пластинчатыми частицами скелета грунта. В рамках данной работы трудно сказать, каков именно механизм воздействия воды, однако, кажется очевидным, что этот процесс должен приводить к уменьшению жесткости (а значит и упругости) скелета. Важно отметить, что безводное пространство в порах четвертичных суглинков (относятся к ненабухающим) продолжает существовать, а, значит, жесткость скелета оказывает основное влияние на скорость продольных волн, которая будет падать с ростом влажности – то есть с уменьшением жесткости.

Процесс уменьшения скоростей продольных волн при увеличении влажности будет продолжаться до тех пор, пока в грунте присутствуют поры, заполненные газом (воздухом), упругими свойствами которого можно пренебрегать. Однако при полном заполнении пор водой жесткость минерального скелета перестает оказывать влияние на скорости продольных волн. Вода плохо сжимаема, и при быстрых знакопеременных нагрузках, возникающих при распространении упругих волн, в виду своей вязкости, она не успевает перетекать из областей повышенного давления в области пониженного, тем самым оказывая упругое сопротивление силам сжатия (рис. 3.17, в). То есть, упругие свойства порового пространства, заполненного водой, оказываются выше, чем содержащего воздух, что, безусловно, повышает скорости продольных волн. Здесь можно отметить, что сам скелет глинистого грунта может вообще потерять упругие свойства, как в системах типа суспензий, однако, скорости продольных волн будут по прежнему высоки, не менее 1500 м/с (скорость звука в воде).

Постепенное увеличение числа пор, заполненных водой, приводит к плавному увеличению скорости продольной волны (см. рис. 3.16), которая в пределе оказывается чуть больше упомянутых выше 1500 м/с, так как некоторый прирост скоростей дают минеральные частицы, особенно песчаные зерна, находящиеся в составе исследуемых грунтов.

Объяснения хода зависимости $V_s=f(W)$ для поперечных волн можно выполнить в том же ключе, принимая в расчет не силу сжатия, а сдвиг. В этом случае жесткость скелета (как системы со связанной (или адсорбционной) водой будет играть решающую роль всегда и практически не будет зависеть от наличия или отсутствия свободной воды, так как модуль сдвига воды равен нулю. Тот факт, что при увеличении влажности на всем исследуемом диапазоне скорость поперечных волн постоянно падает, свидетельствует о том, что жесткость скелета непрерывно снижается, т.е. сцепление на контактах отдельных частиц постоянно ухудшается.

Наличие песчаных зерен в составе грунта не изменяет сути происходящих процессов, так как в большинстве случаев контакт между зернами осуществляется через пластинки глинистых минералов. Песчаные зерна должны только менять абсолютные значения скоростей упругих волн при фиксированных значениях влажности, не меняя при этом характер кривой.

Хорошо прослеживается закономерность изменения скоростей поперечных волн и соотношения скоростей V_s/V_p - их значения уменьшаются с увеличением влажности на всем рассматриваемом интервале (рис. 3.18, рис. 3.19).

Влияние влажности, как основного фактора в формировании скоростей упругих волн исследуемых глинистых грунтов, не может быть доказано без учета изменения плотности исследуемых образцов. В таблице 3.13 приведены диапазоны изменения плотности в течение эксперимента для каждого образца.

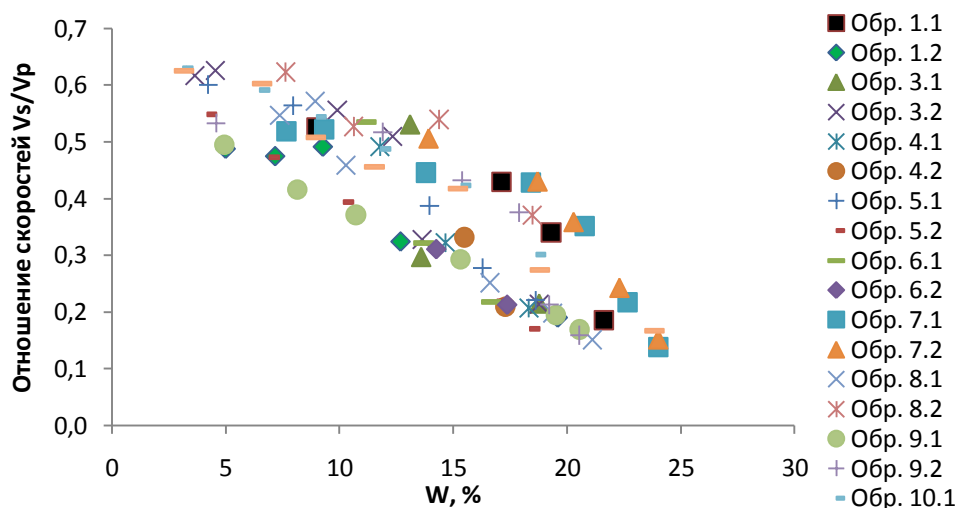


Рис. 3.18. Изменения соотношений скоростей V_s/V_p в зависимости от влажности природных глинистых грунтов

Как видно из таблицы, в большинстве случаев диапазон изменения плотности грунта при его дегидратации составляет $0,05 \text{ г/см}^3$, что соответствует 2,5 % его плотности (точность определения плотности $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$). При этом изменение скоростей продольных волн ΔV_p , например, в суглинках 7.1 составляет 750 м/с, а поперечных ΔV_s - 400 м/с. Плотность скелета

за счет усадки меняется значительно, однако, она постепенно повышается по мере снижения влажности, в то время как скорость продольных волн ведет себя неоднозначно (сначала несколько снижается, а потом постоянна или растет).

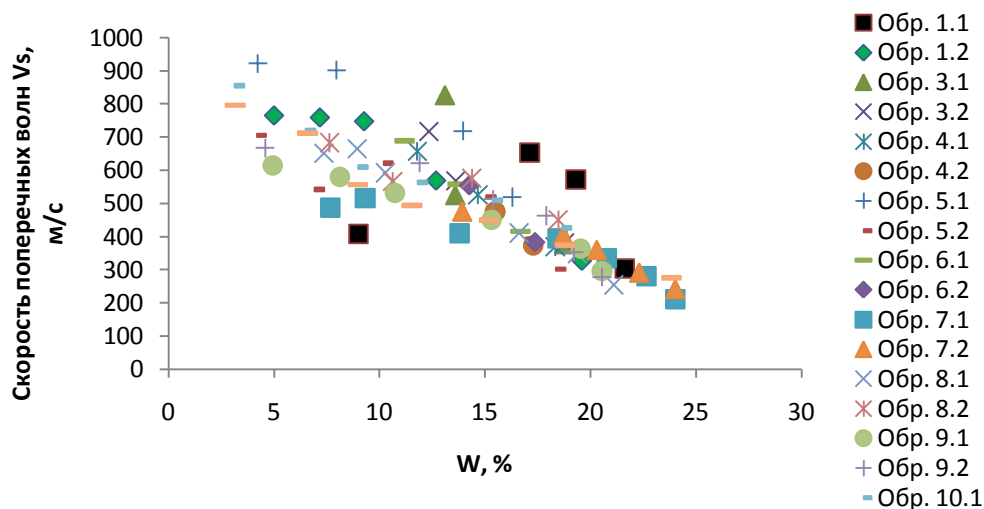


Рис. 3.19. Изменения скоростей поперечных волн V_s в зависимости от влажности природных глинистых грунтов

Таблица 3.13. Диапазоны изменения плотности моренных суглинков по мере дегидратации

| № образца | Диапазон изменения плотности ρ , г/см ³ | Диапазон изменения плотности скелета ρ_d , г/см ³ | № образца | Диапазон изменения плотности ρ , г/см ³ | Диапазон изменения плотности скелета ρ_d , г/см ³ |
|-----------|---|---|-----------|---|---|
| 1.1 | 2,05-2,10 | 1,72-1,90 | 1.2 | 2,10-2,19 | 1,77-2,00 |
| 3.1 | 2,12-2,16 | 1,80-2,05 | 3.2 | 2,11-2,16 | 1,82-2,04 |
| 4.1 | 2,13-2,18 | 1,83-2,06 | 4.2 | 2,11-2,19 | 1,84-2,04 |
| 5.1 | 2,14-2,18 | 1,81-2,07 | 5.2 | 2,15-2,18 | 1,82-2,09 |
| 6.1 | отбракован | | 6.2 | 2,17-2,18 | 1,86-2,09 |
| 7.1 | 2,02-2,06 | 1,65-1,88 | 7.2 | 2,04-2,07 | 1,66-1,92 |
| 8.1 | 2,05-2,09 | 1,68-1,91 | 8.2 | 2,00-2,09 | 1,66-1,85 |
| 9.1 | 2,05-2,14 | 1,76-1,95 | 9.2 | 2,00-2,09 | 1,72-1,91 |
| 10.1 | 2,00-2,09 | 1,67-1,94 | 10.2 | 1,97-2,09 | 1,68-1,91 |

Скорости поперечных волн снижаются с ростом влажности, но в данном случае связь более сложная: поперечная волна не распространяется в воде; кроме того, при начальных высоких влажностях плотность скелета ниже, чем у более дегидратированных образцов (за счет небольшой усадки).

Отношение скоростей снижается с ростом влажности сначала незначительно, а потом более резко. По-видимому, точка перегиба связана с точкой перегиба на графике $V_p(W)$, см. рис. 3.16.

Из изложенного выше следует, что влажность грунтов оказывает значительное влияние на распространение упругих волн в исследуемых глинистых грунтах. Полученные данные позволили сформулировать **второе защищаемое положение**:

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.

Зависимости скоростей упругих волн V_p и V_s от **степени влажности природных глинистых грунтов** также, как и от влажности, различны (рис. 3.20).

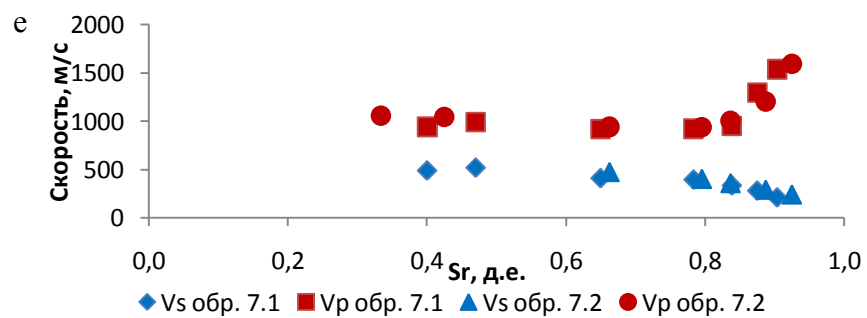
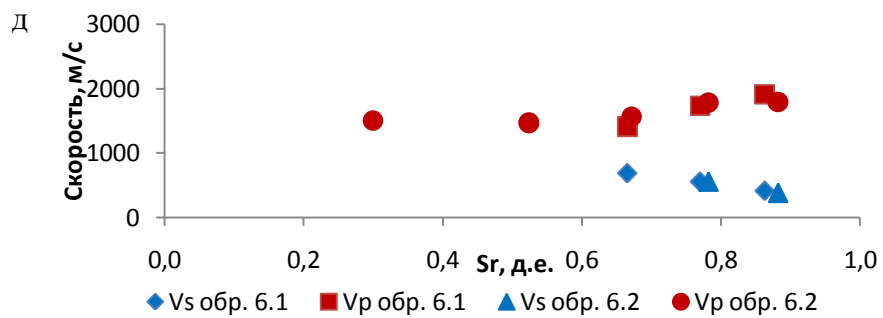
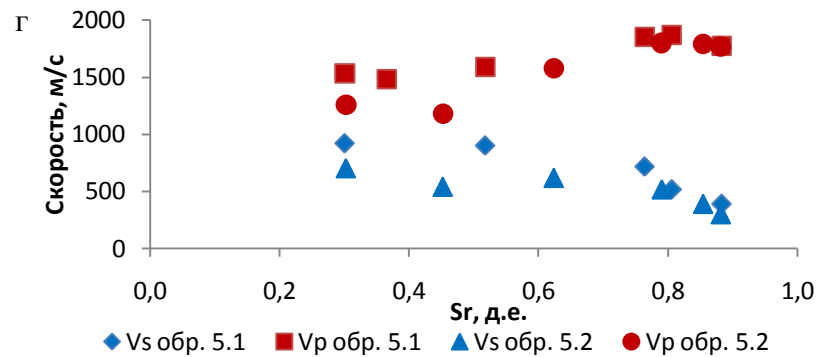
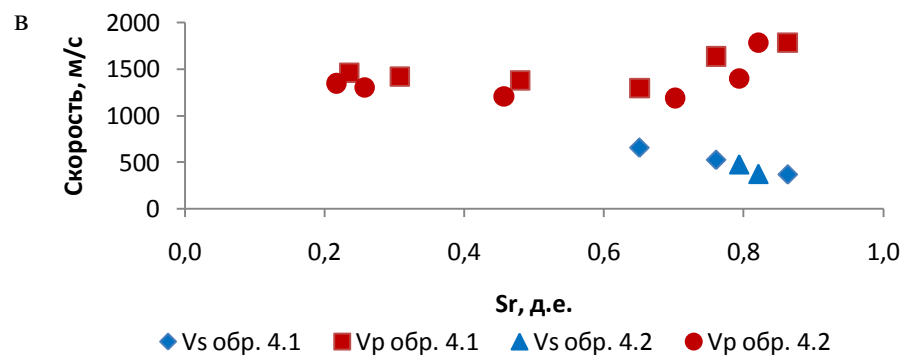
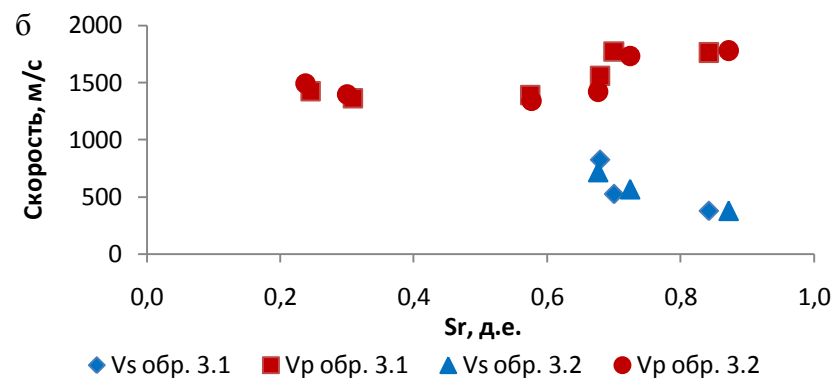
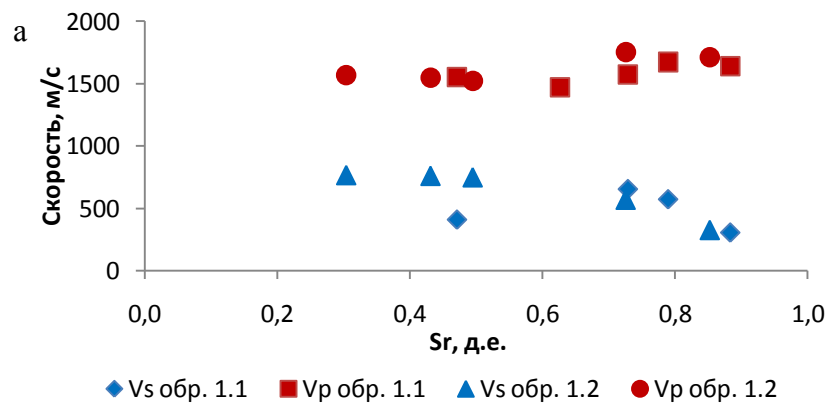
Скорости мало меняются от низких значений степени влажности до $S_r \approx 0,7-0,8$, а потом наблюдается резкий рост скоростей продольных волн и снижение скоростей поперечных волн. Такие закономерности прослеживаются во всех изученных образцах. Известно, что по степени влажности грунты подразделяются на маловлажные ($S_r \leq 0,5$), влажные ($0,5 < S_r \leq 0,8$), насыщенные водой ($0,8 < S_r \leq 1,0$).

Скорее всего, наличие точки перегиба на графике связано с ростом содержания воды переходного типа и изменением влажного состояния грунта на водонасыщенное. Для проверки этого предположения для каждого образца была оценена влажность, соответствующая $S_r = 0,8$ по формуле: $W_x = \frac{0,8\rho_{вн}}{\rho_d}$.

По полученным данным точка перегиба на графике $V_p(S_r)$, при которой наблюдается рост скоростей, соответствует значению влажности максимальной молекулярной влагоемкости для каждого образца грунта.

Соотношение скоростей V_s/V_p уменьшается с ростом степени влажности (рис. 3.20, к), однако, можно заметить, что график до значения $S_r = 0,7-0,8$ является «пологим», а после превышения этого значения наблюдается более резкое снижение значений скоростей.

Изучение взаимосвязи скоростей упругих волн с влажностью и степенью влажности проводилось и для *модельных образцов*. Для этого были отдельно сформованы по 2-3 образца каждой из моделей (M1, M2, M3, M4), и по аналогии с природными грунтами измерения проводились по мере их дегидратации. Нагрузка уплотнения этих образцов составляла 2 кг для суглинков M1, M2 и 3 кг для супесей M3, M4. Время уплотнения было уменьшено до 1 часа, чтобы свести к минимуму отжатие жидкости.



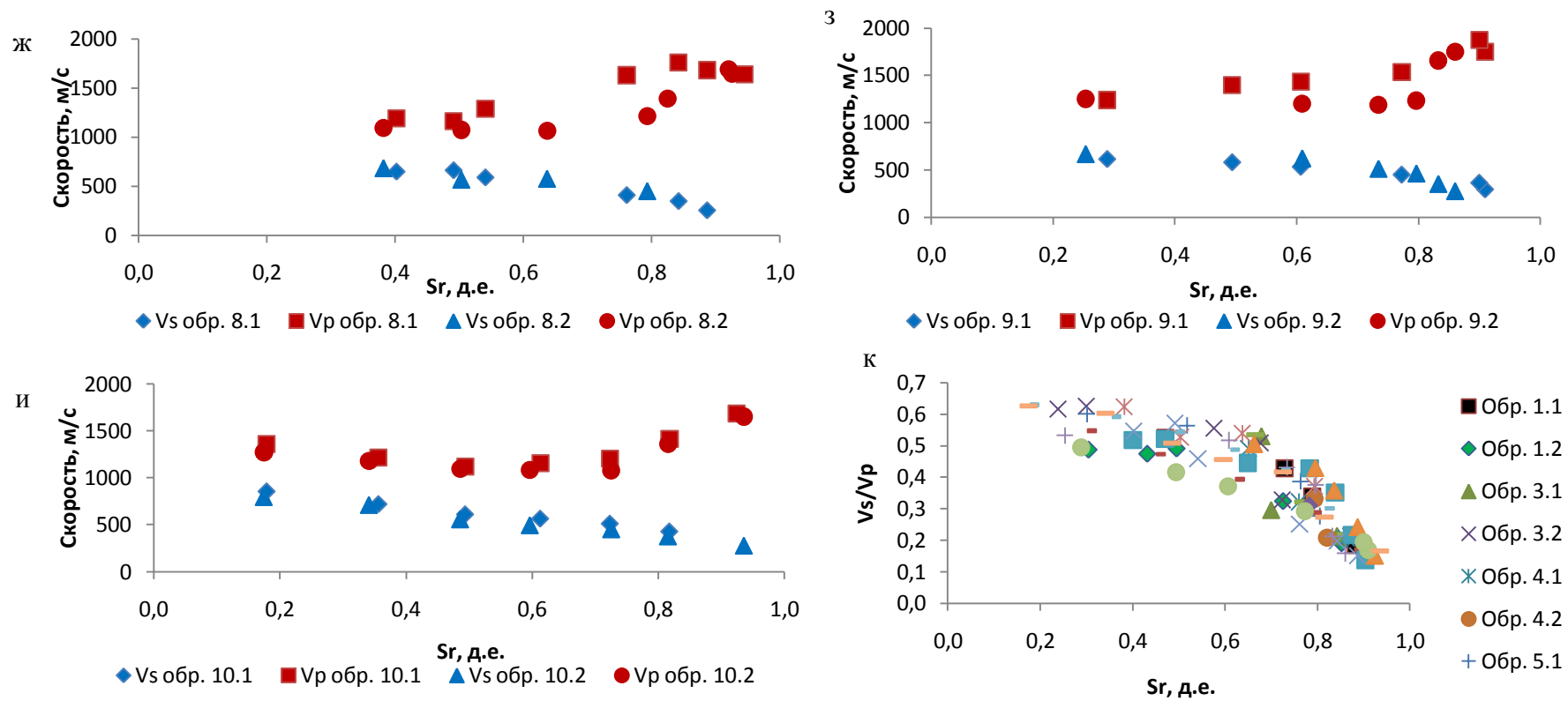


Рис. 3.20. Изменения скоростей V_s , V_p (а-и) и соотношения скоростей V_s/V_p (к) в зависимости от степени влажности природных моренных суглинков (обр. 1.1-10.1)

В ходе исследований, по мере дегидратации модельных образцов получены соответствующие значения влажности, плотности и скоростей упругих волн. По этим данным были рассчитаны значения плотности скелета и степени влажности (приложение 8).

Графики зависимости скоростей упругих волн и отношения скоростей от влажности (рис. 3.21) для всех моделей в целом подчиняются одинаковым закономерностям.

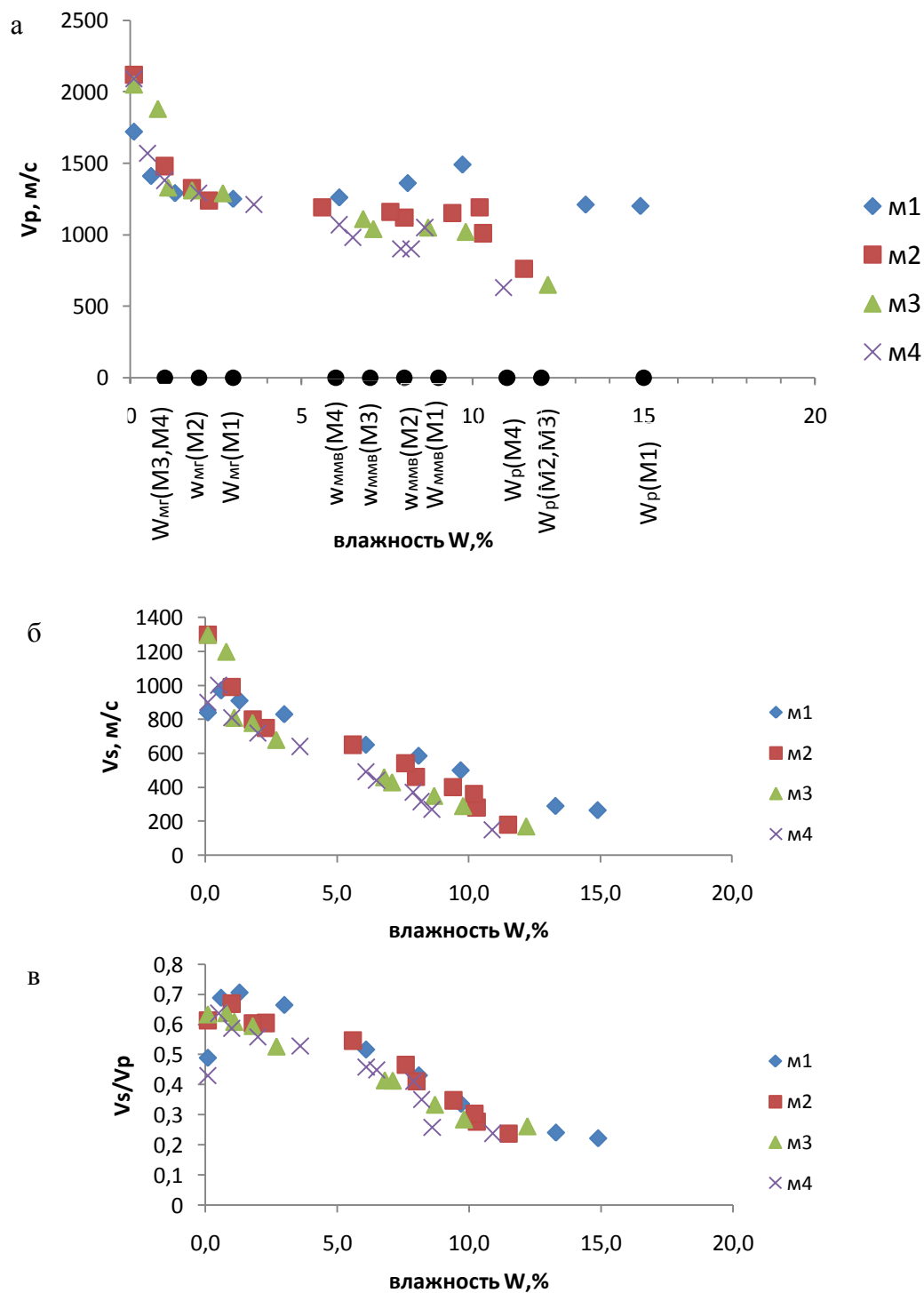


Рис. 3.21. Взаимосвязь скоростей упругих волн (а, б) и отношения скоростей (в) с весовой влажностью модельных суглинков (M1 и M2) и супесей (M3 и M4)

Скорости продольных волн V_p с ростом влажности (рис. 3.21, а) снижаются примерно до значений $W=2-3\%$ (причем абсолютные значения скоростей уменьшаются практически в два раза, а влажность при этом соответствует максимальной гигроскопической). Отметим, что изменения плотности на этом участке ($W < W_{mg}$) не превышают $0,06 \text{ г/см}^3$, а плотность скелета практически постоянна. По-видимому, влажность грунта особенно сильно влияет именно на этом интервале, характеризующимся интенсивным формированием адсорбционно связанной воды, исчезновением «сухих» контактов между частицами.

Далее по графику значения V_p примерно постоянны до W около 10% , после чего имеют некоторый тренд к дальнейшему снижению, однако, точно сказать сложно, поскольку эта закономерность прослеживается не везде, а данных при влажности $>10\%$ мало. Образец суглинка М1 при W около 9% (что соответствует влажности W_{mmb} для этого грунта) характеризуется некоторым повышением скорости продольных волн, после чего значения V_p вновь снижаются или примерно постоянны (для другого образца этой модели).

Скорость поперечных волн и отношение скоростей убывают на всем исследуемом интервале влажности. Это вполне согласуется с представлениями о распространении поперечных волн (волн «сдвига») в дисперсных грунтах. Хорошо известно, что сдвиговые характеристики глинистых грунтов существенно зависят от влажности и с ростом последней значительно снижаются (Грунтоведение, 2005). Подобная зависимость связана с проявлением эффекта П.А.Ребиндера.

Отметим, что плотность модельных грунтов менялась в более широких пределах, чем природных, в среднем на $0,2 \text{ г/см}^3$. Для всех образцов при дегидратации плотность сначала возрастала (за счет некоторой усадки), а потом убывала (за счет потери влаги при малых объемных изменениях скелета), пористость снижалась во всем диапазоне (приложение 8). Как отмечалось выше, при увеличении плотности скорость продольных волн растет, а в нашем случае наблюдается противоположный процесс – скорость V_p резко падает с ростом плотности. По-видимому, влияние влажности в данном случае достаточно велико, поскольку все остальные характеристики остаются постоянными.

Графики влияния степени влажности на скорости в модельных грунтах (рис. 3.22) похожи на графики влияния влажности. Скорость продольной волны сначала убывает до значения $S_r=0,10-0,20$, потом примерно постоянна, а иногда еще снижается при достижении $S_r=0,5-0,8$.

Скорость поперечных волн и отношение скоростей снижаются с ростом степени заполнения пор водой на всем интервале исследования.

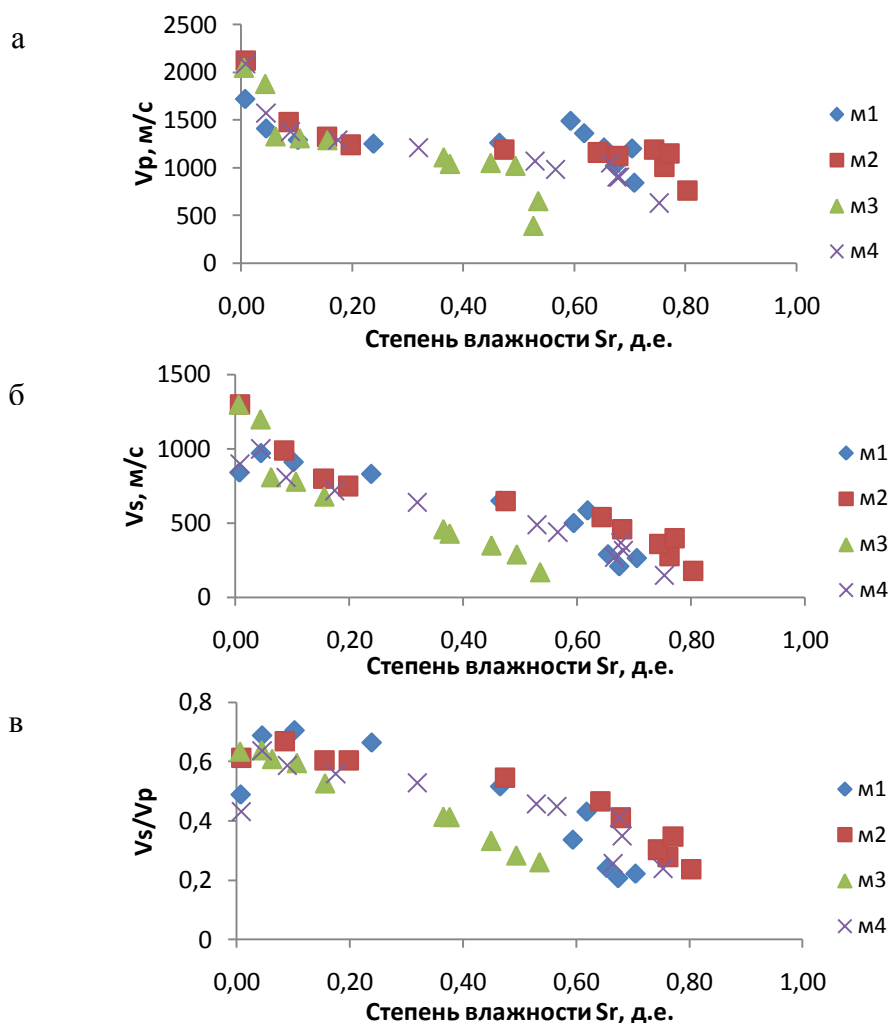


Рис. 3.22. Взаимосвязи скоростей упругих волн (а, б) и отношения скоростей (в) со степенью влажности модельных суглинков (M1 и M2) и супесей (M3 и M4)

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что характеры кривых изменения скоростей продольных волн с ростом влажности и степени влажности несколько отличаются для природных и модельных грунтов, что объясняется различием условий и длительностью формирования структурных связей исследуемых глинистых грунтов.

Для изучения особенностей строения глинистых грунтов при дегидратации были проведены исследования методом растровой электронной микроскопии. Для этого были искусственно приготовлены модельные грунты разной дисперсности (суглинки M1, M2 и супеси M3, M4) при влажностях близких $W_{\text{ММВ}}$ и $W_{\text{МГ}}$. Образцы при максимальной гигроскопической влажности были получены при высушивании образцов в эксикаторе с хлористым кальцием и последующем насыщении по методу Митчерлиха (при дальнейшей подготовке образцов для проведения микроструктурных исследований, возможно небольшое подсыхание грунта (0,5-1%), поэтому действительное значение влажности чуть ниже максимальной гигроскопической). Для каждого образца при двух значениях влажности проведена съемка при увеличениях в 10000, 1000, 150 и 75 раз.

На РЭМ-изображениях при влажности $W_{\text{МГ}}$ общая масса представлена в виде очень плотных, компактных агрегатов, разделенных трещинами усадки (рис. 3.23, а). Для образцов с влажностью близкой $W_{\text{ММВ}}$ отмечается присутствие «серповидных» (Чернов, 2007) пор вокруг зерен кварца (рис. 3.23, б), при малых увеличениях в структуре прослеживается наличие заземленного воздуха, непосредственного контакта зерен и глинистого материала нет, поскольку в этих местах должна быть гидрофильная пленка, которая исчезла в процессе замораживания и сублимации (Осипов, Соколов, Румянцева, 1989).

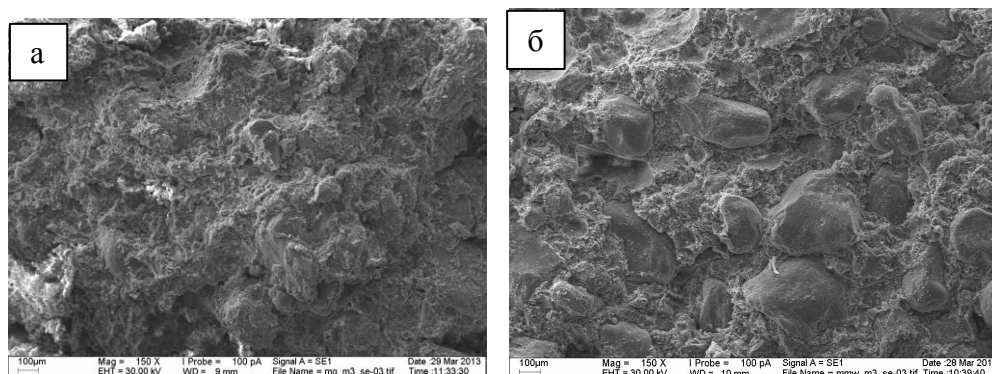


Рис. 3.23. РЭМ-изображения микроструктуры модельной супеси (М3) при максимальной гигроскопической влажности (а) и влажности максимальной молекулярной влагоемкости (б) ($\times 150$)

На рис. 3.24 приведены изображения непосредственно зоны контакта зерна и глинистого заполнителя при различных значениях влажности. Для грунтов при влажности $W_{\text{ММВ}}$ характерна значительно более рыхлая структура по сравнению с $W_{\text{МГ}}$, что в конечном счете сказывается и на значениях скоростей упругих волн, которые снижаются с увеличением влажности в исследуемом интервале. Для всех кварцевых зерен характерно наличие железисто-глинистой рубашки.

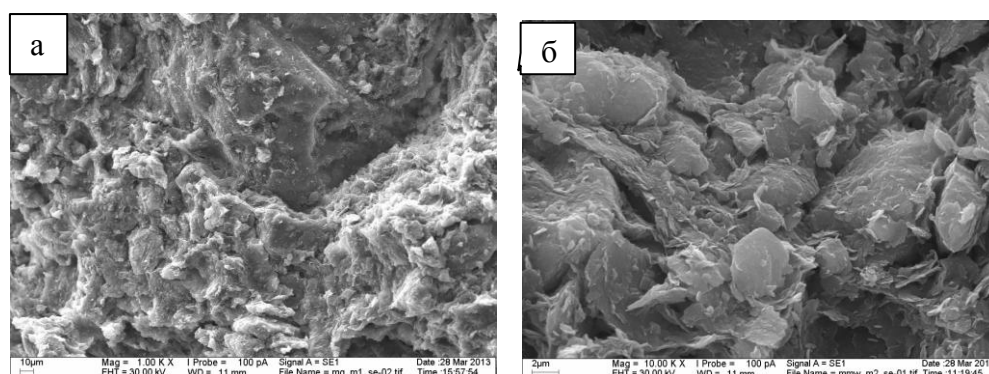


Рис. 3.24. Контакт зерна и глинистой матрицы при максимальной гигроскопической влажности (а) и влажности максимальной молекулярной влагоемкости (б) модельного суглинка М1 ($\times 1000$)

При сопоставлении одноподобных зависимостей для природных и модельных грунтов обнаруживаются не полные соответствия. Например, для модельных грунтов не

прослеживается рост скоростей V_p при достижении влажности максимальной молекулярной влагоемкости $W_{\text{ММВ}}$. Возможно, здесь оказывает влияние тип структурных связей, количество и прочность контактов, различные для природных и модельных грунтов. Кроме того, лишь небольшое число образцов модельных грунтов имели влажность выше $W_{\text{ММВ}}$. Также могла повлиять неоднородность строения модельных грунтов, сформированных при большой влажности и низкой уплотняющей нагрузке.

К сожалению, не удалось провести измерения и расчет скоростей упругих волн для природных суглинков при влажности меньше 3%. Это связано с трудностями при подготовке «сухих» образцов с разной базой (высотой) для ультразвуковых исследований.

Нельзя полностью сопоставить графики связи скоростей продольных волн в природных и модельных грунтах со степенью влажности, поскольку в модельных образцах не удалось достичь $S_r > 0,8$. Это связано с особенностями их изготовления (отжатием воды во время уплотнения водонасыщенных образцов).

Однако можно считать, что данные по влиянию влажности и степени влажности на скоростные характеристики в целом не противоречат, а дополняют друг друга, расширяя диапазоны изменчивости влияющих факторов.

Применение методов статистической обработки данных для природных образцов не приемлемо, поскольку мало данных по измерениям на конкретном образце. Но, если объединить все полученные данные, то можно сделать общую оценку влияния влажности и степени влажности по всем образцам.

Данные статистических исследований подтверждают существенное влияние влажности на скорости упругих волн и отношение скоростей V_s/V_p . Для природных грунтов по результатам корреляционного анализа скорость продольных волн на 73% зависит от влажности, а отношение скоростей V_s/V_p на 76%.

Стоит отметить хорошую корреляцию между соотношением скоростей продольных и поперечных волн и весовой влажностью природных грунтов (рис. 3.25, а). Эта зависимость описывается линейным уравнением связи $V_s/V_p = 0,70 - 0,02W$, ($r = -0,87$, связь является тесной).

Для модельных грунтов по данным статистических исследований скорость продольных волн на 54% определяется влажностью, поперечных – на 82%, отношение скоростей – на 84%. Полученные значения для скоростей V_p несколько занижены, поскольку статистически рассматриваемые связи линейны, а в нашем случае (как видно из рис. 3.21) они далеки от линейных. Отношение скоростей и влажность модельных грунтов описываются уравнением $V_s/V_p = 0,64 - 0,03W$ ($r = -0,92$, связь весьма тесная) (рис. 3.25, б).

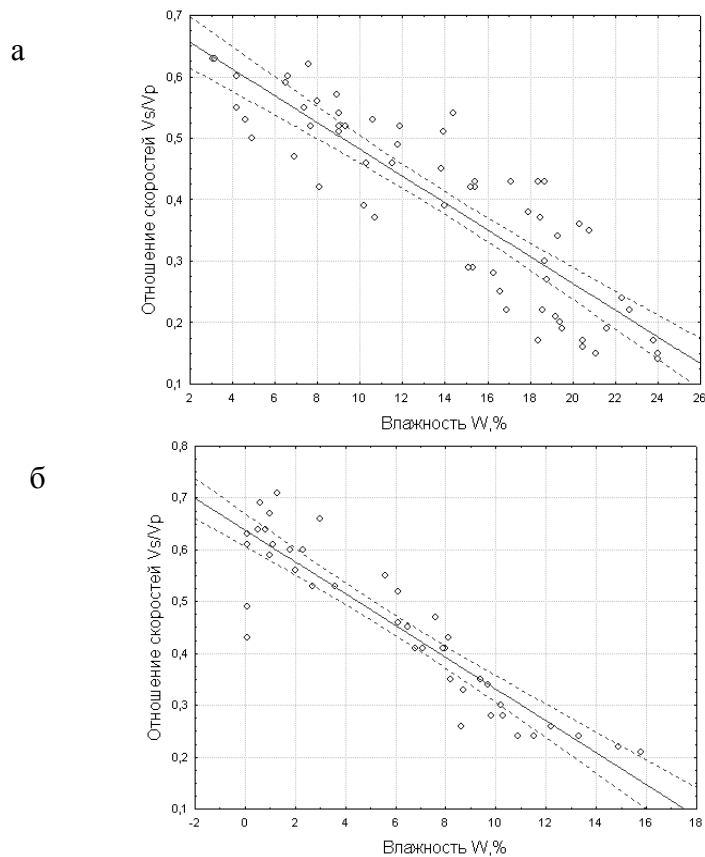


Рис. 3.25. Взаимосвязь отношения скоростей упругих волн и влажности для природных (а) модельных (б) грунтов

Уравнения связи отношения скоростей и влажности природных и модельных грунтов очень близки, что позволяет объединить массивы данных и получить общую для всех типов исследованных грунтов зависимость: $V_s/V_p = 0,72 - 0,02W$ ($r=0,85$, т.е. связь тесная).

Для всех исследованных грунтов (как природных, так и искусственно приготовленных) был построен график изменения отношения скоростей при изменении показателя консистенции (текучести) грунта (рис. 3.26).

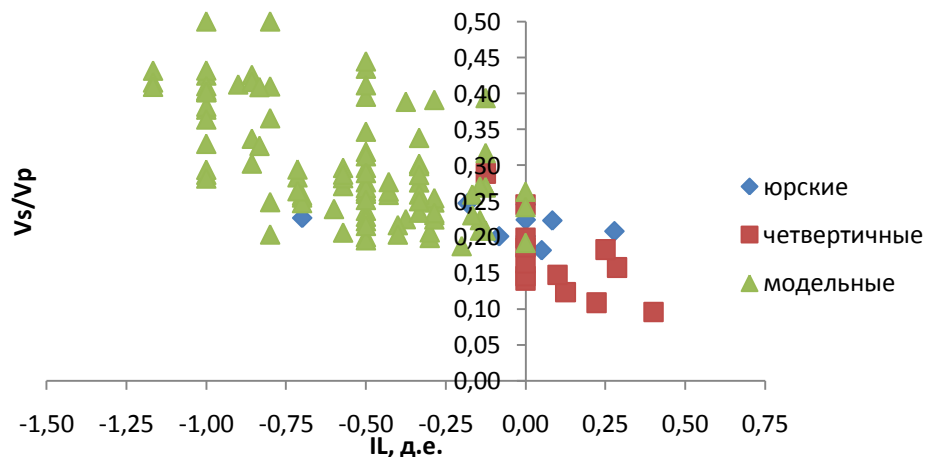


Рис. 3.26. Взаимосвязь отношения скоростей и показателей консистенции (текучести) всех исследуемых грунтов

Отмечается снижение отношения скоростей с увеличением показателя консистенции, причем в среднем для грунтов твердой консистенции ($I_L < 0$) $V_s/V_p > 0,2$, полутвердой ($0 < I_L < 0,25$) $0,1 < V_s/V_p < 0,2$, тугопластичной ($0,25 < I_L < 0,50$) $V_s/V_p < 0,1$. Отметим, что указанные диапазоны изменения отношения скоростей в зависимости от консистенции глин нуждаются в дальнейшем подтверждении. Исследование этой зависимости для большого количества образцов различных по консистенции выглядит перспективным, поскольку дает возможность ставить и решать обратную задачу: при интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки по отношению скоростей V_s/V_p судить о консистенции глинистых грунтов (однородного состава).

3.4. Влияние действующих напряжений

Исследования разных авторов сходятся во мнении, что «сейсмические свойства грунтов сильно зависят от напряжений в них» (Горайнов, 1992, с. 31), однако, в данной работе прикладываемые в ходе измерения нагрузки были невелики, поэтому для изучения этого фактора был поставлен специальный эксперимент.

Лабораторные ультразвуковые исследования проводились с использованием гири, которая ставилась на образец для улучшения контакта с датчиками. Вес гири составлял 1 кг, однако, для образцов мягкопластичной и тугопластичной консистенции груз не прикладывался, поскольку в противном случае образец деформировался.

В связи с этим встал вопрос об оценке степени влияния на скорости упругих волн такого фактора, как внешняя статическая нагрузка (и возникающего при этом напряжения в образце).

Для исследования этого фактора был поставлен следующий эксперимент: на один и тот же образец твердого суглинка ступенчато прикладывалась возрастающая нагрузка 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 4 кг (0,01-0,03 МПа), и для каждой ступени измерялись скорости продольных и поперечных волн. Подобные исследования были проведены для всех модельных грунтов, одного образца юрского возраста и одного четвертичного, полутвердой консистенции. По результатам измерений построены графики (рис. 3.27, 3.28).

По приведенным кривым (рис. 3.27) видно, что в исследованном диапазоне нагрузок скорости упругих волн для каждого образца в отдельности практически не меняются, отклонения от среднего значения находятся в пределах погрешности измерений. На рис. 3.28 приведены записи регистрируемых сигналов при нагрузках от 0,5 (крайние справа записи) до 4 (крайние слева записи) кг. По вертикальной оси – время в мкс. На записях при нагрузках 1 кг и выше сигналы более четкие, что позволяет точнее зафиксировать времена вступления волн.

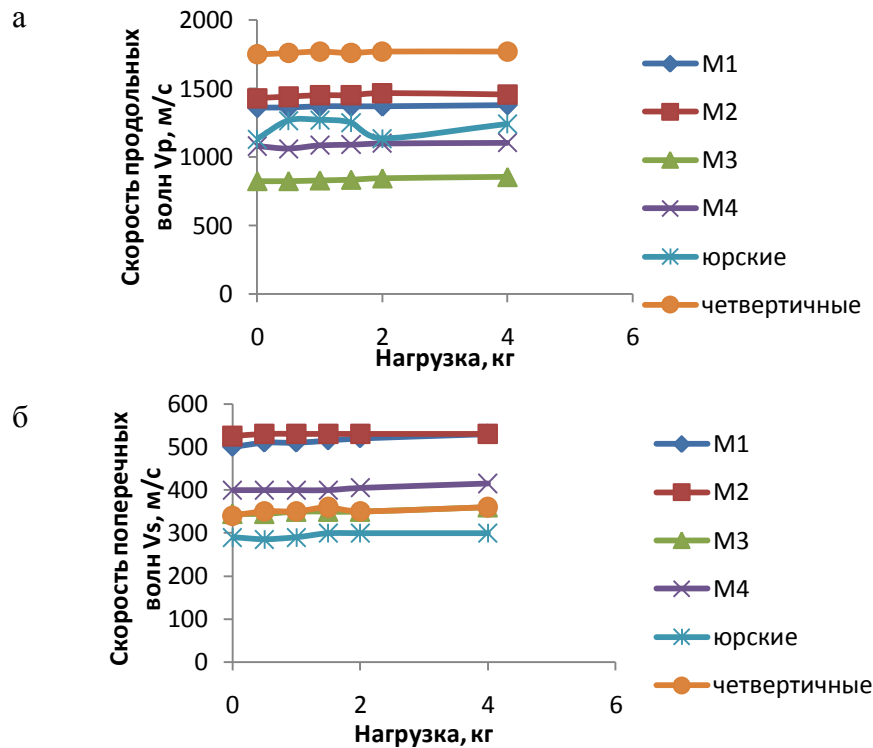


Рис. 3.27. Зависимости скоростей упругих волн от прикладываемой статической нагрузки

Следует отметить, что при изучении скоростей распространения упругих волн в массиве этот фактор нельзя не учитывать. Поскольку даже простейшие математические расчеты показывают, что напряжение в образце при весе гири 1кг оказывается равным 0,01 МПа, а в массиве на глубине около 25 м, при средней плотности грунта 2 г/см³ возникает напряжение 0,5 МПа, что более чем на порядок выше.

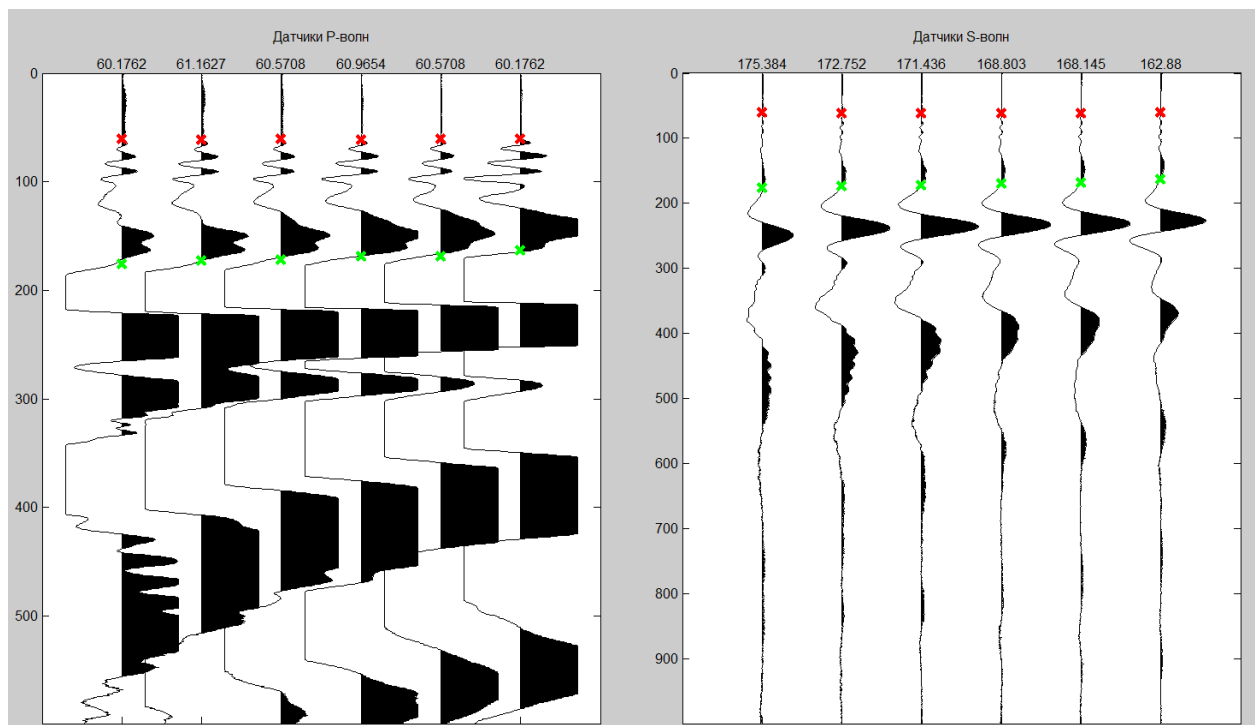


Рис. 3.28. Изменение интенсивности сигнала при разных нагрузках (пояснения в тексте)

3.5. Влияние прочности структурных связей

«Зависимость сейсмических свойств грунтов от характера структурных связей может быть получена благодаря достаточно тесной их связи с прочностными характеристиками, из которых наиболее часто используется предел прочности на сжатие R_c , представляющий собой величину напряжения, которое должно быть приложено к образцу для его разрушения в условиях одноосного сжатия» (Горайнов, 1992, с. 50).

Изучению взаимосвязи прочности на сжатие и скоростей продольных волн скальных грунтов посвящены работы многих авторов (Ляховицкий, 1964; Савич, Яценко, 1979; Шаумян, 1988 и др.), существуют даже специальные номограммы для определения R_c и многочисленные уравнения связи. В области дисперсных грунтов подобные исследования тоже проводились (Горайнов, 1992).

Для изучения взаимосвязи между R_c и скоростью упругих волн модельных глинистых грунтов были построены следующие графики (рис. 3.29).

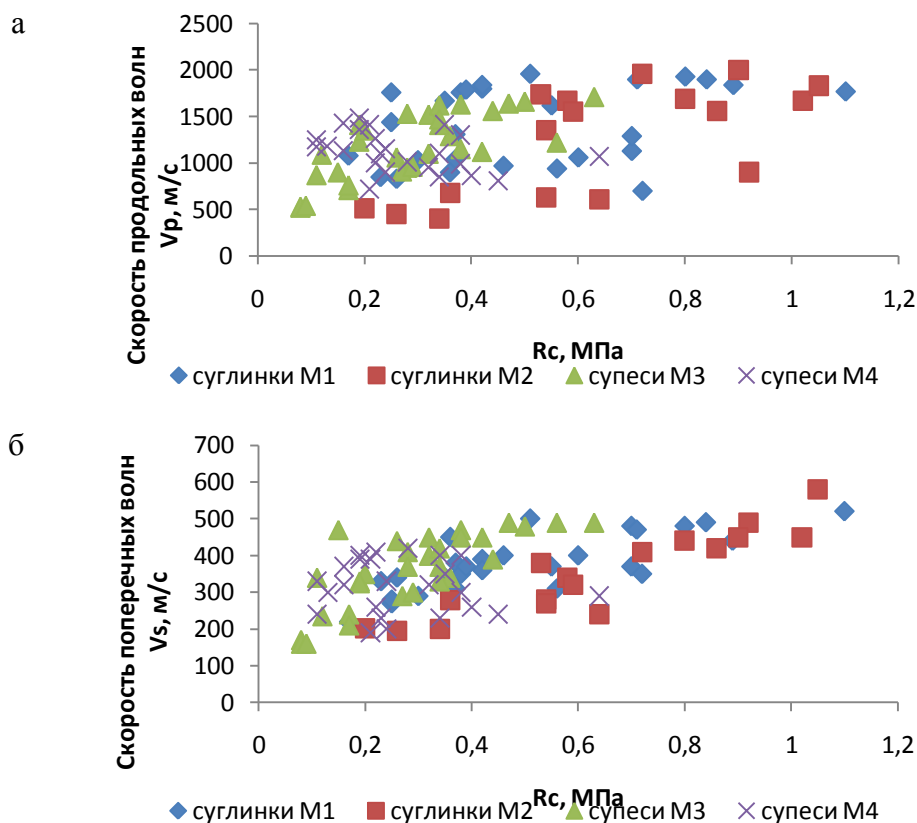


Рис. 3.29. Взаимосвязь скорости упругих волн и прочности на сжатие модельных глинистых грунтов

Однако, как в случае модельных, так и в случае природных грунтов, четкой зависимости $V_p=f(R_c)$ не наблюдается, а можно лишь говорить об общем увеличении скорости продольных волн по мере роста прочности образцов глинистых грунтов на одноосное сжатие. В работе Н.Н.Горайнова (1992) приведено уравнение связи продольных волн V_p и прочности на сжатие

R_c глинистых грунтов, однако, в нашем случае тесную связь выявить не удалось. Отметим, что для природных четвертичных грунтов зависимость $V_p(R_c)$ представляется больше как облако точек, без явных трендов.

Скорости поперечных волн в целом лучше коррелируются с R_c , особенно если рассматривать модели в отдельности (рис. 3.29, б). Например, связь между V_s и R_c для для суглинков М1 ($V_s=44R_c+61$) относится к тесной, другие модельные грунты в отдельности и общая совокупность образцов описываются слабыми связями.

В целом, по результатам наших исследований, влияние прочности структурных связей (выраженное через сопротивление грунта одноосному сжатию) 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.

3.6. Сравнительный анализ факторов, влияющих на скорости распространения упругих волн в образцах глинистых грунтов

Из анализа изложенного выше материала становится понятно, что скорости упругих волн зависят от многих факторов, причем степень зависимости от какого-либо фактора переменна для образцов различного генезиса, дисперсности, состояния.

Чтобы лучше понять изменчивость степени влияния признаков была проведена **парная корреляция** всех наиболее информативных признаков состава, строения, состояния и свойств со скоростями упругих волн и отношением скоростей (табл. 3.14 и 3.15).

Для всех *модельных грунтов* отмечается хорошая корреляция степени влажности со скоростями продольных волн V_p и отношением скоростей V_s/V_p , причем для отношения скоростей эти связи для всех моделей тесные и весьма тесные ($0,79 < r < 0,91$). Связь степени влажности и скорости продольных волн меняется от весьма тесной в суглинках М1 до слабой в супесях М4.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что степень влажности достаточно сильно связана со скоростью продольных волн и особенно с отношением скоростей. Связь S_r со скоростью поперечных волн не является статистически сильной, но скорее всего это следствие нелинейности связи этого вида.

Влажность грунтов для всех моделей кроме М1 достаточно сильно связана с отношением скоростей. При этом коэффициент корреляции соответствует тесной связи.

Плотность и плотность скелета тесно связаны со скоростями V_p модельных суглинков (М1 и М2), в супесях (М3 и М4) связи слабеют. По-видимому, уравнение и степень связи

Таблица 3.14. Парные коэффициенты корреляции (r) показателей свойств модельных грунтов

| Показатели свойств | суглинки М1 | | | суглинки М2 | | | супеси М3 | | | супеси М4 | | | М1, М2, М3, М4 | | |
|--|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|----------------|-------------|-----------|
| | $V_{p,м/с}$ | $V_{s,м/с}$ | V_s/V_p | $V_{p,м/с}$ | $V_{s,м/с}$ | V_s/V_p | $V_{p,м/с}$ | $V_{s,м/с}$ | V_s/V_p | $V_{p,м/с}$ | $V_{s,м/с}$ | V_s/V_p | $V_{p,м/с}$ | $V_{s,м/с}$ | V_s/V_p |
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,91 | 0,78 | -0,64 | 0,86 | 0,20 | -0,76 | 0,53 | -0,15 | -0,57 | 0,45 | -0,09 | -0,67 | 0,58 | 0,18 | -0,61 |
| Плотность скелета ρ_d , г/см ³ | 0,89 | 0,82 | -0,58 | 0,82 | 0,44 | -0,54 | 0,47 | 0,09 | -0,33 | 0,44 | 0,01 | -0,53 | 0,49 | 0,27 | -0,44 |
| Пористость n , % | -0,89 | -0,81 | 0,57 | -0,82 | -0,46 | 0,51 | -0,46 | -0,09 | 0,31 | -0,47 | -0,04 | 0,52 | -0,47 | -0,26 | 0,43 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,88 | -0,81 | 0,57 | -0,81 | -0,41 | 0,54 | -0,47 | -0,08 | 0,33 | -0,45 | -0,02 | 0,55 | -0,48 | -0,26 | 0,44 |
| Влажность W , % | 0,16 | -0,18 | -0,45 | 0,35 | -0,59 | -0,80 | 0,40 | -0,62 | -0,85 | 0,3 | -0,39 | -0,87 | 0,36 | -0,31 | -0,65 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | 0,31 | 0,05 | -0,47 | 0,43 | -0,52 | -0,82 | 0,39 | -0,61 | -0,84 | 0,33 | -0,38 | -0,87 | 0,4 | -0,28 | -0,7 |
| Степень влажности, S_r , д.е. | 0,92 | 0,64 | -0,79 | 0,76 | -0,16 | -0,91 | 0,54 | -0,42 | -0,80 | 0,46 | -0,22 | -0,82 | 0,61 | -0,06 | -0,8 |
| Прочность на сжатие R_c , МПа | 0,53 | 0,84 | -0,14 | 0,43 | 0,76 | 0,12 | 0,27 | 0,68 | 0,41 | 0,74 | 0,78 | 0,01 | 0,47 | 0,66 | 0,09 |

Примечание: корреляционные связи: 1-0,9 – весьма тесные; 0,9-0,7 – тесные; 0,7-0,5 – слабые.

Таблица 3.15. Парные коэффициенты корреляции (r) показателей свойств природных грунтов

| Показатели свойств | Четвертичные суглинки и супеси | | | Юрские суглинки и глины | | |
|--|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| | V _p , м/с | V _s , м/с | V _s /V _p | V _p , м/с | V _s , м/с | V _s /V _p |
| Плотность ρ, г/см ³ | 0,57 | -0,10 | -0,56 | 0,48 | 0,19 | -0,70 |
| Плотность частиц ρ _s , г/см ³ | -0,31 | 0,40 | 0,42 | 0,16 | -0,06 | -0,40 |
| Плотность скелета ρ _d , г/см ³ | 0,55 | -0,15 | -0,58 | 0,71 | 0,63 | -0,60 |
| Влажность W, % | -0,12 | 0,17 | 0,18 | -0,20 | -0,43 | -0,15 |
| Нижний предел пластичности W _L , % | -0,05 | 0,48 | 0,43 | 0,39 | 0,31 | -0,20 |
| Верхний предел пластичности W _p , % | -0,47 | 0,58 | 0,69 | 0,06 | -0,12 | -0,20 |
| Число пластичности I _p | 0,11 | 0,22 | 0,08 | 0,35 | 0,36 | -0,20 |
| Показатель текучести I _L | 0,34 | -0,56 | -0,65 | 0,03 | -0,07 | -0,20 |
| Пористость n, % | -0,68 | 0,35 | 0,67 | -0,36 | -0,53 | 0,05 |
| Коэффициент пористости e, ед. | -0,70 | 0,39 | 0,72 | -0,35 | -0,49 | 0,07 |
| Степень влажности S _r , д.е. | 0,48 | -0,21 | -0,54 | 0,06 | -0,18 | -0,40 |
| Прочность на сжатие R _c , МПа | -0,15 | 0,45 | 0,32 | - | - | - |

Примечание: корреляционные связи: 0,9-0,7 – тесные; 0,7-0,5 – слабые.

зависят от дисперсности грунта, хотя, общее повышение скоростей с ростом плотности прослеживается. Отношение скоростей тоже характеризуется связью с плотностью грунта, степень связи меняется от слабой до тесной. В целом коэффициенты корреляции по плотности образцов выше, чем по плотности скелета, что подтверждает влияние жидкого компонента на распространение продольных волн. Значения коэффициентов корреляции для пористости и коэффициента пористости меняются соответственно изменению плотности, но зависимости обратные (со знаком «-»).

Прочность на сжатие грунта тесно связана со скоростями поперечных волн каждой модели в отдельности, а общий коэффициент корреляции меньше, из чего следует что угловые коэффициенты уравнений связи $V_s(R_c)$ разные для четырех модельных грунтов и зависят от дисперсности. Взаимосвязи свойств *природных грунтов* отличаются от модельных, что не удивительно, учитывая различия условий и длительность формирования связей между компонентами грунтов. У четвертичных суглинков и супесей наиболее сильные обратные связи скоростей продольных волн и отношения скоростей наблюдаются с пористостью и коэффициентом пористости, коэффициент корреляции $r=0,70$, что характеризует связь как тесную. Слабая связь прослеживается с плотностью и плотностью скелета.

Слабой связью характеризуется скорость V_s и отношение скоростей с верхним пределом пластичности (который в основном определяется дисперсностью) и консистенцией грунта.

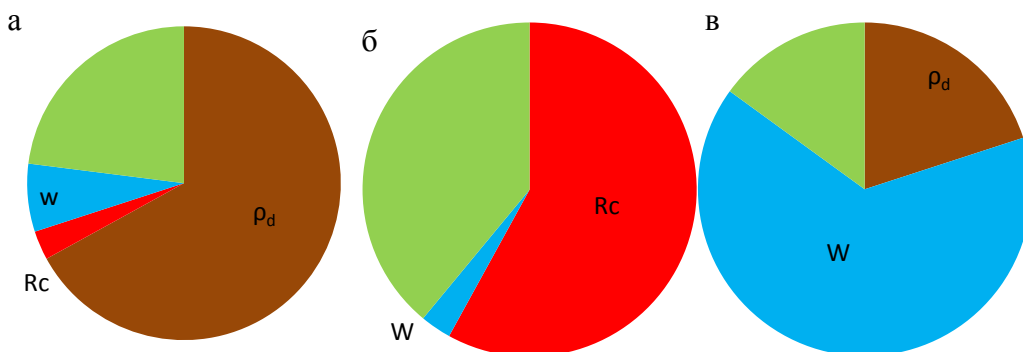
Образцов юрских грунтов было немного, поэтому анализ парных корреляций дал мало результатов. Тем не менее, как и в случае четвертичных грунтов, наблюдается связь скоростей V_p с плотностью скелета грунта, и отношения скоростей с плотностью (связи тесные). Скорости поперечных волн характеризуются слабой связью с плотностью скелета и пористостью грунтов (см. табл. 3.15).

Парные корреляции позволили выявить наличие парных линейных связей между изучаемыми параметрами. Однако скорости упругих волн и отношение скоростей зависят одновременно от нескольких параметров, поэтому для изучения их совместного влияния был проведен **пошаговый регрессионный анализ** (см. раздел 2.2).

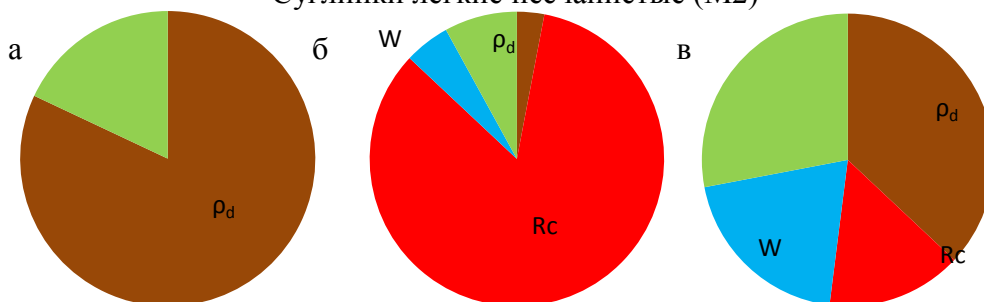
Для *модельных грунтов* были составлены круговые диаграммы, на которых показан вклад (в процентах) отдельных факторов, влияющих на скорости упругих волн и отношение скоростей (рис. 3.30). Для анализа выбраны только три основных изучаемых фактора: плотность скелета, влажность и прочность на одноосное сжатие, как характеристики, полученные при непосредственных измерениях. Остальные исследуемые параметры грунтов (степень влажности, пористость, коэффициент пористости) вычисляются математически.

Выбор плотности скелета грунта, вместо его плотности, обусловлен необходимостью исключения подсчета двойного влияния влажности (как «составляющей» плотности грунта).

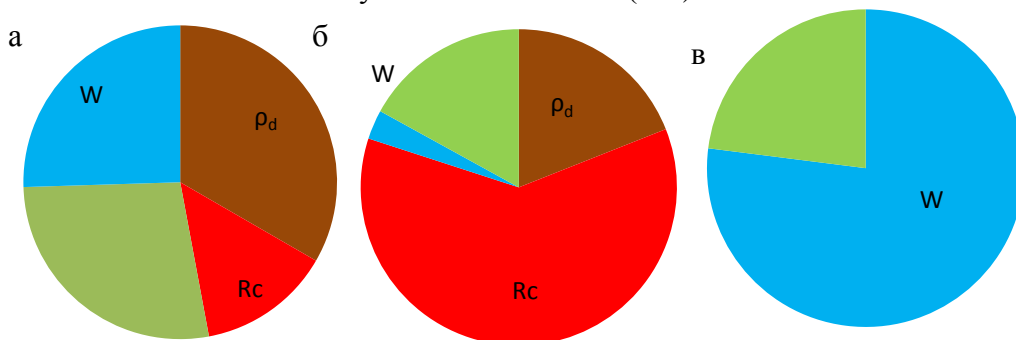
Суглинки тяжелые пылеватые (M1)



Суглинки легкие песчаные (M2)



Супеси песчаные (M3)



Супеси песчаные (M4)

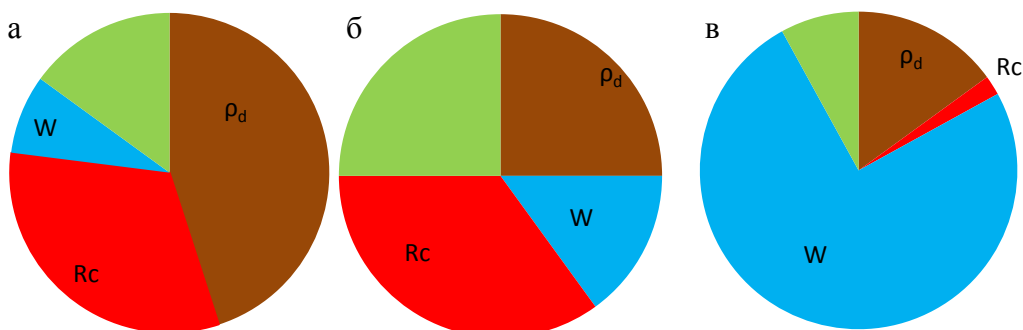


Рис. 3.30. Диаграммы компонентов, определяющих: а - скорость продольных волн; б - скорость поперечных волн; в - отношение скоростей в модельных глинистых грунтах (на диаграммах зеленым цветом показано влияние неучтенных факторов)

По полученным данным видно, что наиболее статистически значимым фактором в формировании скоростей продольных волн является плотность скелета грунта. Эта взаимосвязь вполне ожидаема, поскольку именно этот параметр учитывает тип контактов в грунте, объем его пор и пустот, а все эти факторы напрямую влияют на распространение упругих волн. Относительно невысокое влияние влажности на скорости распространения продольных волн можно объяснить небольшим диапазоном ее изменения в рассматриваемых моделях (в среднем 7-8%), причем все значения влажности находятся в интервале от максимальной гигроскопической до максимальной молекулярной влагоемкости, а как показано выше, именно в этом интервале влажность оказывает сравнительно небольшое влияние на V_p .

Основным фактором, обуславливающим скорость распространения поперечных волн является прочность структурных связей (R_c). Ее влияние меняется от 29 до 84 %, причем в суглинках это значение выше, чем в супесях. По-видимому, это связано с количеством самих контактов, которое увеличивается с ростом дисперсности.

На характер распространения скоростей V_s также влияют и показатели плотности скелета грунта. Влияние влажности в целом меньше, но может быть значимо в супесях, грунтах с невысокой дисперсностью и большим содержанием несвязанной воды (а поперечные волны в воде не распространяются).

Отношение скоростей преимущественно зависит от плотности скелета и влажности грунтов, а в меньшей степени от прочности структурных связей.

Такие показатели как верхний и нижний пределы пластичности, число пластичности, консистенция грунта, средний диаметр частиц, содержание частиц (мм) $<0,001$, $<0,005$, $<0,01$, влажности гигроскопическая, максимальной молекулярной влагоемкости не учитывались в расчетах, поскольку в пределах одной модели остаются постоянными.

Несколько отличаются результаты пошагового регрессионного анализа для *природных грунтов*. По результатам исследований скорости упругих волн и отношение скоростей в четвертичных грунтах в большей степени зависят от плотности скелета и содержания физической глины ($M_c < 0,01$ мм) (рис. 3.31). Статистически значима для скоростей упругих волн и роль прочности структурных связей, которая определяет их в среднем на 15%.

Таким образом, влияющие факторы те же, что для модельных грунтов, кроме показателя содержания физической глины $M_c < 0,01$ мм, который не имеет смысла оценивать для искусственных грунтов, поскольку он постоянен в пределах модели.

Для образцов юрского возраста данные немногочисленны и закон распределения исследуемых величин не всегда близок к нормальному, а вероятность ошибки вычислений

более 5% (в зависимости от исследуемого параметра достигает 20%). По результатам регрессионного анализа в наибольшей степени скорость продольных волн и отношение скоростей определяются плотностью, а поперечных - плотностью и глинистостью, что в целом согласуется с закономерностями, выявленными для четвертичных моренных грунтов. К сожалению, из-за с технических трудностей при вырезании образцов для одноосного сжатия, практически отсутствуют данные для оценки влияния прочности структурных связей на скорости упругих волн юрских глинистых грунтов.

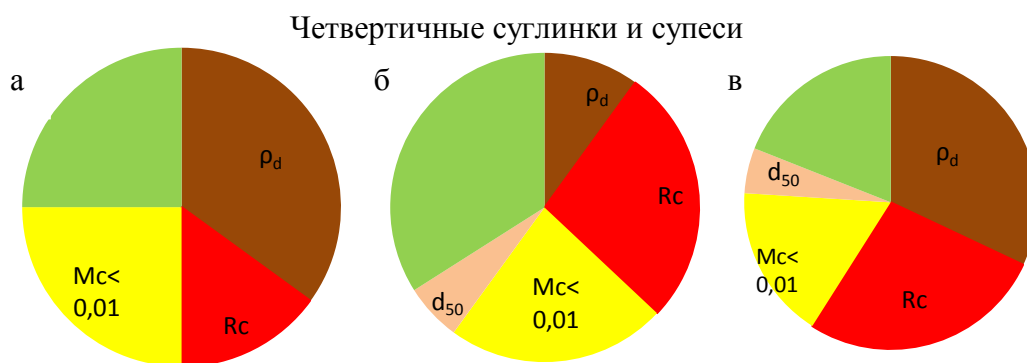


Рис. 3.31. Диаграммы компонентов, определяющих: а - скорость продольных волн; б - скорость поперечных волн; в - отношение скоростей в природных глинистых грунтах (на диаграммах зеленым цветом показано влияние неучтенных факторов)

На последнем этапе исследований был проведен **факторный анализ**. Для модельных грунтов этот анализ не проводился, поскольку выделять группы внутри каждой модели нецелесообразно.

Результаты факторного анализа для всех четвертичных моренных грунтов приведены в табл. 3.16 и на рис. 3.32. Результаты факторного анализа показали, что на первые два фактора приходится 62% вклада в общую дисперсию (табл. 3.16).

Максимальные нагрузки на первую факторную ось оказывают факторы, связанные с составом и дисперсностью (W_p , I_L , $W_{мmb}$, $W_{мг}$, d_{50}), пористость, скорости продольных волн и отношение скоростей. На вторую факторную ось значительные нагрузки оказывают плотность и плотность скелета образцов.

На рис. 3.32 отчетливо выделяется облако точек (очерчено окружностью), в которое попадает большинство исследуемых образцов. Все образцы из этой области относятся к суглинкам от твердой до тугопластичной консистенции.

Однако не все образцы попадают в это облако, например, выделяются образцы Щ.с-123(14,2) и Щ.с-123(13,6), которые хоть и являются твердыми суглинками, но заметно

отличаются по своим свойствам. Для них характерны максимальные значения пористости и коэффициента пористости, наиболее низкие плотности и скорости продольных волн.

Таблица 3.16. Факторная модель связи переменных для четвертичных грунтов

| Переменные | Фактор 1 | Фактор 2 |
|---|----------|----------|
| Влажность W , % | -0,00 | 0,19 |
| Нижний предел пластичности W_p , % | -0,89 | -0,14 |
| Показатель текучести I_L , ед. | 0,80 | 0,21 |
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,35 | -0,79 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,30 | -0,79 |
| Пористость n , % | -0,70 | 0,55 |
| Степень влажности S_r , д.е. | 0,52 | -0,46 |
| Гигроскопическая влажность W_r , % | -0,52 | 0,15 |
| Влажность макс. молек. влагоемкости $W_{мвв}$, % | -0,75 | -0,31 |
| Макс. гигроскопическая влажность $W_{мг}$, % | -0,94 | -0,26 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,60 | -0,58 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | -0,63 | 0,63 |
| Прочность на сжатие R_c , МПа | -0,51 | -0,32 |
| Средний диаметр частиц d_{50} , % | 0,82 | 0,25 |
| $M_{с<0,001}$ мм, % | -0,61 | -0,41 |
| $M_{с<0,005}$ мм, % | -0,65 | -0,37 |
| $M_{с<0,01}$ мм, % | -0,65 | -0,50 |
| Общая дисперсия | 7,03 | 3,50 |
| Доля общей | 0,41 | 0,21 |

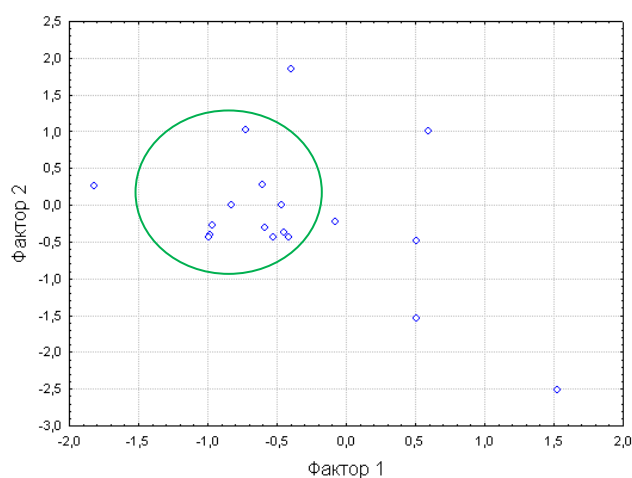


Рис. 3.32. Результаты факторного анализа четвертичных суглинков и супесей

Еще одна группа образцов Щ.с-123(18,0), Щ.с-120(18,0) – это супеси пластичные, также отличающиеся по своим свойствам и дисперсности. Образец Щ.с-123(14,0) характеризуется максимальным значением плотности и скорости продольных волн.

Отметим общие тенденции: слева – направо (см. рис. 3.32) образцы меняются от суглинков твердой и полутвердой, затем тугопластичной консистенции к супесям пластичной консистенции; сверху – вниз наблюдается увеличение плотности от 2,02 до 2,21 г/см³.

Факторный анализ юрских суглинков и глин показал, что на первые два фактора приходится 77% дисперсии. Максимальные нагрузки на первый фактор оказывают плотность, степень влажности, отношение скоростей, на второй – содержание частиц <0,01 мм, средний диаметр частиц и плотность скелета грунта (табл. 3.17).

Таблица 3.17. Факторная модель связи переменных для юрских грунтов

| Переменные | Фактор 1 | Фактор 2 |
|---|----------|----------|
| Плотность ρ , г/см ³ | -0,87 | -0,33 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | -0,63 | -0,76 |
| Пористость n , % | 0,50 | 0,47 |
| Степень влажности S_r , % | -0,80 | 0,25 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | -0,55 | -0,58 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,74 | 0,28 |
| Средний диаметр частиц d_{50} , % | 0,64 | -0,71 |
| $M_{s<0,005}$ мм, % | -0,64 | 0,66 |
| $M_{s<0,01}$ мм, % | -0,59 | 0,75 |
| Общая дисперсия | 4,06 | 2,87 |
| Доля общей | 0,45 | 0,32 |

На графике (рис. 3.33) не выделяется каких-либо областей, точки распределены «относительно равномерно». Выделяется верхней точкой образец А.с-23(25,2), характеризующийся минимальными значениями плотности скелета и скоростей продольных волн. Образцы глин (с-9(19,5), А.с-23(27,6), А.с(24,7)) сгруппировались в нижней части графика, отдельно от суглинков (см. рис. 3.33).

К общим тенденциям можно отнести снижение плотности и увеличение пористости слева – направо.

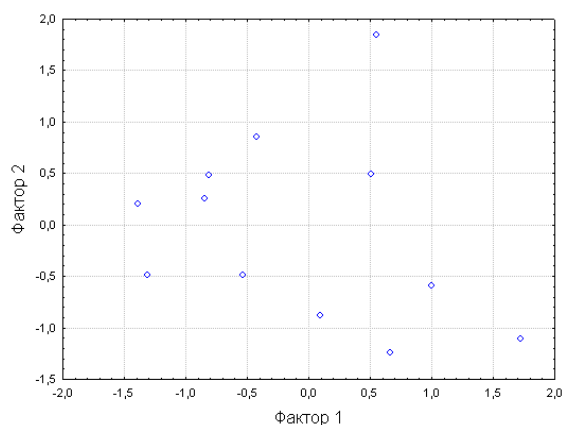


Рис. 3.33. Результаты факторного анализа для юрских суглинков и глин

Выводы по главе

1. Скорости распространения упругих волн в глинистых грунтах зависят от комплекса факторов состава, строения, состояния и свойств глинистых грунтов.

2. 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.

3. В линейных взаимосвязях $V_p(\rho)$ наблюдается увеличение угла наклона прямых с ростом дисперсности, что отражает рост количества контактов и прочности контактных взаимодействий по мере сближения высокодисперсных частиц. При значениях плотности более $1,8 \text{ г/см}^3$ происходит увеличение скоростей продольных волн с ростом дисперсности при одном значении плотности.

4. При близких значениях пористости, плотности и влажности скорости продольных и поперечных волн снижаются с уменьшением дисперсности, что, по-видимому, связано с уменьшением числа контактов и прочности связей между структурными элементами.

5. Исследования в широком диапазоне влажности показали, что изменение скоростей продольных волн с ростом влажности природных грунтов имеет сложный характер: они 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. В самом начале гидратации упругие свойства глинистого грунта определяются жесткостью его скелета, прочностью точечных и цементационных контактов. С ростом толщины гидратных пленок вокруг частиц жесткость скелета снижается. При полном заполнении пор водой упругие свойства грунта определяются уже упругостью самой воды.

6. Скорости поперечных волн и отношение скоростей убывают с ростом влажности и степени влажности, причем для модельных и природных грунтов соответствующие уравнения связи близки.

7. Отношение скоростей снижается с увеличением показателя текучести, причем в среднем для грунтов твердой консистенции ($I_L < 0$) $V_s/V_p > 0,2$, полутвердой ($0 < I_L < 0,25$) $0,1 < V_s/V_p < 0,2$, тугопластичной ($0,25 < I_L < 0,50$) $V_s/V_p < 0,1$.

8. Влияние напряжения на скорости упругих волн в образцах глинистых грунтов в исследуемом диапазоне нагрузок (0-0,04 МПа) незначительно.

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

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

4.1. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным компрессионных испытаний

Компрессионные испытания грунтов в настоящее время остаются наиболее популярными в инженерной геологии лабораторными методами изучения деформационных свойств дисперсных грунтов. Поэтому для получения надежных показателей деформационных свойств четвертичных и юрских глинистых грунтов были проведены компрессионные испытания. Их результаты обсуждаются ниже.

Для четвертичных грунтов модули компрессионной деформации на ступени нагрузки 0,1-0,3 МПа менялись от 6 до 38 МПа, а на ступени нагрузки 0,3-0,5 МПа от 11 до 24 МПа. Проведенные исследования показали, что большинство четвертичных суглинков и супесей относятся к повышенно сжимаемым, меньшее количество к среднесжимаемым, три образца (Щ.с-120(15,0; 14,7), Щ.с-123(14,7)) относятся к слабосжимаемым (табл. 4.1, приложение 13). Для слабосжимаемых образцов на графиках «относительная деформация – нагрузка» прослеживается проявление структурной прочности грунтов (рис. 4.1). Именно с этим связаны большие значения компрессионных модулей деформации на ступени 0,1-0,3 МПа по сравнению со ступенью 0,3-0,5 МПа. Среднее значение структурной прочности составляет 0,1 МПа.

На участке $P_{пр}-P_{пл}$ (см. раздел 2.2) модули компрессионной деформации меняются от 6 до 24 МПа, максимальные значения принадлежат тем же образцам (см. выше). Модули общей деформации на этом участке меняются от 2 до 9 МПа.

Модули компрессионной деформации на участке $P_{быт-1}, 5P_{быт}$ (см. раздел 2.2) менялись от 11 до 19 МПа, а модули общей деформации от 4 до 7 МПа.

Глины оксфордского яруса являются более древними отложениями морского генезиса, имеющими ориентированную микротекстуру, поэтому они имеют иной характер поведения под нагрузкой. Природные юрские суглинки и глины характеризуются модулями компрессионной деформации от 8 до 45 МПа на ступени 0,1-0,3 МПа (табл. 4.1, приложение 13) и от 9 до 42 МПа на ступени нагружения 0,3-0,5 МПа. Проявление структурной прочности характерно для большинства образцов юрского возраста (рис. 4.2). С этим связаны большие значения модулей деформации на ступени 0,1-0,3 МПа по сравнению с 0,3-0,5 МПа. Сжимаемость исследованных юрских грунтов меняется от средней до практически

несжимаемых для грунтов с проявлением структурной прочности (обр. А.с-23(27,0), А.с-23(25,2), А.с-23(26,0), А.с-23(24,7)). Среднее значение $R_{стр}$ составляет 0,3 МПа. Наличие структурной прочности связано с присутствием цементационных контактов, которые в первую очередь воспринимают напряжение и сопротивляются разрушению структуры.

Таблица 4.1. Обобщенные результаты компрессионных испытаний

| Название образцов | Модули деформации, МПа | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| | степень нагружения 0,1-0,3 МПа | | степень нагружения 0,3-0,5 МПа | | Участок $R_{пр}-R_{пп}$, МПа | | Участок $R_{быт}-1,5R_{быт}$, МПа | |
| | E_k | E_o | E_k | E_o | E_k | E_o | E_k | E_o |
| Суглинки (gQ_{1dns}) $-0,56 < I_L < 0,63$ | 6-38 | 2-14 | 11-24 | 4-9 | 6-24 | 2-9 | 11-19 | 4-7 |
| Суглинки и глины ($J_{3ох}$) $-0,70 < I_L < 0,28$ | 8-45 | 3-16 | 9-42 | 3-15 | 9-36 | 4-13 | 9-36 | 3-13 |

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

Некоторые образцы ($J_{3ох}$) вместо деформации сжатия на низких ступенях нагрузки проявляли способность к набуханию (последнее может быть связано с «разгрузкой» напряжений после извлечения части грунта в кольце из монолита, а также с поглощением влаги из влажных фильтров в одомере).

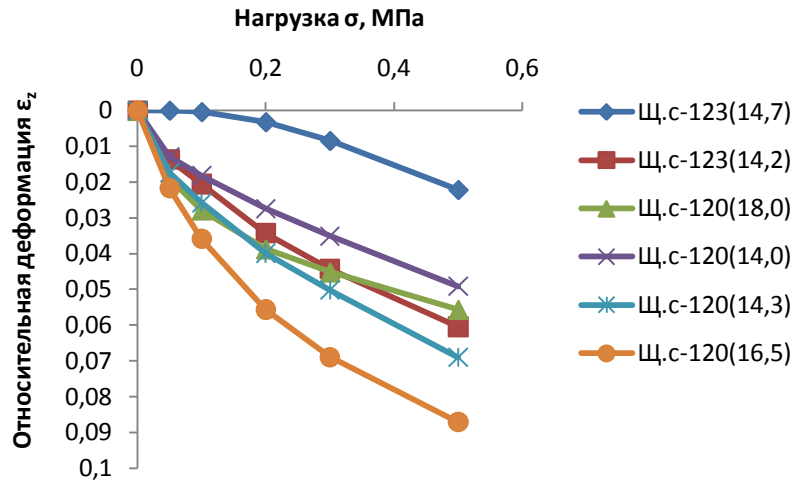
Как и в случае четвертичных грунтов, для оксфордских суглинков и глин проводился расчет модулей деформации на участке от природного давления до давления предела пропорциональности. В данном случае это особенно оправдано, поскольку исследуемые образцы обладают структурной прочностью и практически не сжимаются на низких ступенях нагрузки. Модули компрессионной деформации на исследуемом участке меняются от 9 до 36 МПа, модули общей деформации от 4 до 13 МПа.

Для образцов юрских глинистых грунтов на участке $R_{быт}-1,5R_{быт}$ компрессионный модуль деформации менялся от 9 до 36 МПа, а E_o от 3 до 13 МПа, что соответствует выше приведенным данным.

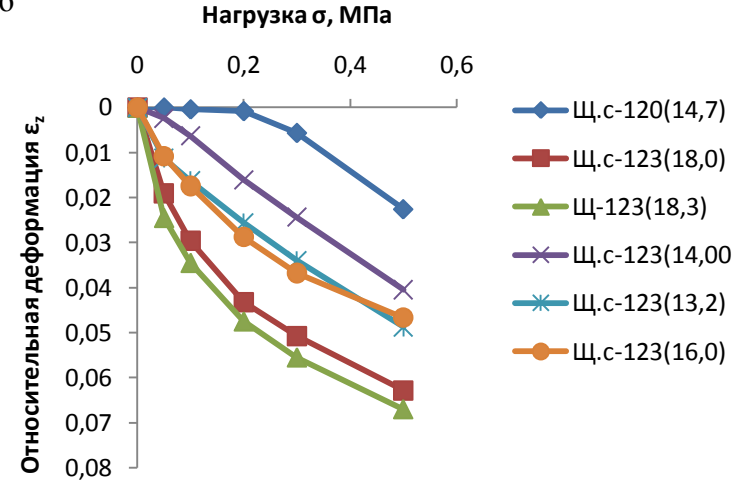
В целом значения модулей деформации литифицированных юрских глинистых грунтов выше, чем четвертичных, обладающих более слабыми связями и более низкими значениями структурной прочности.

Для выявления действующих связей была построена матрица парных корреляций модулей деформации и характеристик состава, состояния и свойств грунтов (табл. 4.2). В таблице приведены данные по модулям деформации, полученные только для участка $R_{пр}-R_{пп}$, поскольку коэффициенты корреляции для других участков, как и следовало ожидать, ниже.

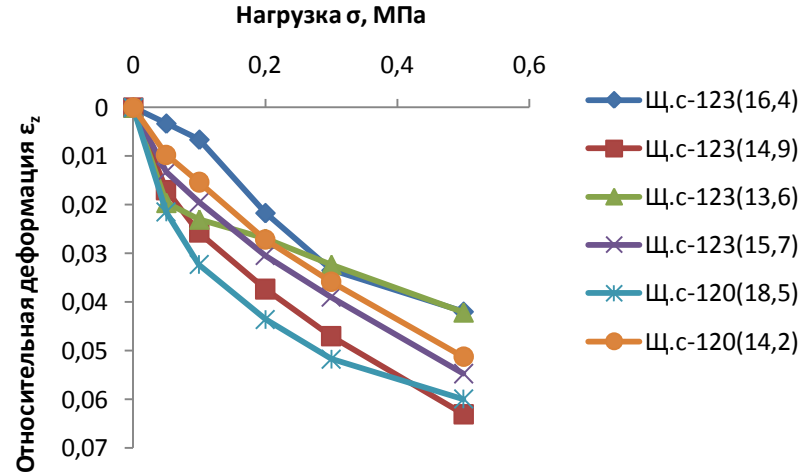
а



б



в



г

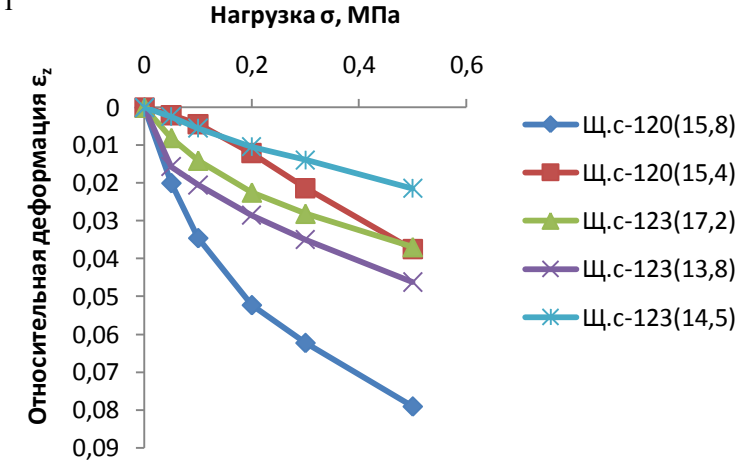


Рис. 4.1. Компрессионные кривые испытаний четвертичных грунтов $gQ_{I}dn_s$

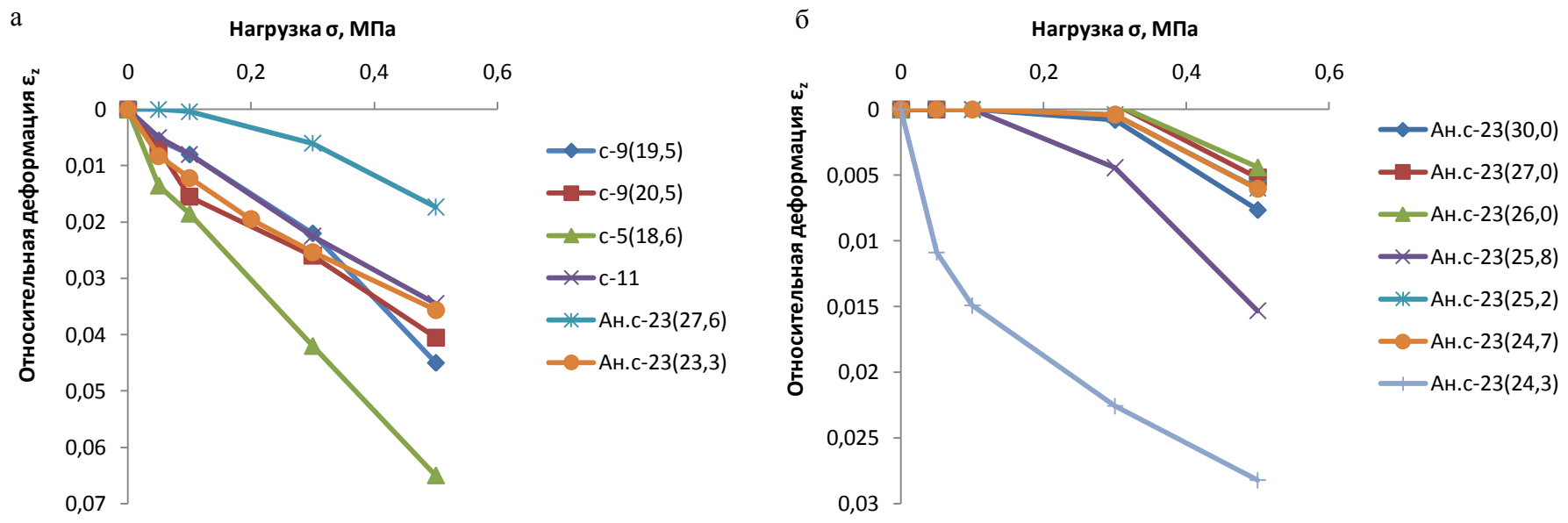


Рис. 4.2. Компрессионные кривые испытаний юрских грунтов J_{30x}

Таблица 4.2. Парные коэффициенты корреляции модулей деформации и показателей состава, состояния и свойств грунтов

| Показатели состава, состояния и свойств | Четвертичные моренные суглинки и супеси Q ₁ dns | | Четвертичные моренные суглинки Q ₁ dns | | Юрские оксфордские суглинки и глины J ₃ ox | | Юрские оксфордские суглинки J ₃ ox | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | E _к на участке P _{пр} -P _{пп} | E ₀ на участке P _{пр} -P _{пп} | E _к на участке P _{пр} -P _{пп} | E ₀ на участке P _{пр} -P _{пп} | E _к на участке P _{пр} -P _{пп} | E ₀ на участке P _{пр} -P _{пп} | E _к на участке P _{пр} -P _{пп} | E ₀ на участке P _{пр} -P _{пп} |
| Влажность W, % | -0,14 | -0,14 | -0,25 | -0,25 | 0,25 | 0,32 | -0,05 | -0,03 |
| Нижний предел пластичности W _p , % | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,36 | 0,32 | 0,18 | 0,17 |
| Верхний предел пластичности W _L , % | 0,21 | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,04 | -0,02 | -0,10 | -0,08 |
| Число пластичности I _p | 0,06 | 0,07 | 0,03 | 0,04 | -0,07 | -0,11 | 0,02 | 0,08 |
| Показатель текучести I _L , ед. | -0,58 | -0,59 | -0,59 | -0,59 | -0,12 | -0,03 | 0,08 | 0,12 |
| Плотность ρ, г/см ³ | 0,15 | 0,14 | 0,23 | 0,23 | 0,37 | 0,39 | 0,33 | 0,35 |
| Плотность твердого компонента грунта ρ _s , г/см ³ | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 0,39 | -0,07 | -0,10 | -0,43 | -0,45 |
| Плотность скелета грунта ρ _d , г/см ³ | 0,20 | 0,19 | 0,32 | 0,31 | 0,32 | 0,24 | 0,36 | 0,37 |
| Пористость n, % | 0,14 | 0,15 | 0,06 | 0,08 | -0,20 | -0,18 | -0,47 | -0,49 |
| Коэффициент пористости e, ед. | 0,12 | 0,13 | 0,05 | 0,06 | -0,24 | -0,22 | -0,47 | -0,49 |
| Степень влажности S _r , д.е. | -0,15 | -0,16 | -0,14 | -0,15 | 0,27 | 0,39 | 0,46 | 0,48 |
| Скорость продольных волн V _p , м/с | -0,07 | -0,07 | -0,02 | -0,03 | 0,31 | 0,23 | 0,34 | 0,36 |
| Скорость поперечных волн V _s , м/с | 0,62 | 0,71 | 0,66 | 0,72 | 0,22 | 0,10 | 0,16 | 0,10 |
| Отношение скоростей V _s /V _p | 0,42 | 0,43 | 0,40 | 0,42 | -0,22 | -0,22 | 0,25 | 0,18 |
| Прочность структурных связей R _c , МПа | 0,50 | 0,51 | 0,55 | 0,56 | - | - | - | - |

В дальнейшем будем использовать значения модулей компрессионной и общей деформации, определенные именно на этом участке – от природного давления до давления, соответствующего пределу пропорциональности на графике «деформация-нагрузка».

Тесных и весьма тесных связей получено не было, все парные коэффициенты корреляции $r < 0,67$. Однако можно говорить о снижении значений модулей деформации четвертичных глинистых грунтов при переходе образцов от твердой к полутвердой, а затем тугопластичной и мягкопластичной консистенции (пластичной у супесей).

Наиболее показательной является связь модулей деформации и скоростей поперечных волн (рис. 4.3).

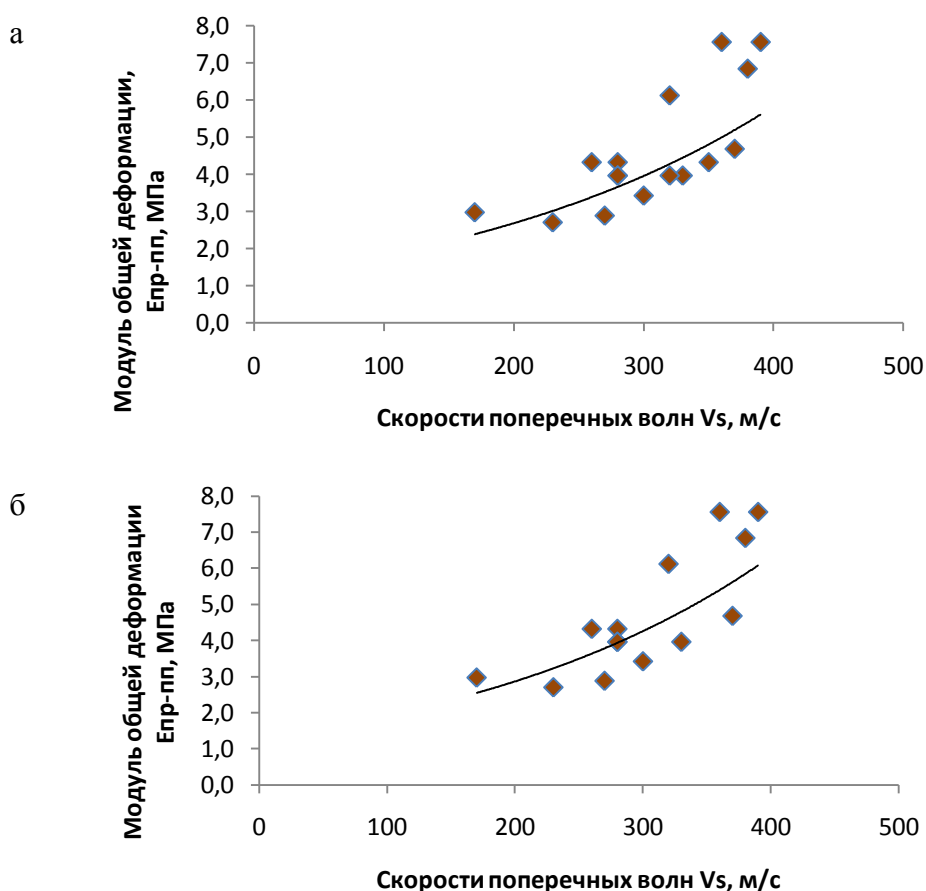


Рис. 4.3. Взаимосвязь модулей деформации и скоростей поперечных волн четвертичных суглинков и супесей (а) и суглинков (б)

Уравнение связи выглядит следующим образом $E_0 = 0,02V_s - 0,41$ ($r = 0,71$). Кроме линейной аппроксимации полученную зависимость можно описать экспоненциальным законом $E_0 = 1,23e^{0,0039V_s}$ ($r = 0,73$) (рис. 4.3, а), коэффициент корреляции несколько выше, чем для линейной связи. По литературным данным (Кригер, Миндель 1980) существуют корреляционные связи между скоростями продольных волн и модулем деформации, однако, для наших образцов такой взаимосвязи выявлено не было.

Отметим, что наблюдается слабый тренд увеличения модулей деформации с ростом прочности структурных связей четвертичных глинистых грунтов.

Проведенный анализ парных коэффициентов корреляции отдельно для четвертичных моренных суглинков показывает несколько более высокие значения r , особенно между показателями $E_k(V_s, R_c)$, $E_o(V_s, R_c)$. На рис. 4.3, б отражена взаимосвязь $E_o(V_s)$, причем наиболее тесно полученная взаимосвязь описывается экспоненциальной функцией $E_o = 1,29e^{0,004V_s}$ ($r=0,74$).

Результаты вычислений, полученные на участке $P_{\text{быт}}-1,5P_{\text{быт}}$ менее показательны, поскольку не все значения $1,5P_{\text{быт}}$ укладываются в интервал 0-0,5 МПа. Но и для меньшего количества значений удалось получить экспоненциальную взаимосвязь модулей общей деформации с динамическим модулем упругости $E_o = 3,2 * e^{0,0006E_d}$ ($r=0,69$) (рис. 4.4).

Образцы юрских грунтов при одновременном рассмотрении суглинков и глин вообще не проявляют тенденций изменения каких-либо параметров с ростом E_o . При рассмотрении отдельно суглинков юрского возраста наблюдается повышение коэффициентов корреляции. По результатам исследований статистически значимых связей не получено, отмечаются тренды к снижению деформационных характеристик с ростом пористости и коэффициента пористости. Результаты множественного регрессионного анализа модулей деформации и показателей состава, состояния и свойств природных четвертичных грунтов не позволили выявить тесных и весьма тесных линейных связей. По-видимому, эти связи имеют сложный характер.

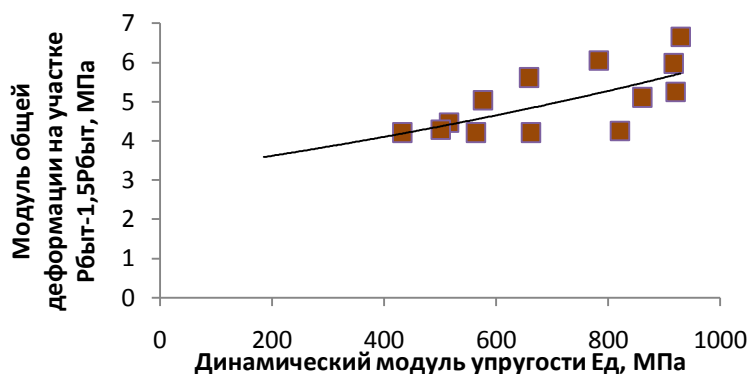


Рис. 4.4. Взаимосвязь модуля общей деформации на участке $P_{\text{быт}}-1,5P_{\text{быт}}$ и динамического модуля упругости четвертичных суглинков

4.2. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным одноосного сжатия

Определение прочности на одноосное сжатие (R_c) пользуется большей популярностью для скальных грунтов. Определение модулей упругости и общей деформации и коэффициента поперечной деформации в инженерных изысканиях проводятся только по специальному

заданию. Преимущество одноосных испытаний, в сравнении с компрессионными, заключается в их малых временных затратах и одновременном получении четырех характеристик (прочность, начальный модуль сжатия, относительный модуль деформации, коэффициент поперечного расширения). В связи с этим выглядит перспективной идея нахождения корреляционных связей деформационных характеристик, полученных прямым и косвенным методами.

По результатам экспериментальных исследований (табл. 4.3) 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, максимальные и минимальные значения R_c в пределах одной модели.

Для образцов каждой модели наблюдается рост прочности на одноосное сжатие с увеличением нагрузки уплотнения (при постоянной задаваемой влажности) до некоторого значения (оптимальная нагрузка уплотнения), после чего меняется слабо (подробнее см. главу 2). Анализ изменения показателя R_c прочности структурных связей проведен в главе 2.

Таблица. 4.3. Результаты одноосного сжатия исследуемых грунтов

| Образцы (количество) | Прочность на сжатие R_c , МПа | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_0 |
|--|------------------------------------|---|--|---|
| Суглинки М1 (20) $I_L < 0$ | <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 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 (29) $I_L < 0$ | <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_{fdns}) (24) $-0,56 < I_L < 0,63$ | <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 суглинков (М1, М2) к супесям (М3, М4) (табл. 4.3). Диапазон изменения этих параметров уменьшается в том же направлении. Максимальных значений

достигают наиболее плотные образцы (с нагрузками уплотнения 12-14 кг) с задаваемой влажностью 10-15% (близкой оптимальной влажности).

Коэффициенты поперечной деформации зависят скорее от показателей влажности, чем от дисперсности. Диапазоны изменения этого параметра одинаковы для всех модельных грунтов (табл. 4.3), в пределах одной модели минимальными значениями μ_0 (около 0,20-0,30) характеризуются наиболее «сухие» и плотные образцы, с увеличением влажности растут и коэффициент поперечного расширения (достигая значений 0,40-0,45).

Для выявления линейных связей с показателями строения и свойств модельных грунтов были получены парные коэффициенты корреляции с деформационными характеристиками, полученными по результатам одноосного сжатия (табл. 4.4.-4.7).

Для суглинков М1 получена весьма тесная связь ($r=0,91$) начального модуля сжатия и скорости поперечных волн. Тесной связью описывается увеличение модуля E_n с ростом плотности и его снижение с ростом пористости и коэффициента пористости. Слабая связь отмечается между начальным модулем сжатия и относительного модуля деформации с показателями влажности и консистенции грунтов.

Таблица 4.4. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельного суглинка М1

| Показатели | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_0 |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,66 | 0,38 | 0,15 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,75 | 0,57 | 0,04 |
| Пористость n , % | -0,75 | -0,59 | -0,04 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,72 | -0,53 | -0,09 |
| Влажность W , % | -0,56 | -0,56 | 0,74 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,40 | -0,48 | 0,71 |
| Степень влажности S_r , д.е. | 0,42 | -0,02 | 0,31 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,56 | -0,56 | 0,74 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,55 | 0,46 | 0,15 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,91 | 0,82 | -0,09 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | -0,05 | 0,16 | -0,28 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,85 | 0,65 | 0,11 |

Отметим тесную связь коэффициентов поперечной деформации с показателями влажности и консистенции суглинков М1. Однако такие высокие значения коэффициента корреляции отмечаются только для этой модели, наиболее дисперсной и однородной.

Таблица 4.5. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельного суглинка М2

| Показатели | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_o |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,22 | 0,61 | 0,28 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,46 | 0,70 | 0,18 |
| Пористость n, % | -0,47 | -0,70 | -0,17 |
| Коэффициент пористости e, ед. | -0,43 | -0,64 | -0,19 |
| Влажность W, % | -0,59 | -0,59 | 0,35 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,54 | -0,48 | 0,29 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,18 | 0,41 | 0,34 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,59 | -0,59 | 0,35 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,33 | 0,58 | 0,28 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,82 | 0,76 | -0,21 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,19 | -0,18 | -0,41 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,78 | 0,59 | -0,09 |

Таблица 4.6. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельной супеси М3

| Показатели | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_o |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,04 | -0,04 | 0,31 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,13 | -0,03 | 0,26 |
| Пористость n, % | -0,14 | 0,03 | -0,25 |
| Коэффициент пористости e, ед. | -0,15 | 0,02 | -0,25 |
| Влажность W, % | -0,26 | -0,06 | 0,34 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,24 | -0,05 | 0,35 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,12 | -0,03 | 0,34 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,26 | -0,06 | 0,34 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,52 | 0,50 | 0,17 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,78 | 0,61 | -0,22 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,21 | 0,08 | -0,40 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,76 | 0,39 | 0,00 |

Среди полученных связей для суглинков М2 выделяются две тесные ($E_n(V_s)$, $r=0,82$; $E_n(R_c)$, $r=0,85$) и пять слабых связей, показывающих тренд к увеличению начального модуля

сжатия с ростом скоростей поперечных волн и прочности структурных связей и со снижением влажности и консистенции глинистых грунтов. Для относительного модуля деформации характерны те же зависимости, но связи менее тесные.

Для модельных супесей М3, М4, как и в предыдущих случаях, прослеживается тесная связь со скоростями поперечных волн, а слабые связи с влажностью и показателем консистенции проявляются только в супесях М4.

Таблица 4.7. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельной супеси М4

| Показатели | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_0 |
|---|-------------------------------------|---|---|
| Плотность ρ , г/см ³ | -0,09 | 0,09 | 0,47 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,25 | 0,29 | 0,33 |
| Пористость n , % | -0,26 | -0,31 | -0,33 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,24 | -0,29 | -0,35 |
| Влажность W , % | -0,56 | -0,44 | 0,44 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,59 | -0,40 | 0,43 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,39 | -0,23 | 0,47 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,57 | -0,44 | 0,44 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,39 | 0,31 | 0,07 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,84 | 0,64 | -0,58 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,48 | 0,34 | -0,65 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,69 | 0,62 | -0,29 |

В целом, для всех модельных глинистых грунтов отмечается наличие связи начального модуля сжатия со скоростями поперечных волн (рис. 4.5). Уравнение связи для каждой модели практически не меняется и в общем виде для всех образцов выглядит следующим образом: $E_n=0,21V_s-32,8$ ($r=0,79$). При описании этой зависимости экспоненциальной функцией коэффициент корреляции выше всего на 2%, поэтому остановимся на линейной модели, как более простой и удобной для последующего анализа и использования.

По результатам пошагового регрессионного анализа для каждой модели в отдельности подтверждается тот факт, что на 60-65 % значения начального модуля сжатия определяются скоростями поперечных волн, вклад других параметров не превышает 10 %. В общем виде для всех модельных грунтов получено уравнение регрессии:

$$E_n=0,1V_s+46R_c-1,8W_{об}+29S_r+0,9 \quad (r=0,91).$$

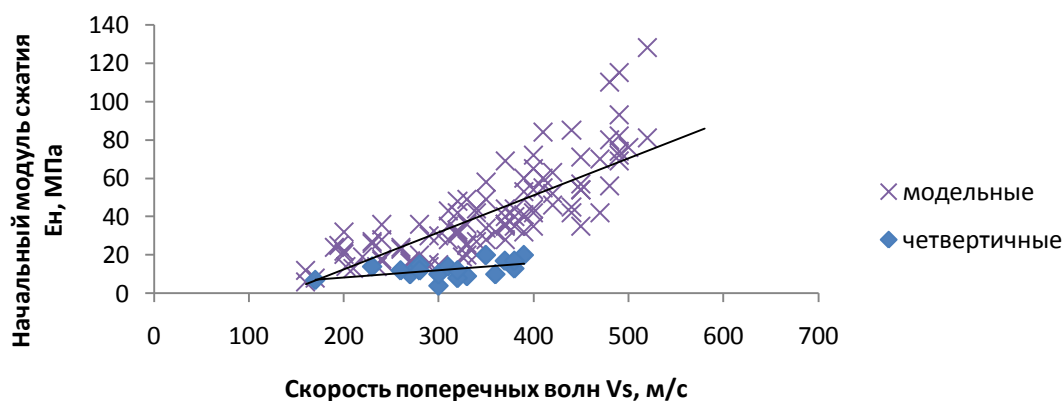


Рис. 4.5. Взаимосвязь начального модуля сжатия и скорости поперечных волн модельных (М1-М4) и четвертичных глинистых грунтов

Для относительного модуля деформации уравнения отличаются в зависимости от модели, но переменные остаются те же, следовательно $E_{отн}$ зависит от тех же параметров. Для коэффициента поперечного расширения связи очень слабые, не позволяющие провести какой-либо анализ.

Для *природных четвертичных* суглинков и супесей значения начальных модулей сжатия менялись в пределах от 3 до 20 МПа и в среднем составили 11 МПа, относительные модули деформации варьировали от 1 до 22 МПа, в среднем около 9 МПа. Диапазон изменения значительно меньше, чем в модельных, поскольку образцы были более однотипными по плотности и влажности (табл. 4.3). Наименьшие значения модулей характерны для грунтов тугопластичной и мягкопластичной консистенции и составляют всего 1-4 МПа, причем для этих грунтов значения относительного модуля деформации ниже начального модуля сжатия. Это связано с пластическим характером разрушения этих образцов и практически отсутствием прямолинейного участка σ на кривой $\epsilon(\sigma)$.

Отметим, что определение начального модуля сжатия природных глинистых грунтов твердой и полутвердой консистенции определялось преимущественно в интервале вертикальных напряжений 0,1-0,2 МПа, для грунтов тугопластичной (суглинки) и пластичной (супеси) консистенции 0 - 0,05 МПа. Значения коэффициента поперечного расширения менялись от 0,31 до 0,45.

Для четвертичных грунтов также были вычислены парные коэффициенты корреляции одновременно для всех образцов (табл. 4.8). При вычислении отдельно для суглинков значения коэффициентов корреляции практически не меняются.

По полученным данным модули деформации ($E_{н}$, $E_{отн}$) увеличиваются с ростом прочности структурных связей и влажностных показателей, определяющих твердую

консистенцию грунта, уменьшаются с увеличением показателя консистенции, а для коэффициента поперечного расширения те же зависимости имеют обратный характер.

Таблица 4.8. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств четвертичных глинистых грунтов

| Показатели | Начальный модуль сжатия суглинков и супесей E_n , МПа | Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации суглинков и супесей μ_0 | Коэффициент поперечной деформации суглинков μ_0 |
|---|---|---|---|---|
| Влажность W , % | -0,17 | -0,02 | 0,13 | 0,24 |
| Нижний предел пластичности W_p , % | 0,76 | 0,76 | -0,72 | -0,77 |
| Верхний предел пластичности W_L , % | 0,07 | 0,16 | -0,24 | -0,12 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,76 | -0,76 | 0,76 | 0,79 |
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,36 | -0,13 | 0,19 | 0,09 |
| Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³ | 0,42 | 0,49 | -0,44 | -0,42 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,07 | -0,11 | 0,11 | -0,00 |
| Пористость n , % | 0,28 | 0,45 | -0,42 | -0,34 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,29 | -0,32 | 0,42 | 0,38 |
| Гигроскопическая влажность W_g , % | 0,47 | 0,51 | -0,37 | -0,37 |
| Влажность макс. молек. влагоемкости $W_{ММВ}$, % | 0,59 | 0,74 | -0,52 | -0,55 |
| Макс. гигроскопическая влажность $W_{МГ}$, % | 0,84 | 0,90 | -0,71 | -0,76 |
| Средний диаметр частиц d_{50} , % | -0,52 | -0,64 | 0,64 | 0,63 |
| $M_{c<0,005}$ мм, % | 0,45 | 0,45 | -0,65 | -0,57 |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | -0,35 | -0,47 | 0,30 | 0,24 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,48 | 0,48 | -0,36 | -0,44 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,50 | 0,58 | -0,43 | -0,44 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,64 | 0,62 | -0,31 | -0,57 |

Начальный модуль сжатия, относительный модуль деформации и коэффициент поперечного расширения по статистическим данным преимущественно (на 58%) зависят от консистенции грунта, что теоретически понятно: значение E_n определялось по начальному прямолинейному участку графика $\sigma(\epsilon)$, который соответствовал участку упругих деформаций, а как известно, чем пластичнее грунт, тем меньше для него характерна упругость (тип контактов меняется от переходных к коагуляционным). По М.Н.Гольдштейну (1952) до этих напряжений в глинистых грунтах еще не возникает пластического течения, однако по результатам полученных зависимостей $\epsilon(\sigma)$ для грунтов тугопластичной (пластичной для супесей) консистенции это не всегда так, что отражается на полученных значениях $E_{отн}$ (они составляют около 1-2 МПа).

В связи с этим можно сделать вывод о том, что начальный модуль сжатия более показателен в сравнении с относительным модулем деформации.

Зависимость $E_n(V_s)$ несколько отличается от модельных грунтов (рис. 4.5), коэффициент корреляции достаточно низкий.

Еще одной важной закономерностью является связь прочности структурных связей и начальных модулей сжатия для всех исследуемых грунтов. Теснота связи меняется от слабой до тесной, в зависимости от модели. В общем виде для модельных и четвертичных грунтов зависимости представлены на рис. 4.6. Подобная зависимость с относительным модулем деформации в целом похожа, но коэффициент корреляции несколько ниже.

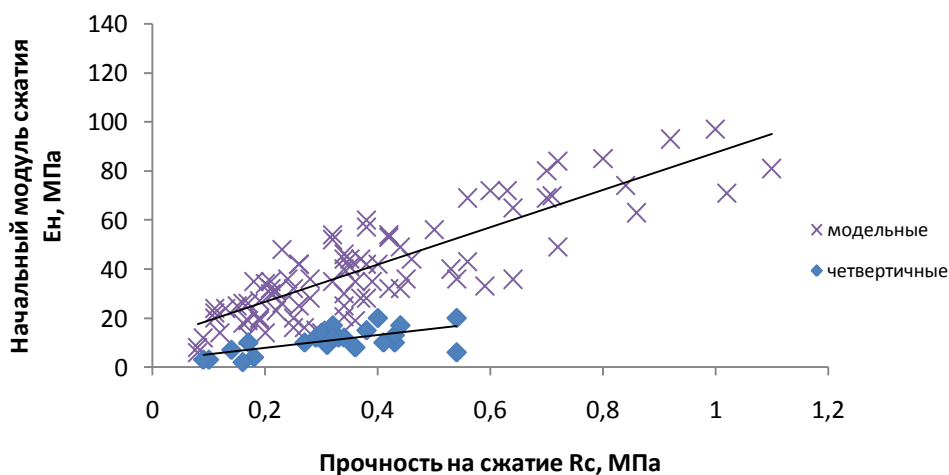


Рис. 4.6. Взаимосвязь начального модуля сжатия и прочности на сжатие модельных и четвертичных грунтов

При рассмотрении отдельно выборки из четвертичных моренных суглинков (без супесей) полученные взаимосвязи подчиняются тем же закономерностям. Обращают на себя внимание более тесные взаимосвязи $E_n, E_{отн}(R_c)$ и $\mu_o(R_c)$, последняя не прослеживалась в модельных

глинистых грунтах, но является вполне объяснимой, поскольку грунты с высокой прочностью, как правило твердой консистенции разрушаются преимущественно хрупко и хрупко-пластично и менее склонны к развитию значительных поперечных деформаций, а следовательно и коэффициенты поперечного расширения у них ниже.

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

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

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

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 поперечной деформации позволили получить уравнение вида $\mu_o = 0,14I_L + 0,01W_p + 0,46$ ($r=0,79$). В наибольшей степени значение μ_o определяется показателем текучести грунта, что согласуется с теорией, в меньшей степени влияет дисперсность.

В целом методика измерения поперечных деформаций на приборах производства ООО «НПП «Геотек»» (а следовательно и получения коэффициента поперечного расширения) по результатам одноосного сжатия глинистых грунтов, по мнению автора работы, нуждается в доработке. Погрешности в определении поперечных деформаций связаны со следующими факторами:

- 1) формирование «бочки» при сжатии в разных частях образца (в верхней части, средней и в нижней части), а положение датчиков поперечных деформаций только в центральной;
- 2) несовершенство закрепления датчиков поперечной деформации: датчики держатся на пружине, которая имеет свойство растягиваться с течением времени;
- 3) достаточно часто получаемые значения μ_o (особенно для образцов тугопластичной и пластичной (для супесей) консистенции) превышали значения 0,5 и даже 1,0, а в остальных случаях значение коэффициента поперечного расширения сильно зависело от выбора интервала его расчета, что требует значительного опыта в его определении.

По результатам испытаний на одноосное сжатие модельных и природных грунтов отмечается увеличение начального модуля сжатия с ростом показателей глинистости и

прочности структурных связей и снижение с повышением показателей влажности и консистенции.

4.3. Деформационные свойства глинистых грунтов по данным ультразвуковых испытаний

При решении задач инженерно-геологических исследований глинистых грунтов метод ультразвукового просвечивания применяется редко. Преимущество изучения деформационных показателей с помощью ультразвуковых исследований заключается в относительной простоте эксперимента и малых временных затратах, кроме того, во время измерений не происходит заметного деформирования самого образца. По данным Malehmir A., Anderson M., Lebedev. M. и др., (2013) амплитуда смещения частиц грунта при ультразвуковых исследованиях составляет всего 10^{-6} - 10^{-7} м.

В рамках настоящей диссертационной работы ультразвуковые исследования проводились для глинистых модельных, четвертичных и юрских грунтов. Некоторые трудности возникали с наиболее дисперсными грунтами, для которых не всегда была видна поперечная волна даже на небольшой (3-4 см) базе образца. Это явление связано с поглощением упругих волн в глинистых грунтах. Следует отметить, что в рамках настоящей работы параметры поглощения отдельно не рассматривались.

Результаты определения скоростей упругих волн и деформационных показателей (динамический модуль упругости, коэффициент Пуассона) для всех образцов приведены в приложении 11. В приложении 12 на треугольных диаграммах компонентного состава модельных (приложение 12, а-г) и природных четвертичных (приложение 12, д) грунтов отражены области полученных скоростей продольных волн, которые представляют собой концентрические окружности с наибольшими значениями при максимальном количестве твердого компонента (ΔT около 75-80 %) и степени влажности около 0,75. По мере снижения содержания твердого компонента (до значений ΔT порядка 60 %) скорости продольных волн снижаются практически в два раза. Треугольные диаграммы с изолиниями параметров скоростей упрощают задачу их поиска для любого возможного соотношения фаз грунта.

Из полученных данных видно, что для более дисперсных модельных грунтов (M1, M2) характерны большие скорости продольных волн (V_p) по сравнению с менее дисперсными (M3, M4) при схожих изменениях плотности, это можно объяснить большим количеством контактов между более мелкими частицами. Подобное изменение скоростей соответствующим образом сказывается и на значениях динамического модуля упругости (E_d) - в целом они снижаются с уменьшением дисперсности глинистых грунтов. В приложении 14 отражены

значения динамических модулей упругости модельных (приложение 14, а - г) и природных четвертичных (приложение 14, д) грунтов. В целом треугольные диаграммы похожи на диаграммы для скоростей продольных волн, с максимальными значениями E_d при наибольших значениях ΔT , минимальном содержании газового компонента (ΔG около 3-6 %) и значениях степени влажности близких 0,75-0,80. Высокие значения модулей в этой области объясняются высоким количеством контактов и максимальным количеством капиллярных менисков в грунтах, оказывающих дополнительную связность структурных элементов. При снижении содержания твердого компонента (увеличении пористости) уменьшается количество контактов, меняется их тип. При уменьшении количества жидкого компонента (при неизменной пористости) меняется степень его капиллярной связности, что тоже приводит к снижению его деформационных характеристик. Отметим, что при изучении влияния влажности на скорости продольных волн именно при $S_r=0,75-0,80$ для природных грунтов наблюдается рост V_p (подробнее см. раздел 3.3).

Диапазоны изменения данных ультразвуковых исследований приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9. 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>0,08-0,42</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>0,11-0,39</u> 0,21 | <u>300-600</u> 420 | <u>0,47-0,48</u> 0,48 |

Примечание: в числителе дроби приведены минимальные-максимальные значения, в знаменателе – среднее; в скобках – количество исследованных образцов.

В табл. 4.10-4.13 приведены коэффициенты парной корреляции (r) деформационных характеристик, полученных по данным ультразвукового просвечивания и параметров состава, состояния и свойств для моделей М1-М4 соответственно.

Для модельных суглинков (М1, М2) характерно увеличение модулей упругости с ростом плотности скелета грунта и уменьшением пористости, что также можно объяснить ростом количества и прочности контактов между частицами при уменьшении пористости. В образцах

супесей (М3, М4) эта зависимость тоже прослеживается, однако, выделяется группа точек, с задаваемыми влажностями 7%, которая не вписывается в общую закономерность (рис. 4.7). Выделенная группа точек связана с наличием пустот из-за недоуплотненности грунта при небольших нагрузках и низкой влажности (см. рис. 2.14).

Таблица 4.10. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельного суглинка М1

| Свойства | Динамический модуль упругости E_d , МПа | Коэффициент Пуассона μ |
|---|---|----------------------------|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,82 | 0,48 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,88 | 0,42 |
| Пористость n , % | -0,87 | -0,42 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,85 | -0,40 |
| Влажность W , % | -0,34 | 0,38 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,15 | 0,37 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,64 | 0,63 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,34 | 0,37 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,88 | 0,12 |

Таблица 4.11. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельного суглинка М2

| Свойства | Динамический модуль упругости E_d , МПа | Коэффициент Пуассона μ |
|---|---|----------------------------|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,44 | 0,73 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,64 | 0,54 |
| Пористость n , % | -0,65 | -0,52 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,61 | -0,54 |
| Влажность W , % | -0,42 | 0,71 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,33 | 0,73 |
| Степень влажности S_r , ед. | 0,08 | 0,85 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,42 | 0,72 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,79 | -0,07 |

Таблица 4.1.12. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельной супеси М3

| Свойства | Динамический модуль упругости E_d , МПа | Коэффициент Пуассона μ |
|---|---|----------------------------|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,10 | 0,68 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,20 | 0,56 |
| Пористость n , % | -0,23 | -0,54 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,20 | -0,57 |
| Влажность W , % | -0,25 | 0,82 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,22 | 0,83 |
| Степень влажности S_r , ед. | -0,04 | 0,79 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,25 | 0,82 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,87 | 0,01 |

Таблица 4.13. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств модельной супеси М4

| Свойства | Динамический модуль упругости E_d , МПа | Коэффициент Пуассона μ |
|---|---|----------------------------|
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,00 | 0,64 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,23 | 0,42 |
| Пористость n , % | -0,24 | -0,41 |
| Коэффициент пористости e , ед. | -0,23 | -0,42 |
| Влажность W , % | -0,53 | 0,82 |
| Объемная влажность $W_{об}$, % | -0,52 | 0,82 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,28 | 0,83 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,53 | 0,82 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,72 | -0,32 |

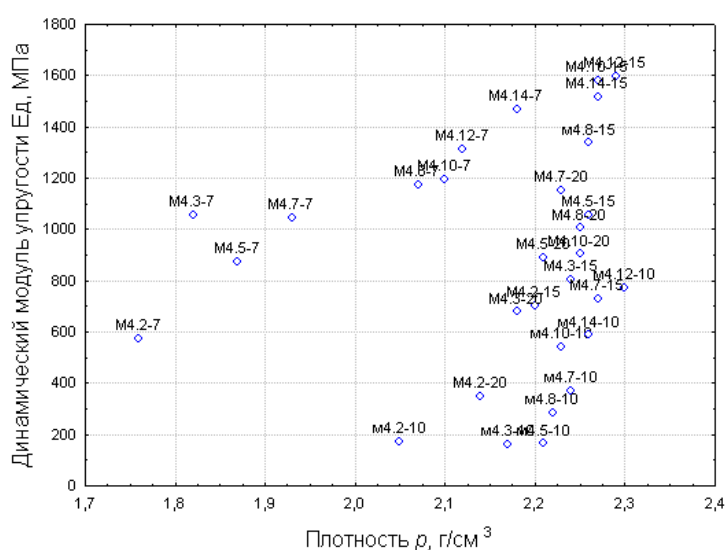


Рис. 4.7. Взаимосвязь динамического модуля упругости и плотности модельных супесей М4

Для всех модельных грунтов отмечается тесная связь коэффициента Пуассона со степенью влажности (рис. 4.8), описывается уравнением $\mu=0,14S_r+0,35$ ($r=0,79$). Подобная взаимосвязь объясняется наличием тесных связей между скоростями поперечных и продольных волн со степенью влажности модельных глинистых грунтов. Практически во всех модельных образцах проявляется взаимосвязь коэффициента Пуассона с влажностью и консистенцией грунтов, что объясняется теми же причинами.

По полученным данным, для водонасыщенных грунтов $\mu > 0,45$; средней степени водонасыщения соответствуют $0,42 < \mu < 0,45$; малой степени водонасыщения соответствуют $\mu < 0,42$.

Кроме того, для всех модельных глинистых грунтов прослеживается тесная связь динамического модуля упругости с прочностью структурных связей (рис. 4.9). Причем, уравнение связей для суглинков (M1, M2) в общем виде выглядит следующим образом:

$E_d=1300R_c+136$ (коэффициент корреляции $r=0,76$, связь тесная). Для супесей (М3, М4) уравнение $E_d=2200R_c+138$ (коэффициент корреляции $r=0,78$, связь тесная) отличается большим угловым коэффициентом.

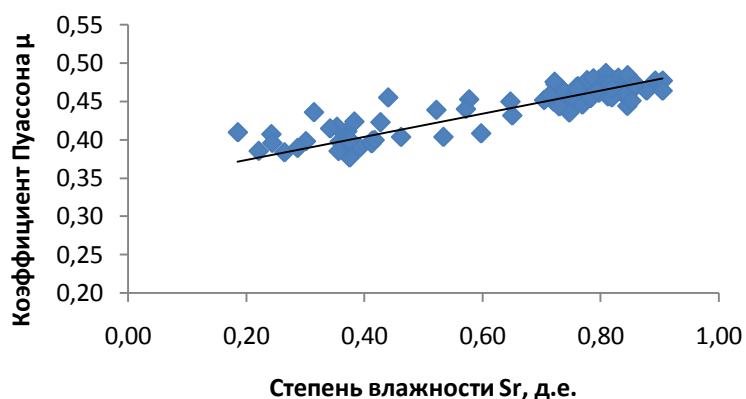


Рис. 4.8. Взаимосвязь коэффициента Пуассона и степени влажности модельных суглинков и супесей

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.

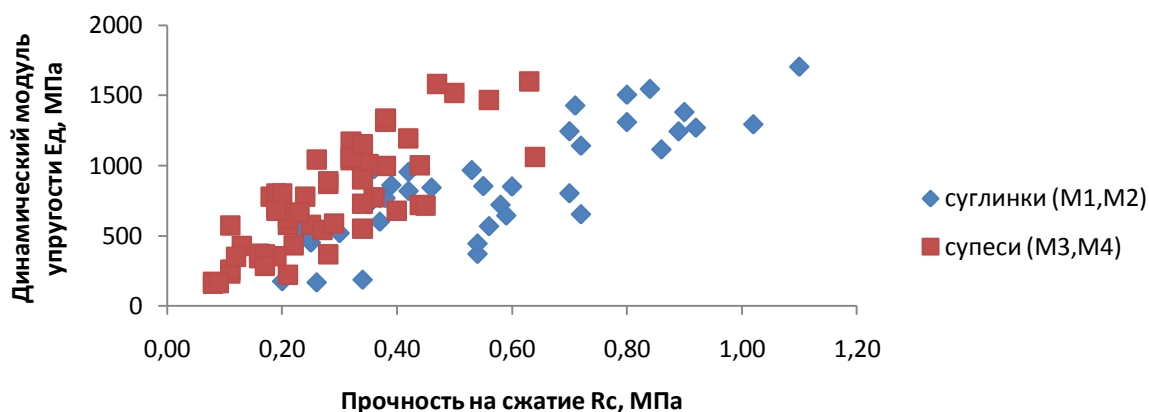


Рис. 4.9. Взаимосвязь динамического модуля упругости и прочности на сжатие модельных суглинков (М1,М2) и супесей (М3,М4)

Для каждого модельного грунта были получены уравнения множественной регрессии динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона с показателями состава, состояния и свойств грунтов:

для суглинков тяжелых М1: $E_d=1066R_c-7626\rho_d-1063$ ($r=0,81$);

$\mu=0,2S_r+0,32$ ($r=0,85$);

для суглинков легких М2: $E_d=956\rho_d-943R_c-1535$ ($r=0,92$);

$\mu=0,63S_r-0,42\rho+0,86$ ($r=0,82$);

для супесей М3: $E_d=3108R_c-1333\rho_d-2637$ ($r=0,92$);

$$\mu=0,18S_r-0,11\rho+0,54 \quad (r=0,81);$$

для супесей М4: $E_d=1704R_c-668\rho_d-1664 \quad (r=0,83);$

$$\mu=0,17S_r-0,11\rho+0,59 \quad (r=0,84).$$

Связи относятся к категориям тесных ($0,70 < r < 0,80$) и весьма тесных ($0,80 < r < 0,90$). Полученные взаимосвязи свидетельствуют о том, что динамический модуль упругости для всех изучаемых модельных грунтов определяется прочностью на одноосное сжатия и плотностью скелета грунта, что вполне ожидаемо, поскольку именно эти параметры определяют количество и прочность контактов в грунте. Значение коэффициента поперечного расширения в большей степени зависит от степени влажности грунта и плотностных характеристик, что тоже вполне ожидаемо.

Природные четвертичные грунты в целом подчиняются тем же закономерностям: наблюдается повышение коэффициента Пуассона с ростом степени влажности и консистенции (коэффициенты корреляции r около 0,6) и уменьшение с ростом дисперсности (при постоянной влажности). Динамический модуль упругости увеличивается с ростом прочности структурных связей, показателей глинистости и снижается с повышением показателя консистенции (табл. 4.14).

Уравнение связи модуля упругости и прочности на сжатие четвертичных грунтов $E_d=1680R_c+0,61 \quad (r=0,51, \text{ связь слабая})$ получено только для моренных суглинков причем оно близко к уравнению, полученному для модельных суглинков (рис. 4.10). Уравнение для четвертичных природных супесей не приводится, поскольку данных мало.

Для четвертичных моренных суглинков (без супесей) закономерности те же, прослеживается тренд увеличения E_d и снижение μ с ростом показателей W_p, W_{mg}, W_g . Полученная связь объясняется тем, что значения влажности нижнего предела пластичности и максимальной молекулярной влагоемкости выше у более дисперсных грунтов, для которых характерны большие скорости упругих волн, а, соответственно, и максимальные значения динамических модулей упругости. Кроме того, перечисленные влажностные характеристики соответствуют твердому состоянию глинистых грунтов, при котором модули деформации выше, а коэффициент Пуассона ниже по сравнению с грунтами в пластичном состоянии.

Тесные взаимосвязи $\mu(n, \rho, \rho_d)$ получены в связи с тем, что эти параметры оказывают достаточно сильное влияние на скорости продольных волн.

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

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

Таблица 4.14. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств четвертичных глинистых грунтов

| Переменные | Динамический модуль упругости суглинков и супесей E_d , МПа | Динамический модуль упругости суглинков E_d , МПа | Коэффициент Пуассона суглинков и супесей μ | Коэффициент Пуассона суглинков μ |
|---|---|---|--|--------------------------------------|
| Влажность W , % | 0,18 | 0,20 | -0,13 | -0,07 |
| Нижний предел пластичности W_p , % | 0,54 | 0,61 | -0,62 | -0,64 |
| Верхний предел пластичности W_L , % | 0,45 | 0,56 | -0,37 | -0,34 |
| Показатель текучести I_L , ед. | -0,54 | -0,54 | 0,63 | 0,62 |
| Плотность ρ , г/см ³ | -0,08 | -0,08 | -0,62 | -0,61 |
| Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³ | 0,30 | 0,30 | -0,43 | -0,42 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | -0,12 | -0,13 | 0,62 | 0,61 |
| Пористость n , % | 0,28 | 0,29 | -0,72 | -0,72 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,14 | -0,13 | 0,60 | 0,60 |
| Гигроскопическая влажность W_g , % | 0,47 | 0,53 | -0,56 | -0,55 |
| Максимальная гигроскопическая влажность W_{mg} , % | 0,56 | 0,64 | -0,59 | -0,63 |
| Прочность структурных связей R_c , МПа | 0,61 | 0,67 | -0,30 | -0,30 |
| Средний диаметр частиц d_{50} , % | -0,11 | -0,10 | 0,21 | 0,14 |
| $M_{c<0,005}$ мм, % | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,17 |

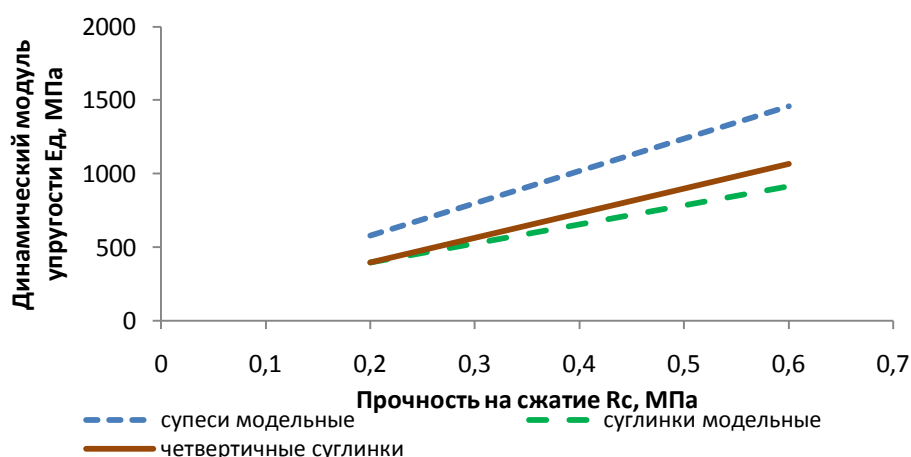


Рис. 4.10. Линейные графики взаимосвязи динамического модуля упругости и прочности на сжатие модельных и четвертичных грунтов

Динамический модуль упругости преимущественно определяется значением прочности на сжатие и в меньшей степени показателем дисперсности, а иными словами - количеством и прочностью контактов. Коэффициент Пуассона сочетает в себе влияние коэффициента пористости и показателя текучести, определяющих внутреннюю пространственную структуру образцов и влажностное состояние.

Коэффициенты парной корреляции для *юрских глинистых грунтов*, в связи с малым количеством данных, в целом менее информативны (табл. 4.15). Отмечается увеличение модуля упругости с ростом плотности скелета грунта и его снижение с ростом пористости.

При рассмотрении отдельно суглинков (без глин) отмечается тренд снижения модулей упругости с ростом влажности и дисперсности. Данных о прочности структурных связей недостаточно для проведения статистического анализа. Рост коэффициента Пуассона с уменьшением плотности скелета вполне объясним, поскольку уменьшается количество контактов в грунте, что повышает его деформируемость.

Таблица 4.15. Парные коэффициенты корреляции (r) деформационных характеристик и показателей состава, состояния и свойств юрских глинистых грунтов

| Переменные | Динамический модуль упругости суглинков и глин E_d , МПа | Динамический модуль упругости суглинков E_d , МПа | Коэффициент Пуассона суглинков и глин μ | Коэффициент Пуассона суглинков μ |
|---|--|---|---|--------------------------------------|
| Влажность W , % | -0,36 | -0,51 | -0,01 | -0,20 |
| Нижний предел пластичности W_p , % | -0,13 | -0,00 | 0,27 | 0,35 |
| Верхний предел пластичности W_L , % | 0,27 | -0,30 | 0,23 | -0,28 |
| Показатель текучести I_L , ед. | 0,00 | -0,18 | 0,07 | 0,16 |
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,27 | 0,19 | -0,61 | -0,56 |
| Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³ | -0,03 | 0,07 | 0,25 | 0,47 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,64 | 0,54 | -0,77 | -0,78 |
| Пористость n , % | -0,52 | -0,36 | 0,31 | 0,18 |
| Степень влажности S_r , д.е. | -0,09 | -0,16 | 0,16 | 0,15 |
| Гигроскопическая влажность W_g , % | 0,21 | 0,13 | -0,09 | -0,44 |
| Средний диаметр частиц d_{50} , % | 0,12 | -0,51 | -0,26 | -0,20 |

4.4. Анализ данных по коэффициенту поперечного расширения и коэффициенту Пуассона

Определение коэффициентов поперечного расширения по результатам одноосного сжатия на приборах производства ООО «НПП «Геотек»» включает в себя ряд методических сложностей, описанных в разделе 4.1. Наиболее надежные результаты получаются в образцах с хрупким и хрупко-пластичным характером разрушения (рис. 4.11, а), в случае пластичного разрушения относительно достоверные результаты получаются при образовании бочки во время эксперимента в центральной части образца (рис. 4.11, б).

Для каждого модельного грунта прослеживается снижение коэффициента поперечного расширения с ростом нагрузки уплотнения при одинаковой задаваемой влажности (для модельных суглинков М1 и супесей М4 см. рис. 4.12).

Это обстоятельство объясняется, с одной стороны, меньшими весовыми значениями влажности образцов при максимальных нагрузках уплотнения (влага отжимается в процессе приготовления образца), что затрудняет скольжение частиц при деформировании; с другой стороны, увеличением количества и площади контактов при больших нагрузках уплотнения, что повышает значения модулей деформации и снижает μ_0 .

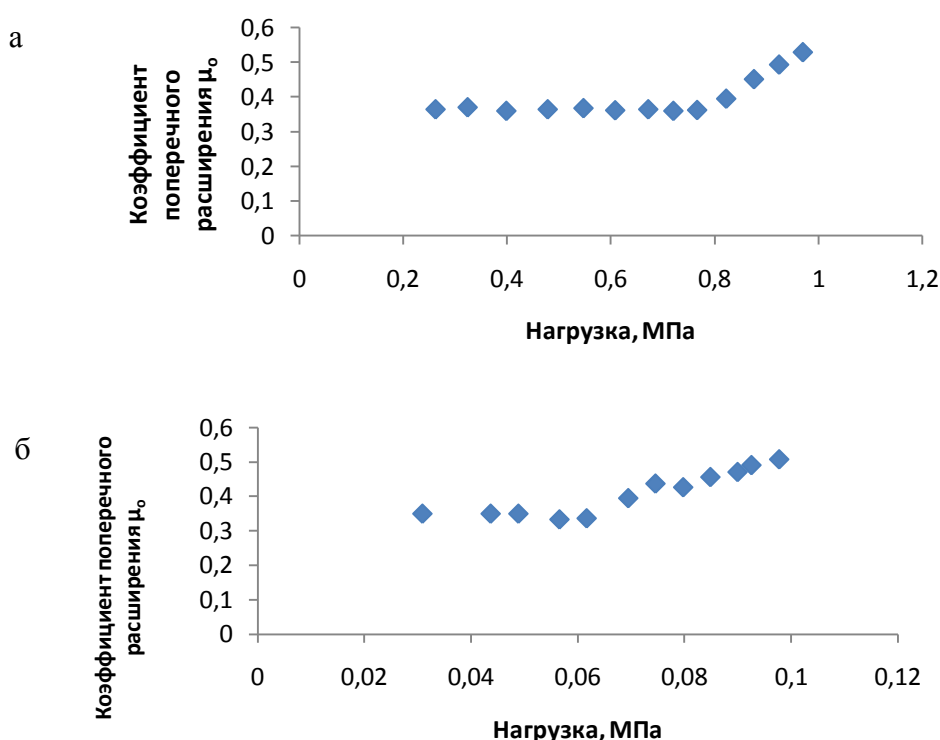


Рис. 4.11. Изменение коэффициента поперечного расширения при возрастающей нагрузке в модельных образцах: твердом суглинке М2.14-10 (а) и пластичной супеси М3.7-20 (б)

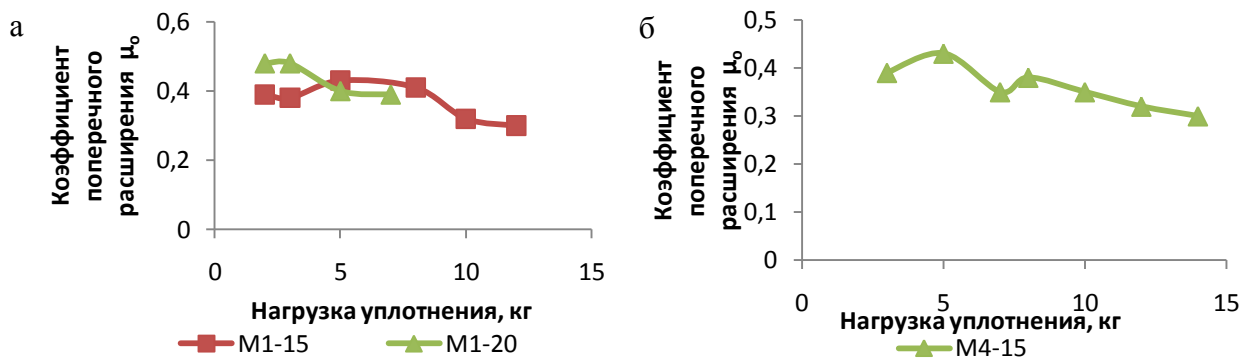


Рис. 4.12. Изменение коэффициента поперечного расширения с ростом нагрузки уплотнения модельных суглинков (а) и супеси (б)

Нахождение парных коэффициентов корреляции между коэффициентами поперечного расширения μ_0 (полученного в опытах по одноосному сжатию) и Пуассона для модельных грунтов не позволили выявить каких-либо значимых связей. При сопоставлении этих показателей для природных четвертичных грунтов получено уравнение связи $\mu_0 = 1,7\mu - 0,4$ (коэффициент корреляции $r=0,71$, рис. 4.13). Полученная зависимость построена отдельно для четвертичных моренных суглинков (без супесей).

Отметим, что наиболее достоверно определение коэффициента поперечного расширения по результатам одноосного сжатия модельных грунтов получено для образцов твердой и полутвердой консистенции. Значения μ_0 для исследуемых образцов тугопластичной и мягкопластичной консистенции часто превышают 0,5, при этом форма образцов становится характерной «бочкообразной».

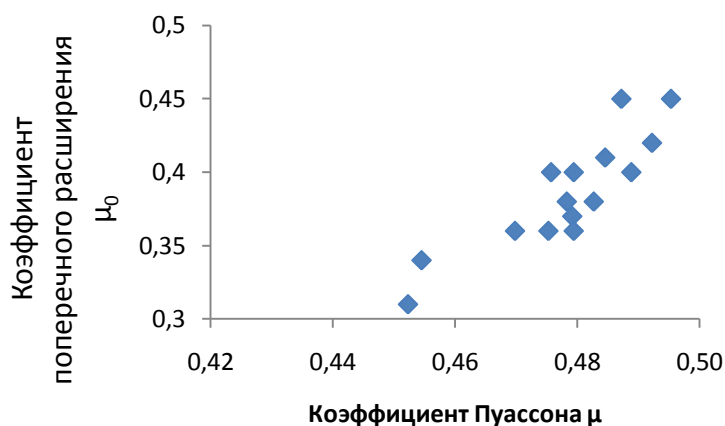


Рис. 4.13. Взаимосвязь коэффициента поперечного расширения и коэффициента Пуассона четвертичных моренных грунтов

По-видимому, именно с наличием большого количества методических сложностей в определении коэффициента поперечного расширения связаны в целом низкие значения коэффициентов корреляции с коэффициентом Пуассона. Тем не менее, использование

подобных взаимосвязей имеет безусловное практическое значение, например при проведении инженерно-геологических расчетов напряженно-деформируемого состояния численными методами, когда выделенным элементам необходимо «назначить» трудно определяемый коэффициент μ_0 .

4.5. Соотношения модуля общей деформации, начального модуля сжатия, относительного модуля сжатия и динамического модуля упругости исследуемых образцов глинистых грунтов

Установление корреляционных связей между модулем общей деформации (E_0), начальным модулем сжатия (E_n), относительным модулем деформации ($E_{отн}$) и динамическим модулем упругости (E_d) - наиболее важное направление исследований, поскольку значения модулей деформации закладываются во многие инженерно-геологических расчеты. Поэтому, предварительная оценка этих параметров с помощью ультразвуковых методов может быть очень полезной с практической стороны.

Для модельных суглинков и супесей компрессионных исследований не проводилось, поэтому поиск взаимосвязей проводился только по результатам определения прочности на одноосное сжатие. Как следует из полученных данных, коэффициенты корреляции начального модуля сжатия (E_n) и динамического модуля упругости (E_d) менялись от 0,82 до 0,93, что соответствует тесной и весьма тесной связи.

Также было замечено, что взаимосвязь для рассматриваемых модельных образцов не зависит от дисперсности, поэтому было получено общее уравнение связи (рис. 4.14, а):

$$E_n = 13,71 \times e^{0,001 \times E_d} \text{ (коэффициент корреляции } r=0,85\text{).}$$

Для образцов природных суглинков и супесей было получено несколько иное уравнение связи (рис. 4.14, а):

$$E_n = 6,94 \times e^{0,001 \times E_d} \text{ (коэффициент корреляции } r=0,71\text{).}$$

При сопоставлении относительного модуля деформации и динамического модуля упругости полученные связи наилучшим образом описываются экспоненциальным законом (рис. 4.14, б):

$$E_{отн} = 20,95 \times e^{0,001 \times E_d}, r=0,75 \text{ для всех модельных грунтов;}$$

$$E_{отн} = 2,96 \times e^{0,002 \times E_d}, r=0,68 \text{ для природных четвертичных грунтов.}$$

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 в данном случае наблюдается обратное. По мнению

автора наиболее информативна взаимосвязь динамического модуля упругости с начальным модулем сжатия, поскольку E_n наиболее полно отражает характер развития процесса деформирования для грунтов различной консистенции.

Кроме результатов одноосного сжатия, были получены корреляционные взаимосвязи динамического модуля упругости и модуля общей деформации для природных четвертичных грунтов, рассчитанного по данным компрессионного сжатия (рис. 4.15):

$$E_0 = 5,8 \times e^{0,001 \times E_d} \text{ (r=0,75)}.$$

Подобные взаимосвязи для лессовидных суглинков были получены и другими авторами (обобщены в работе Кригера, Минделя и др., 1980), однако, модули упругости были получены методами полевой наземной сейсморазведки. Это обстоятельство позволяет сделать предположение о возможности оценки модуля деформации природных грунтов также и по данным полевых сейсморазведочных работ.

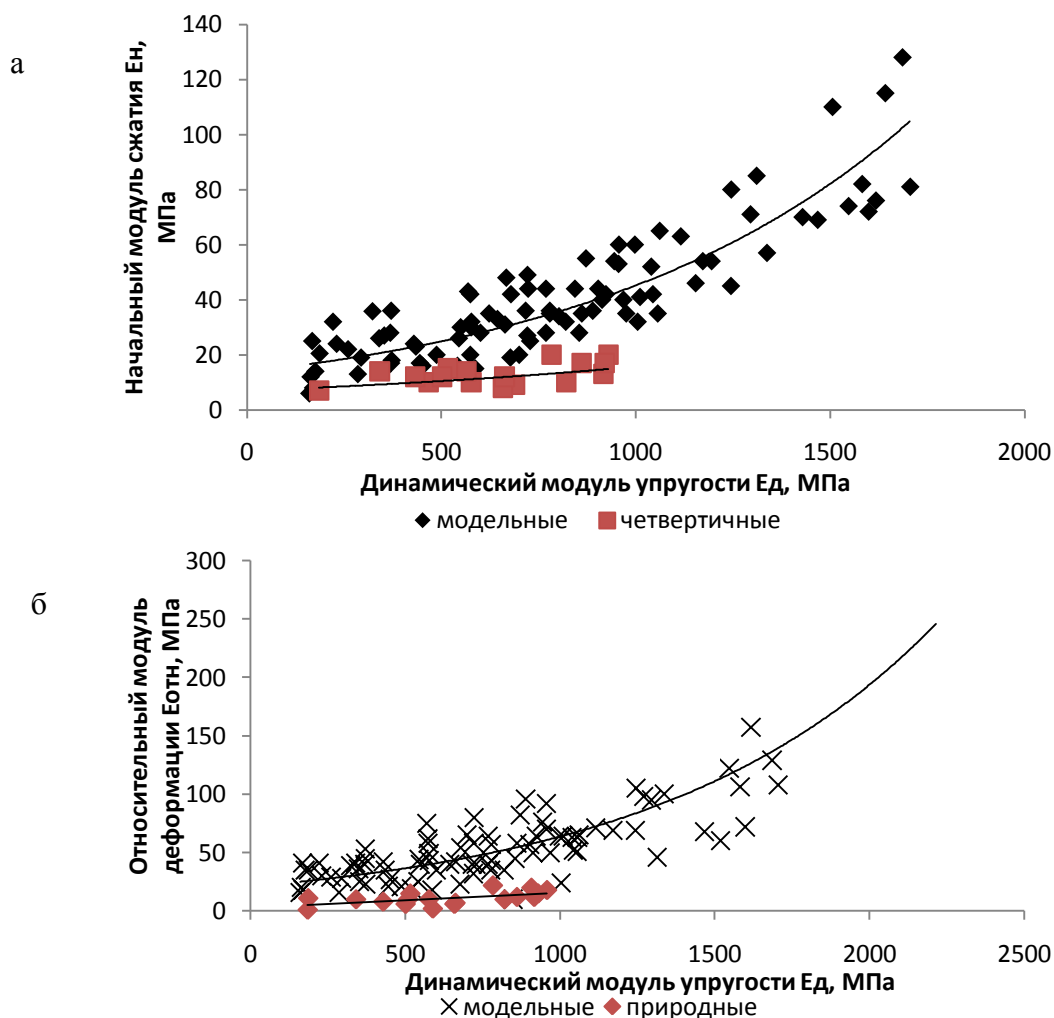


Рис. 4.14. Взаимосвязи динамического модуля упругости и начального модуля сжатия (а), относительного модуля сжатия (б) модельных и природных грунтов

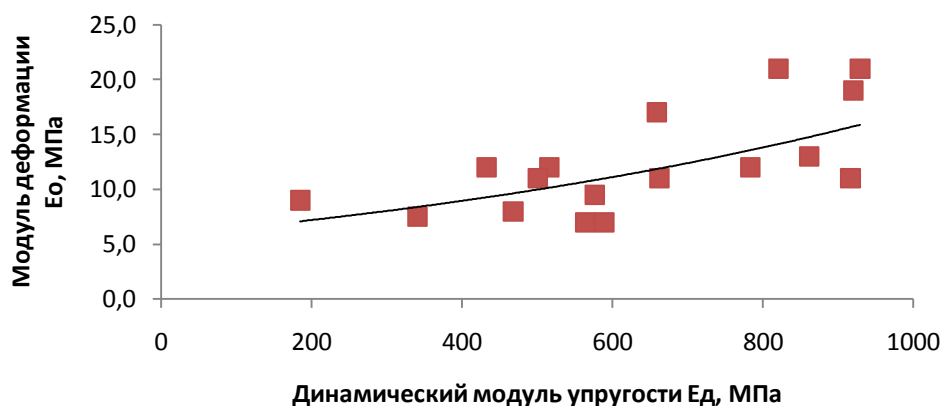


Рис. 4.15. Взаимосвязь динамического модуля упругости и модуля деформации, полученного по компрессионным испытаниям четвертичных грунтов

Для юрских глинистых грунтов характерны те же тренды изменения деформационных свойств, однако, о значимых связях говорить сложно, необходим больший объем выборки.

Выводы по главе

1. Все исследуемые показатели деформационных свойств, полученные лабораторными инженерно-геологическими и ультразвуковым методами, подчиняются общим закономерностям: модули компрессионной и общей деформации, начальный модуль сжатия, относительный модуль деформации, динамический модуль упругости снижаются с ростом степени влажности и показателя консистенции; увеличиваются с ростом прочности структурных связей и дисперсности глинистых грунтов. Коэффициенты поперечного расширения и Пуассона повышаются с ростом показателя консистенции суглинков и супесей.

2. Для природных моренных суглинков выявлена взаимосвязь между коэффициентом поперечного расширения и коэффициентом Пуассона по линейному закону $\mu_0 = 1,7\mu - 0,4$.

3. Получены уравнения взаимосвязи динамического модуля упругости с начальным модулем сжатия, относительным модулем деформации (по результатам одноосного сжатия) и модулем общей деформации (по компрессионным испытаниям), описываемые экспоненциальными законами как для модельных, так и для природных четвертичных грунтов. Полученные зависимости могут служить для предварительной оценки показателей деформационных свойств четвертичных глинистых грунтов (моренных суглинков донского горизонта Московского региона).

Проведенный совместный анализ деформационных характеристик глинистых грунтов, полученных разными группами методов, позволяет сформулировать **третье защищаемое положение.**

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.

Основные 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 ($\mu_o=1,7\mu-0,4$), позволяющая по данным ультразвукового просвечивания оценивать трудно определяемый для глинистых грунтов коэффициент поперечного расширения μ_o .

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 литературы

1. *Авербух А.Г.* Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. М.: Недра, 1982. 232 с.
2. *Андреичев М.В., Горбунов Б.П., Котов А.И., Мотузов Я.Я.* Термоконтсолидация илов // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве. Киев: Будивельник, 1974. 121 с.
3. *Архангельский И.В.* Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов // Инженерная геология. Июнь 2008. С. 58-64.
4. *Баев А.В., Куценко Н.В., Файзуллин И.С.* О затухании и рассеянии волн в трещиноватых средах // Геофизика. 2007. N 5. С. 32-35.
5. *Беломестных В.Н., Теслева Е.П.* Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел // Известия Томского политехнического университета. Том 36, выпуск 5. 2003. С. 8-12.
6. *Болдырев Г.Г., Идрисов И.Х.* Лабораторные методы определения механических свойств грунтов. Пенза: ГОУ высшего проф. образования «Пензенский государственный университет архитектуры и искусства», 2005. 40 с.
7. *Бондарев В.И.* Основы сейсморазведки. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. 333 с.
8. *Булыгина Л.Г., Соколов В.Н., Кошелев А.Г.* Влияние особенностей микростроения глинистых грунтов различного генезиса на их деформирование при компрессионных и штамповых испытаниях // Сергеевские чтения. Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты). Молодежная конференция. Выпуск 15. М.: РУДН, 2013. С. 13-17.
9. *Бутина Е.И., Пиоро Е.В.* Изучение коэффициента поперечного расширения глинистых грунтов прямым и косвенным методом // Труды VI научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М.: ПНИИИС, 2010. С. 78-82.
10. *Ватолин Е.С.* Некоторые динамические свойства и природа деформирования горных пород. М.: Наука, 1966. 62 с.
11. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ. 2004. 97 с.
12. *Вознесенский Е.А.* Поведение грунтов при динамических нагрузках. М.: Изд-во МГУ, 1997. 288 с.
13. *Воронкевич С.Д.* Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.

14. Вуклов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованиям операций с использованием пакетов STATISTICA и EXEL: Учебное пособие. М.: ФОРУМ, 2008. 464 с.
15. Герсеванов М.Н. Основы динамики грунтовой массы. М.: ОНТИ, 1937. 242 с.
16. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. 324 с.
17. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1971. 369 с.
18. Голубев И.Ф. Техника и методика ускоренного анализа почв. М.: Изд-во мин-ва сельского хозяйства РСФСР, 1963. 106 с.
19. Горянов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992. 264 с.
20. Горайнов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.
21. ГОСТ 7.0.11-2011. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления, 2012. 12 с.
22. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2007. 61 с.
23. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2011. 83 с.
24. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2013. 42 с.
25. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. М.: МНТКС, 2002. 31 с.
26. Грунтоведение / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1983. 463 с.
27. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Наука, МГУ, 2005. 1023 с.
28. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. 3-е издание. М.: Недра, 1980. 552 с.
29. Гурвич И.И., Номоконов В.П. Сейсморазведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1981. 464 с.
30. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Ленинград.: Стройиздат Ленинградское отделение, 1988. 416 с.
31. Дашко Р.Э. Геоэкология подземного пространства Санкт-Петербурга: роль микробиоты и физико-химических факторов в преобразовании грунтов и строительных материалов. Спб.: Инфстрой. 2003. N 6(12). С. 3-11.
32. Дашко Р.Э. Механика горных пород. М.: Недра, 1987. 264 с.

33. *Денисов М.С.* Принцип взаимности и связи амплитуды акустической волны с геометрическим расхождением // *Геофизика*. 2007. N 6. С. 3-7.
34. *Дерягин Б.В.* Учение о свойствах тонких слоев воды в приложении к объяснению свойств глинистых пород // *Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения*. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 13-24.
35. *Дидух Б.И.* Упруго-пластическое деформирование грунтов: автореф. дис. д-ра техн. наук. М.: Моск. инж.-строит. институт им. В. В. Куйбышева, 1985. 45 с.
36. *Дидух Б.И.* Механика грунтов: Учеб. пособие. М.: Изд-во УДН, 1990. 90 с.
37. *Дорошкевич Н.М., Клейн Г.К., Смиренин П.П.* Основания и фундаменты. М.: Высшая школа, 1972. 130 с.
38. *Дроздова С.Б.* Особенности лабораторных определений физико-механических и химических свойств грунтов в связи с совершенствованием нормативно-документальной базы РФ // *Материалы Восьмой Общероссийской конференции изыскательских организаций*. М.: ООО «Геомаркетинг», 2012. 204 с.
39. *Здобин Д.Ю.* Проблемы лабораторных исследований грунтов в инженерно-геологической практике // *Материалы Восьмой Общероссийской конференции изыскательских организаций*. М.: ООО «Геомаркетинг», 2012. 204 с.
40. *Зиангиров Р.С.* Объемная деформируемость глинистых грунтов. М.: Наука, 1979. 289 с.
41. *Зиангиров Р.С., Кошелев А.Г.* Определение модуля деформации грунтов методом нагружения штампа // *Инженерные изыскания*. Февраль 2010. С. 26-31.
42. *Зиангиров Р.С., Рот П.Э., Филимонов С.Д.* Практикум по механике грунтов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1984. 147 с.
43. *Зинченко В.С.* Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных. М.-Тверь: Изд. АИС, 2005. 392 с.
44. *Ильченко В.В., Павленко В.В., Шарапов В.Г.* Инженерно-сейсмологические исследования на объекте: «65-ти этажное офисно-жилое здание по проспекту Кадырова в г. Грозном» // *Материалы Восьмой Общероссийской конференции изыскательских организаций*. М.: ООО «Геомаркетинг», 2012. 204 с.
45. *Калачев В.Я., Аслибекян О.В., Филимонов С.Д., Хамди С.Э.* Методика экспресс-компрессионных исследований грунтов // *Инженерная геология: теория, практика, проблемы / Сб. науч. тр. / Под ред. В.Т.Трофимова*. М.: Изд-во МГУ, 1993. С. 199-210.
46. *Калинин В.В., Владов М.Л.* Анализ возможности экспериментального определения коэффициента Пуассона и модуля Юнга по скорости продольных волн с использованием цилиндрических образцов // *Геотехника*. 2010. N 6. С. 4-12.

47. *Кирничанский Г.Т.* Элементы теории деформирования и разрушения горных пород. Киев: Наукова думка, 1989. 184 с.
48. *Койфман М.И., Ильницкая Е.И., Карпов В.И.* Прочность горных пород в объемном напряженном состоянии. М.: Изд-во «Наука», 1964. 33 с.
49. *Королев В.А.* Новые идеи в систематизации свойств грунтов // Новые идеи в инженерной геологии. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 42-49.
50. *Королев В.А., Злочевская Р.И., Осипов В.И.* Деформируемость глинистых грунтов при компрессионном уплотнении // Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д.Щукина и др. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 213-222.
51. *Королев В.А., Самарин Е.Н., Николаева С.К.* и др. Лабораторные работы по грунтоведению // Под ред. В.Т.Трофимова и В.А.Королева. М.: Высшая школа, 2008. 519 с.
52. *Котлов Ф.В.* Антропогенные геологические процессы и явления на территории города. М.: Наука, 1977. 172 с.
53. Краткий справочник по грунтоведению / Под ред. Егорова Ю.К., Озмидова О.Р. М.: «МостДорГеоТрест», 2011. 59 с.
54. *Кригер Н.И., Алешин А.С., Кожевников А.Д., Мидель И.Г.* Сейсмические характеристики лессовых пород в связи с геологическим окружением и техногенезом. М.: Наука, 1980. 104 с.
55. *Крюков П.А.* Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск: Наука, 1971. 220 с.
56. *Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М.* Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М.: Наука, 1969. 399 с.
57. *Ломтадзе В.Д.* Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. Л.: Недра, 1972. 312 с.
58. *Лысенко М.П.* Состав и физико-механические свойства грунтов. М.: Недра, 1980. 272 с.
59. *Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Яценко З.Г.* Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 251 с.
60. *Месчан С.Р., Галстян Р.Р.* Исследование компрессионной ползучести глинистого грунта с учетом температурных воздействий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1972. N 4. С. 68-81.
61. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов / Изд-во Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства, 1976. 71 с.

62. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород / под ред. Е.М. Сергеева. Том 2. М.: Недра, 1984. 423 с.
63. Миндель И.Г. Изучение физико-механических свойств лессовых пород сейсмоакустическими методами // Труды ПНИИИИС, т.4. Москва. 1970. С. 278-297.
64. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. М.: Изд-во МГУ, 1981. 176 с.
65. Никитин В.Н. О соотношении между динамическими и статическими модулями упругости горных пород // Разведочная и промысловая геофизика. Выпуск 45. 1962. С. 36-41.
66. Ничипорович А.А., Цыбульник Т.И. Прогноз осадок гидротехнических сооружений на связных грунтах. М.: Госстройиздат, 1961. 242 с.
67. Осипов В.И. Природа прочности и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
68. Осипов В.И. Нанопленки адсорбированной воды в глинах, механизм их образования и свойства // Геоэкология. 2011. N 4. С. 291-305.
69. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах // Геоэкология. 2013. N 1. С. 3-25.
70. Осипов В.И., Бабак В.Г. Природа и механизм набухания глин // Инженерная геология. 1987. N5. С. 18-27.
71. Осипов В.И., Соколов В.Н. Роль ионно-электростатических сил в формировании структурных связей глин // Вестник МГУ. Серия Геология. 1974. N 1. С. 16-32.
72. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 238 с.
73. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
74. Ошкин А.Н. Ультразвуковые исследования в лаборатории. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 89 с.
75. Палагин В.В., Попов А.Я., Дик П.И. Сейсморазведка малых глубин. М.: Недра, 1989. 216 с.
76. 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
77. 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., РУДН, 2013, с. 75-79.

78. 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.

79. 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

80. 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, 2012. С. 31-35.

81. 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.

82. 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.

83. 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

84. 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.

85. Поверхностные пленки воды в дисперсных структурах / Под ред. Е.Д.Щукина. М.: Изд-во МГУ. 1988. 279 с.

86. Приклонский В.А., Чепик В.Ф. О компрессионных исследованиях глинистых пород // Труды Лаб. Гидрогеологических проблем АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 22.

87. Притчетт У. Получение надежных данных сейсморазведки. М.: Мир, 1999. 440 с.

88. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. М.: Знание, 1958. 64 с.

89. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур // Физико-химическая механика дисперсных структур. М.: Наука, 1966. С. 3-16.

90. Рекомендации по изучению напряженного состояния пород сейсмоакустическими методами / Под ред. А.И.Савича, Б.Д.Куюнджича. Москва-Белград: Изд. Гидропроект, 1986. 86 с.
91. Родионов В.Н., Сизов В.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М.: Недра, 1986. 301 с.
92. Руденко Е.С. К вопросу о биохимическом газообразовании в подземном пространстве Санкт-Петербурга // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. N 2. <http://www.georec.narod.ru/mag/2000n2/19/19.htm>
93. Савич А.И. Геофизические исследования скальных оснований гидротехнических сооружений. М.: Недра, 1986. 425 с.
94. Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами. М.: Недра, 1979. 214 с.
95. Самарин Е.Н., Бершов А.В., Фоменко И.К. Курс лекций по методам статистической обработки инженерно-геологической информации: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 196 с.
96. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г. Возможности сейсморазведки МОВ при инженерно-геологических изысканиях // Инженерная геология. Июнь 2007. С. 27-31.
97. Сипидин В.П., Сидоров И.И. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. М.: Стройиздат, 1963. 179 с.
98. Соболевский Ю.А. Механика грунтов. Минск: Высшая школа, 1986. 176 с.
99. Справочник по инженерной геологии / Под ред. М.В. Чуринова. 3-е издание. М.: Недра, 1981. 325 с.
100. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Исследование микроструктуры глинистых грунтов с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2008. N4. С. 1-6.
101. Соколова Т.Б., Булычев А.А., Лыгин И.В. и др. Интерпретация геофизических материалов. Учебное пособие. Тверь: Издательство ГЕРС, 2011. 208 с.
102. Сысоев А.П. Системный подход к решению проблемы учета неоднородности верхних частей разреза в методе отраженных волн // Геофизика 2008. N 3. С. 18-21.
103. Терцаги К. Теория механики грунтов / Пер с нем. Под ред. Н.А.Цытовича. М.: Государственное изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1961. 507 с.
104. Троицкая М.Н. Пособие к лабораторным работам по механике грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1967. 127 с.

105. Турчанинов И.А., Панин В.И. Инженерные геофизические методы определения и контроля напряженно-деформированного состояния массивов пород. Л.: Наука, 1975. 232 с.
106. Файзуллин И.С., Файзуллин Т.С. О преобладающем механизме затухания сейсмических волн в твердых горных породах // Геофизика 2008. № 6. С. 18-20.
107. Уайт Дж.Е. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986. 259 с.
108. Улицкий В.М., Шашкин А.Г. Геотехническое сопровождение реконструкции городов (обследование, расчеты, ведение работ, мониторинг). М.: Изд-во АСВ, 1999. 327 с.
109. Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Изд-во АСВ, 1994. 524 с.
110. Физико-химическая механика природных дисперсных систем / Под ред. Е.Д.Щукина, Н.В.Перцова, В.И.Осипова, Р.И.Злочевской. М.: Изд-во МГУ, 1985. 266 с.
111. Халафян А.А. Статистический анализ данных. Краснодар: КубГУ, 2005. 307 с.
112. Цытович Н.А. Механика грунтов, 4-е издание. М.: Гос. изд-во литературы по строительству архитектуре и строительным материалам, 1963. 638 с.
113. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). 2-е изд. М.: Высш. школа, 1973. 280 с.
114. Черемисов К.А., Кошелев А.Г. Сравнительная характеристика моренных отложений территории города Москвы // Сергеевские чтения. Выпуск 5. Молодежная сессия / Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2003. С. 59-63
115. Черкасов И.И., Шварев В.В. Грунтоведение Луны. М.: Наука, 1971. 232 с.
116. Чернов М.С., Кошелев А.Г., Соколов В.Н., Шлыков В.Г. Минеральный состав и морфологические особенности структурных элементов моренных отложений г. Москвы // Сергеевские чтения. Выпуск 5. Молодежная сессия / Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2003. С. 63-67.
117. Чернов М.С. Влияние минерального состава и микростроения моренных глинистых грунтов на их свойства (на примере плейстоценовых моренных отложений г. Москвы)/ Автореф. дисс. к.г.-м.н. М.: МГУ, 2007. 24 с.
118. Шаумян Л.В. Природа физико-механических свойств массивов горных пород. М.: Изд-во МГУ, 1988. 192 с.
119. Щекочихина Е.В., Олянский Ю.И. Зависимость скорости прохождения упругих волн от показателей свойств сарматских глин // Сергеевские чтения . Международный год планеты

Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии, и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2008. С. 501-506.

120. *Щукин Е.Д.* О некоторых задачах физико-химической теории прочности тонко-дисперсных пористых тел – катализаторов и сорбентов // *Кинетика и катализ.* 1965. Т. 6. N 4. С. 641-650.

121. *Щукин Е.Д.* Некоторые задачи физико-химической теории прочности дисперсных структур // *Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем.* Киев: «Наукова думка», 1981. С. 46-53.

122. *Щукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ, 1982. 352 с.

123. *Яминский В.В., Пчелин В.А., Амелина Е.А. Щукин Е.Д.* Коагуляционные контакты в дисперсных системах. М.: Химия, 1982. 185 с.

124. Albert M. Y. Ng, Albert T. Yeung, Peter K. K. Lee, and L. G. Tham. Design, Fabrication, and Assembly of a Large Oedometer // *Geotechnical Testing Journal.* July 2006. Volume 29, Issue 4.

125. ASTM D3148-96 Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression Test.

126. ASTM D 3999-91 (Reapproved) Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using a Cyclic Triaxial Apparatus.

127. ASTM D 5311-92 (Reapproved 2004) Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil.

128. ASTM D 2845-05 Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

129. ASTM D 2850-03a Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.

130. ASTM D 4767-04 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.

131. Rolf Larson. Investigation and load test in silty soils. Results from a series of investigations in silty soils in Sweden/ Report N54. 1997, p.260.

132. Rolf Larson. Investigation and load test in silty soils. Results from a series of investigations and load test field at Tornhill outside Lund in Southern Sweden/ Report N59. 2001, p.169.

133. Jian-Hua Yin, Chun-Man Cheng, Md. Kumruzzaman, and Wan-Huan. Zhou New mixed boundary, true triaxial loading device for testing three-dimensional stress–strain–strength behaviour of geomaterials // *Canadian Geotechnical Journal.* January 2010. Volume 47. Number 1. p. 1-15.

134. Long Michael and Shane Donohue. Characterization of Norwegian marine clays with combined shear wave velocity and piezocone cone penetration test (CPTU) data // Canadian Geotechnical Journal. July 2010. Volume 47. Number 7. p. 709-718.
135. Luiz F. Pires, Jaqueline A.R.Borges, Osny O.S.Bacchi. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution // Soil&Tillage Research. 110 (2010). p. 197-210.
136. Malehmir A., Andersson M., Lebedev M., Urosevach M., Mikhaltsevich V. Experimental estimation of velocities and anisotropy of a series of Swedish crystalline rocks and ores // Geophysical prospecting. January 2013. Volume 61. Issue 1. p. 153-167.
137. Osama A. Safaqah, Michael F. Riemer. The Elastomer Gage for Local Strain Measurement in Monotonic and Cyclic Soil Testing // Geotechnical Testing Journal. March 2007. Volume 30, Issue 2.
138. Osman Sivrikaya and Ergun Togro. Measurement of Side Friction Between Specimen and Consolidation Ring with Newly Designed Oedometer Cell // Geotechnical Testing Journal, January 2006. Volume 29. Issue 1.
139. Paul M. Santi, Jason E. Holschen, Richard W. Stephenson/ Improving Elastiv Modulus Measurements for Rock Based on Geology // Environmental&Engineering Geoscience, Vol. VI, N 4, November 2000. P 333-336.
140. Singh Y. Phase distortion and time shifts due to seismic attenuation and application to wellties // First break. 2008. Vol.26, N 2. p. 8-15.
141. Yasar E., Erdogan Y. Correlation sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 41 (2004). P. 871-875.
142. Zeljko Cabarkapa and Teresa Cuccjvillo. Automated Triaxial Apparatus for Testing Unsaturated Soils // Geotechnical Testing Journal. January 2006. Volume 29, Issue 1.
<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=JGGEFK000125000003000179000001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=no>

Фондовая литература

143. Апаркина А.А. Исследование закономерностей формирования состава и инженерно-геологических свойств юрских глинистых пород (г. Москва). Магистерская работа. М., МГУ, кафедра инженерной и экологической геологии. 2002. 101 с.

144. Вознесенский Е.А. Отчет о научно-исследовательских работах по теме № 01.2.006 07303 «Исследование природы и закономерностей затухания волн напряжений в грунтах». МГУ. Геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии. М. 2010 г.
145. Определение модуля деформации грунтов методом нагружения штампа. М. СТП. МОСГОРГЕОТРЕСТ, 2009. 42 с.
146. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на площадке проектируемого строительства ПС 220/20 кВ «Золотаревская» по адресу: г. Москва, Новолужнецкий проезд. ЗАО «Инжэко центр». М. 2008.
147. Отчет о дополнительных инженерно-геологических изысканиях для строительства многофункционального торгово-развлекательного комплекса с подземной автостоянкой по адресу: г. Москва, Москворечье-Сабурово, пересечение проектируемого проезда №3888 и ул. Москворечье. ЗАО «Инжэко центр». М. 2008.
148. Отчет об инженерно-геологических изысканиях для проектирования зданий, сооружений и объектов инженерного обеспечения по адресу: Московская область, Истринский район, Обушковское с.п., участок примерно в 100м по направлению на север от д. Аносино. ЗАО «Инжэко центр». М. 2010 г.
149. Отчет об инженерно-геологических изысканиях для проектирования зданий и сооружений на участке строительства ГТЭС «Щербинка» по адресу: г. Москва, ЮЗАО, коммунальная зона Щербинка, район Южное Бутово. ЗАО «Инжэко центр». М. 2011 г.
150. Отчет об инженерно-геологических изысканиях для проекта реконструкции тепломагистрали №4 от ТЭЦ-23 между камерами т.11 (в ст. к408) – т.2 (в ст. к410) 6-й экспл. р-н ОАО «МТК» по адресу: г. Москва, ВАО, ул. В. Первомайская, Измайловский б-р // Гл. геолог Никулаева Л.В. М.: ООО «Карбон», 2011.
151. Отчет об инженерно-геологических условиях участка строительства Телецентра и Медиа-парка ОАО «Первый канал» по адресу: г. Москва ЦАО, Олимпийский проспект, вл. 16. ООО «Карбон». М. 2009.
152. Таракановский М.К. Влияние влажности и дисперсности на уплотняемость глинистых грунтов. М., МГУ, кафедра инженерной и экологической геологии. 2011. 34 с.
153. Тырина Т.С. Влияние влажности на скорости упругих волн в глинистых грунтах. М., МГУ, кафедра инженерной и экологической геологии. 2012. 72 с.
154. Измерительно-вычислительный комплекс АСИС. www.geoteck.ru.

Результаты исследования оптимальных нагрузки (рис. 1) и влажности (рис. 2) уплотнения модельных грунтов

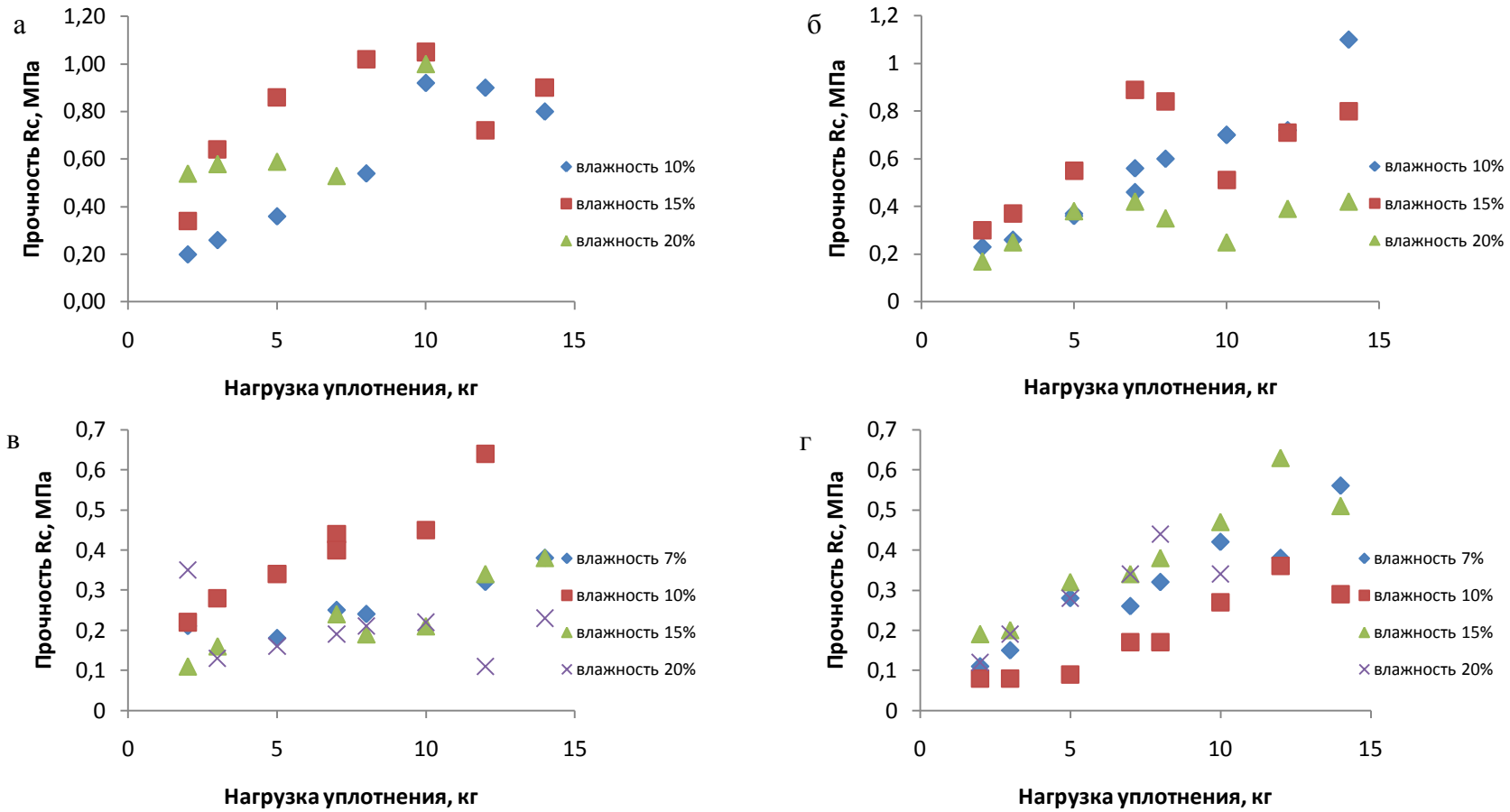


Рис.1. Влияние нагрузки предварительного уплотнения на прочность образцов при одноосном сжатии: а – суглинков тяжелых М1; б – суглинков легких М2; в – супесей М3; г – супесей М4 (при разной начальной влажности)

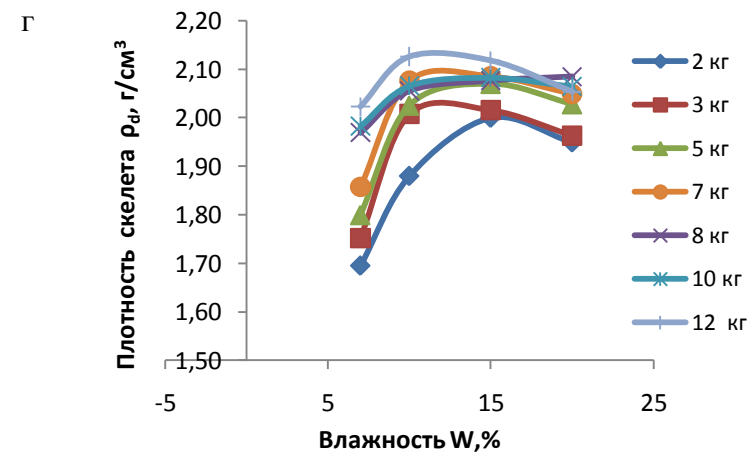
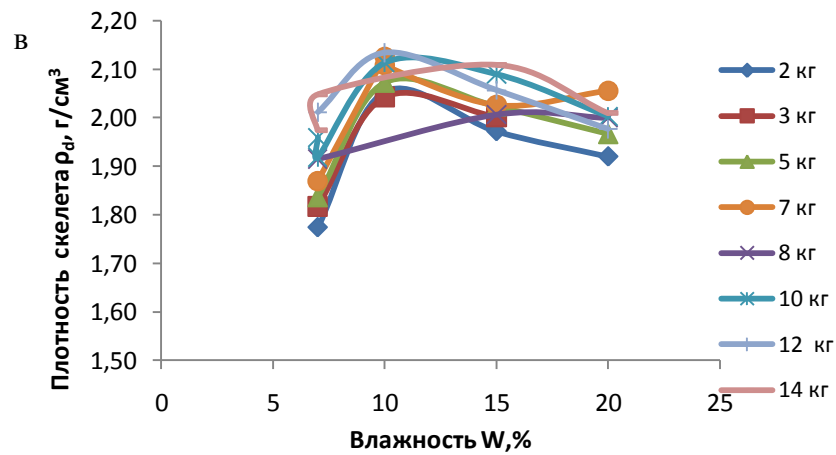
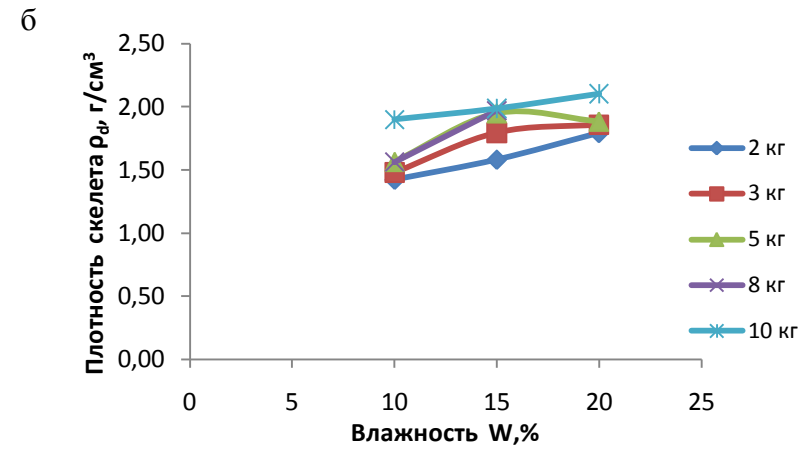
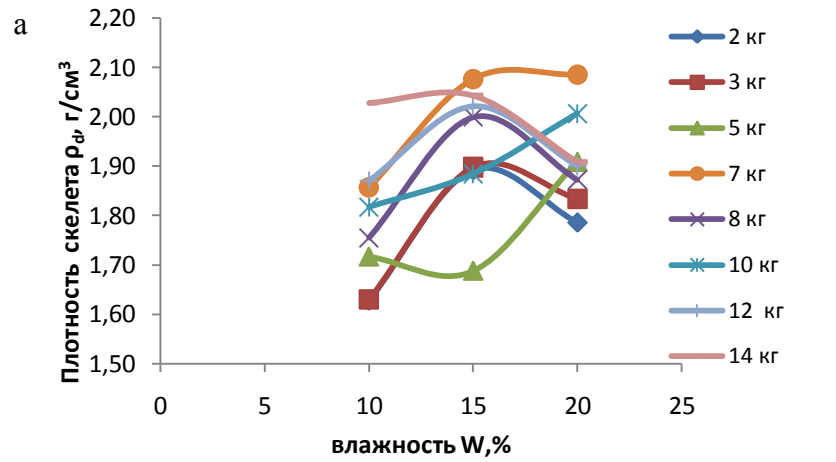
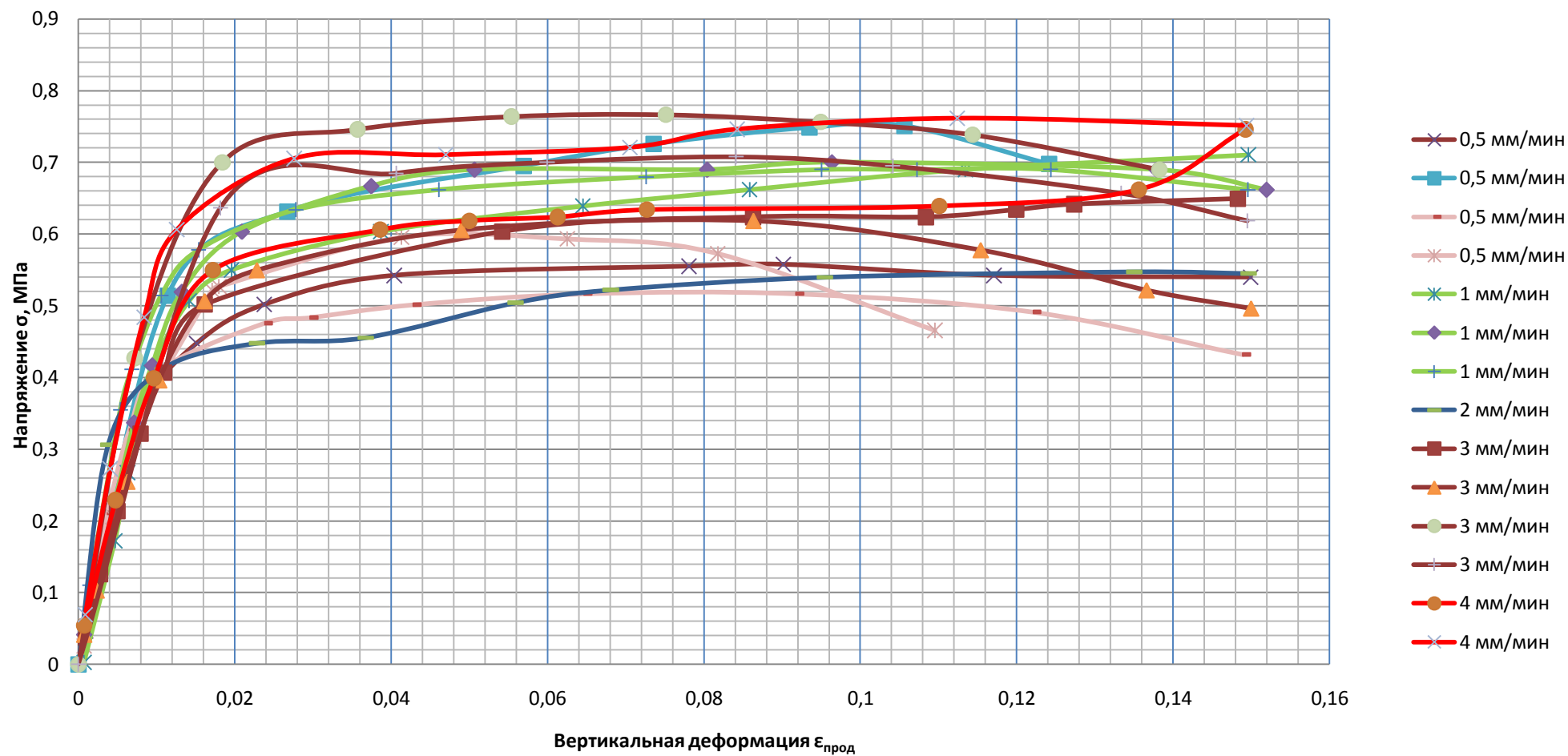


Рис. 2. Графики для определения оптимальной влажности уплотнения грунтов: а – суглинков тяжелых М1; б – суглинков легких М2; в – супесей М3; г – супесей М4 (при разных нагрузках уплотнения)

Взаимосвязь напряжений и деформаций модельного суглинка при разных скоростях нагружения



Расчетные и теоретические значения критерия Уилко-Шапиро, математические ожидания и стандартные отклонения природных (А) и модельных (Б) грунтов

| А. Показатели строения и свойств природных грунтов | Четвертичные грунты (n=25) | | | | Юрские грунты (n=10) | | | |
|---|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | рас- четное | теоре- тичес- кое | матем. ожидание m_x | станд. откл. σ_x | расчетное | теорети- ческое | матем. ожидание m_x | станд. откл. σ_x |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Влажность W, % | 0,87 | 0,92 | 12 | 0,8 | 0,91 | 0,84 | 28 | 1,8 |
| Нижний предел пластичности W_p , % | 0,89 | | 11 | 1,5 | >0,84 | | 29 | 2,7 |
| Верхний предел пластичности W_L , % | 0,85 | | 20 | 3,5 | >0,84 | | 43 | 4,3 |
| Число пластичности I_p , ед. | 0,87 | | 9 | 2,4 | 0,69 | | 14 | 5,6 |
| Показатель консистенции I_L , ед. | 0,92 | | 0,17 | 0,20 | 0,79 | | -0,17 | 0,25 |
| Плотность ρ , г/см ³ | 0,87 | | 2,14 | 0,04 | 0,82 | | 1,75 | 0,04 |
| Плотность твердых частиц ρ_s , г/см ³ | 0,95 | | 2,80 | 0,05 | >0,84 | | 2,77 | 0,08 |
| Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | 0,92 | | 1,91 | 0,04 | >0,84 | | 1,37 | 0,04 |
| Пористость n, % | 0,92 | | 32 | 2 | >0,84 | | 50 | 2 |
| Коэффициент пористости e, ед. | 0,92 | | 0,47 | 0,04 | 0,78 | | 1,02 | 0,10 |
| Степень влажности S_r , д.е. | 0,91 | | 0,74 | 0,06 | >0,84 | | 0,75 | 0,05 |
| Гигроскопическая влажность W_g , % | 0,89 | | 1 | 0,4 | >0,84 | | 4,6 | 1,32 |
| Макс.гигроскопич. влажность W_{mg} , % | 0,87 | | 3,84 | 0,9 | >0,84 | | - | - |
| Скорость продольных волн V_p , м/с | 0,85 | | 1715 | 196 | >0,84 | | 1378 | 257 |
| Скорость поперечных волн V_s , м/с | 0,92 | | 304 | 64 | >0,84 | | 283 | 33 |
| Отношение скоростей V_s/V_p | 0,91 | | 0,19 | 0,05 | >0,84 | | 0,21 | 0,02 |
| Прочность на сжатие R_c , МПа | 0,91 | | 0,32 | 0,13 | - | | - | - |
| Средний диаметр частиц d_{50} , мм | 0,88 | | 0,047 | 0,036 | 0,72 | | 0,026 | 0,021 |
| $M_c < 0,001$ мм, % | 0,89 | | 24 | 7 | >0,84 | | 25 | 9 |
| $M_c < 0,005$ мм, % | 0,89 | | 30 | 8 | >0,84 | | 45 | 16 |

Продолжение приложения 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|------|---|------|------|-------|---|------|-------|
| Мс<0,01 мм, % | 0,89 | | 39 | 9 | >0,84 | | 58 | 14 |
| Модуль компресс. деформации E_k , МПа | 0,87 | | 11,5 | 4,3 | 0,88 | | 23,7 | 10 |
| Модуль общей деформации (по данным компрессии) E_o^k , МПа | 0,86 | | 4,1 | 1,5 | >0,84 | | 8,3 | 4 |
| Начальный модуль сжатия E_n , МПа | 0,91 | | 11 | 5 | - | | - | - |
| Относительный модуль деформации $E_{отн}$, МПа | 0,91 | | 5 | 2 | - | | - | - |
| Коэффициент поперечн. расширения μ_o | 0,91 | | 0,38 | 0,05 | - | | - | - |
| Динамич. модуль упр-ти E_d , МПа | 0,92 | | 634 | 211 | | | 423 | 100 |
| Коэффициент Пуассона μ | 0,83 | | 0,48 | 0,01 | 0,61 | | 0,48 | 0,001 |

Примечание: n-количество значений.

| Б. Показатели свойств модельных грунтов | Суглинки М1 (n=27) | | | | Суглинки М2 (n=20) | | | | Супеси М3 (n=32) | | | | Супеси (n=30) | | | |
|---|--------------------|---------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|---------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------------|-----------------|
| | расчетное | теоретическое | мат. ожидание mх | станд. откл. σх | расчетное | теоретическое | мат. ожидание mх | станд. откл. σх | расчетное | теоретическое | мат. ожидание mх | станд. откл. σх | расчетное | теоретическое | мат. ожидание mх | станд. откл. σх |
| Плотность ρ, г/см ³ | 0,89 | 0,92 | 2,05 | 0,14 | 0,87 | 0,90 | 2,01 | 0,29 | 0,85 | 0,93 | 2,16 | 0,14 | 0,78 | 0,92 | 2,16 | 0,12 |
| Плотность скелета грунта ρ _d , г/см ³ | 0,91 | | 1,86 | 0,11 | 0,90 | | 1,83 | 0,26 | 0,92 | | 2,00 | 0,10 | 0,83 | | 2,00 | 0,09 |
| Пористость n, % | 0,91 | | 30 | 4 | 0,90 | | 32 | 10 | 0,93 | | 25 | 4 | 0,83 | | 24 | 3 |
| Коэффициент пористости e, ед. | 0,90 | | 0,45 | 0,09 | 0,87 | | 0,50 | 0,24 | 0,92 | | 0,34 | 0,08 | 0,79 | | 0,33 | 0,06 |
| Влажность W, % | 0,91 | | 10 | 3 | 0,84 | | 10 | 2 | 0,91 | | 8 | 2 | 0,87 | | 8 | 2 |
| Степень влажности S _r , д.е. | 0,78 | | 0,63 | 0,19 | 0,90 | | 0,64 | 0,25 | 0,93 | | 0,66 | 0,22 | 0,88 | | 0,67 | 0,21 |
| Показатель консистенции I _L , ед. | 0,91 | | -1,3 | 0,32 | 0,83 | | -1,4 | 0,17 | 0,80 | | -1,5 | 0,34 | 0,87 | | -1,6 | 0,31 |
| Скорость продольных волн V _p , м/с | 0,88 | | 1439 | 406 | 0,89 | | 1270 | 602 | 0,92 | | 1181 | 361 | 0,92 | | 1129 | 215 |
| Скорость поперечных волн V _s , м/с | 0,91 | | 380 | 78 | 0,90 | | 361 | 120 | 0,93 | | 361 | 103 | 0,92 | | 318 | 70 |
| Отношение скоростей V _s /V _p | 0,89 | | 0,29 | 0,10 | 0,90 | | 0,33 | 0,12 | 0,93 | | 0,32 | 0,08 | 0,91 | | 0,29 | 0,07 |
| Начальный модуль сжатия E _n , МПа | 0,91 | | 47 | 24 | 0,90 | | 58 | 37 | 0,91 | | 37 | 25 | 0,90 | | 39 | 14 |
| Относительный модуль сжатия E _{отн} , МПа | 0,91 | | 76 | 32 | 0,90 | | 77 | 39 | 0,92 | | 59 | 34 | 0,92 | | 48 | 24 |
| Коэффициент поперечного расширения μ ₀ | 0,92 | | 0,34 | 0,05 | 0,90 | | 0,36 | 0,08 | 0,92 | | 0,37 | 0,05 | 0,92 | | 0,45 | 0,07 |
| Динамич. модуль упр-ти E _д , МПа | 0,90 | | 897 | 389 | 0,89 | | 836 | 523 | 0,91 | | 868 | 429 | 0,92 | | 661 | 260 |
| Коэффициент Пуассона μ | 0,79 | | 0,45 | 0,04 | 0,77 | | 0,42 | 0,07 | 0,81 | | 0,44 | 0,04 | 0,81 | | 0,45 | 0,03 |
| Прочность на сжатие R _c , МПа | 0,91 | | 0,51 | 0,23 | 0,90 | | 0,66 | 0,27 | 0,92 | | 0,29 | 0,14 | 0,92 | | 0,27 | 0,12 |

Примечание: n-количество значений.

Характеристика гранулометрического состава грунтов

| № образца, модели | Геологический индекс | Содержание фракций (мм), % | | | | | | | | | | d ₅₀ , мм | Название грунта по ГОСТ 25100-2011 |
|----------------------------------|----------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|--------|-----------|--------|----------------------|------------------------------------|
| | | >0,5 | 0,5-0,25 | 0,25-0,1 | 0,1-0,05 | песчаные | 0,05-0,01 | 0,01-0,005 | <0,005 | пылеватые | <0,001 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Суглинок легкий пылеватый (M1) | - | 1 | 14 | 14 | 8 | 37 | 26 | 7 | 12 | 45 | 18 | 0,013 | суглинок тяжелый пылеватый |
| Суглинок легкий песчанистый (M2) | | 3 | 15 | 18 | 12 | 48 | 16 | 7 | 13 | 36 | 16 | 0,025 | суглинок легкий песчанистый |
| Супесь песчанистая (M3) | | 3 | 41 | 13 | 3 | 60 | 15 | 7 | 4 | 26 | 14 | 0,05 | супесь песчанистая |
| Супесь песчанистая (M4) | | 5 | 34 | 21 | 8 | 68 | 6 | 6 | 8 | 20 | 12 | 0,1 | супесь песчанистая |
| Щ.с-123 (13,2) | gQ _{rdns} | 4 | 11 | 18 | 19 | 52 | 4 | 8 | 4 | 16 | 32 | 0,050 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123(13,6) | | 4 | 12 | 21 | 10 | 47 | 17 | 4 | 8 | 29 | 24 | 0,032 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123 (13,8) | | 5 | 11 | 30 | 1 | 47 | 9 | 12 | 4 | 25 | 28 | 0,030 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123 (14,0) | | 1 | 10 | 16 | 13 | 40 | 11 | 13 | 4 | 28 | 32 | 0,010 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-123 (14,2) | | 2 | 10 | 21 | 2 | 35 | 29 | 4 | 8 | 41 | 24 | 0,020 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-123 (14,7) | | 3 | 10 | 18 | 9 | 40 | 12 | 8 | 12 | 32 | 28 | 0,080 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-123(14,9) | | 3 | 7 | 20 | 5 | 35 | 12 | 13 | 16 | 41 | 24 | 0,008 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-123(15,7) | | 5 | 8 | 14 | 18 | 45 | 19 | 16 | 3 | 38 | 17 | 0,030 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123(16,0) | | 3 | 10 | 20 | 7 | 40 | 12 | 12 | 8 | 32 | 28 | 0,012 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-123(16,4) | | 3 | 12 | 26 | 19 | 60 | 4 | 4 | 4 | 12 | 28 | 0,070 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123 (17,2) | | 3 | 16 | 32 | 13 | 64 | 8 | 4 | 4 | 16 | 20 | 0,100 | суглинок легкий песчанистый |
| Щ.с-123 (18,0) | | 3 | 16 | 34 | 19 | 72 | 12 | 4 | 4 | 20 | 8 | 0,110 | супесь песчанистая |
| Щ.с-123 (18,7) | | 1 | 13 | 33 | 13 | 60 | 16 | 8 | 4 | 28 | 12 | 0,090 | супесь песчанистая |
| Щ.с-120(14,2) | | 7 | 10 | 12 | 14 | 43 | 19 | 8 | 8 | 35 | 22 | 0,030 | суглинок легкий песчанистая |
| Щ.с-120 (14,3) | | 3 | 10 | 18 | 9 | 40 | 20 | 4 | 4 | 28 | 32 | 0,020 | суглинок легкий пылеватый |
| Щ.с-120 (14,7) | | 4 | 11 | 18 | 7 | 40 | 20 | 8 | 4 | 32 | 28 | 0,013 | суглинок легкий пылеватый |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
|---------------------|------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Щ.с-120 (15,0) | | 7 | 10 | 16 | 15 | 48 | 6 | 6 | 14 | 26 | 26 | 0,029 | суглинок легкий песчанистый | |
| Щ.с-120(15,4) | | 5 | 9 | 12 | 4 | 30 | 19 | 14 | 16 | 49 | 21 | 0,010 | суглинок легкий пылеватый | |
| Щ.с-120(15,8) | | 6 | 15 | 11 | 12 | 44 | 16 | 11 | 3 | 30 | 26 | 0,027 | суглинок легкий песчанистый | |
| Щ.с-120(16,0) | | 7 | 15 | 26 | 9 | 57 | 8 | 3 | 5 | 16 | 27 | 0,071 | суглинок легкий песчанистый | |
| Щ.с-120 (18,0) | | 3 | 14 | 30 | 5 | 52 | 12 | 4 | 8 | 24 | 24 | 0,075 | супесь песчанистая | |
| Щ.с-120(18,5) | | 4 | 18 | 32 | 8 | 62 | 5 | 16 | 5 | 26 | 12 | 0,120 | суглинок тяжелый песчанистый | |
| 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 | | 3 | 4 | 8 | 10 | 25 | 11 | 25 | 39 | 75 | | 0,007 | суглинок легкий пылеватый | |
| 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 | | 3 | 10 | 12 | 12 | 37 | 15 | 9 | 39 | 63 | | 0,013 | суглинок легкий пылеватый | |
| 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 | | 3 | 9 | 13 | 6 | 31 | 18 | 4 | 47 | 69 | | 0,009 | суглинок тяжелый песчанистый | |
| 7.1, 7.2, 8.1, 8.2 | | 4 | 12 | 15 | 9 | 40 | 32 | 12 | 16 | 60 | | 0,028 | суглинок тяжелый песчанистый | |
| 9.1, 9.2, 10.1,10.2 | 4 | 10 | 14 | 18 | 46 | 10 | 13 | 31 | 54 | | 0,025 | суглинок легкий пылеватый | | |
| с-9(19,5-20,0) | J _{30x} | | | 3 | 1 | 4 | 68 | 8 | 4 | 80 | 16 | 0,017 | глина легкая пылеватая | |
| с-9(20,5-21,0) | | | | 1 | 6 | 7 | 35 | 9 | 12 | 66 | 27 | 0,008 | суглинок легкий пылеватый | |
| с-5(18,5-19,0) | | | | 1 | 1 | 2 | 38 | 11 | 12 | 61 | 37 | 0,005 | суглинок тяжелый пылеватый | |
| с-11(18,0-18,5) | | | | 1 | 3 | 4 | 28 | 8 | 32 | 68 | 28 | 0,003 | суглинок тяжелый пылеватый | |
| А.с-23(24,0) | | | | | 1 | 1 | 28 | 8 | 24 | 60 | 39 | 0,022 | глина легкая пылеватая | |
| А.с-23(24,3) | | | | | 2 | 3 | 5 | 42 | 34 | 11 | 87 | 8 | 0,012 | суглинок легкий пылеватый |
| А.с-23(24,7) | | | 1 | 3 | 7 | 11 | 23 | 7 | 32 | 62 | 27 | 0,150 | глина легкая пылеватая | |
| А.с-23(25,2) | | | | | 5 | 5 | 27 | 18 | 27 | 72 | 23 | 0,010 | суглинок легкий пылеватый | |
| А.с-23(25,8) | | | | | 4 | 4 | 28 | 12 | 32 | 72 | 24 | 0,015 | суглинок тяжелый пылеватый | |
| А.с-23(27,0) | | | | | 10 | 10 | 35 | 11 | 16 | 62 | 28 | 0,007 | суглинок легкий пылеватый | |
| А.с-23(26,0) | | | | | 1 | 24 | 25 | 33 | 14 | 9 | 56 | 19 | 0,008 | суглинок легкий пылеватый |
| А.с-23(27,6) | | | | | 2 | 10 | 12 | 44 | 12 | 16 | 72 | 16 | 0,013 | глина легкая пылеватая |
| А.с-23(30,0) | | | | | 1 | 5 | 6 | 23 | 16 | 20 | 59 | 35 | 0,050 | суглинок легкий пылеватый |

Примечание: d_{50} – средний диаметр частиц, мм.

Интегральные кривые гранулометрического состава исследованных образцов грунта

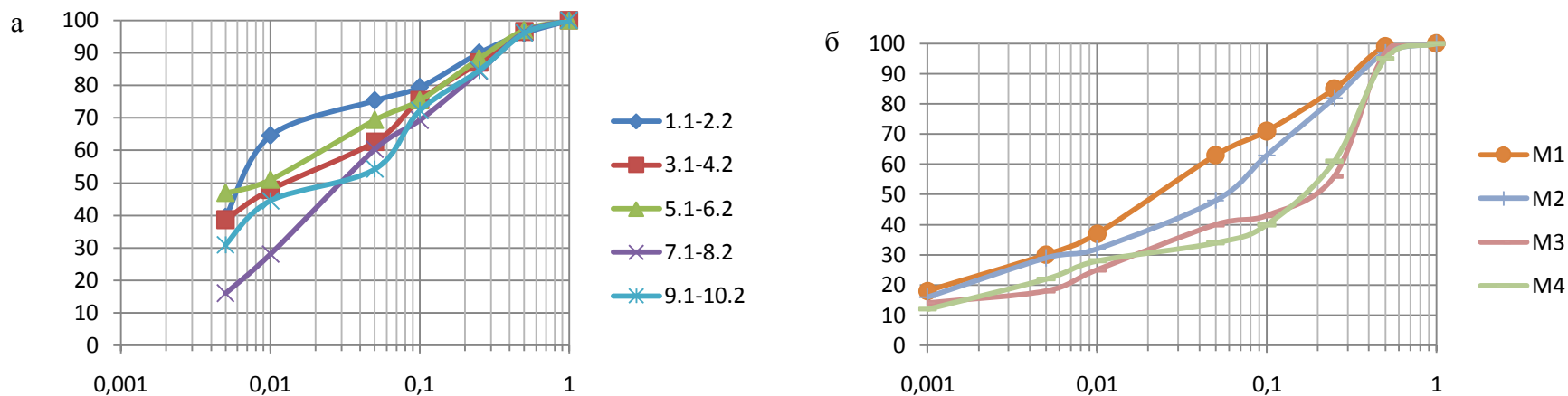


Рис. 1. Интегральные кривые гранулометрического состава образцов грунтов 1.1-10.2 и модельных грунтов М1-М4

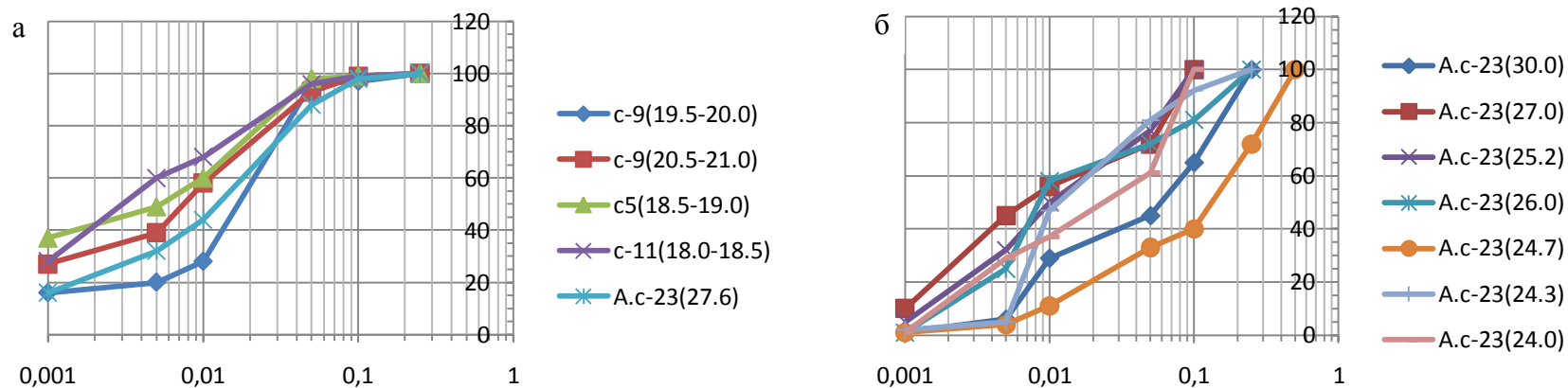


Рис. 2. Интегральные кривые гранулометрического состава образцов юрских суглинков и глин А.с-23, с-9, с-5, с-11

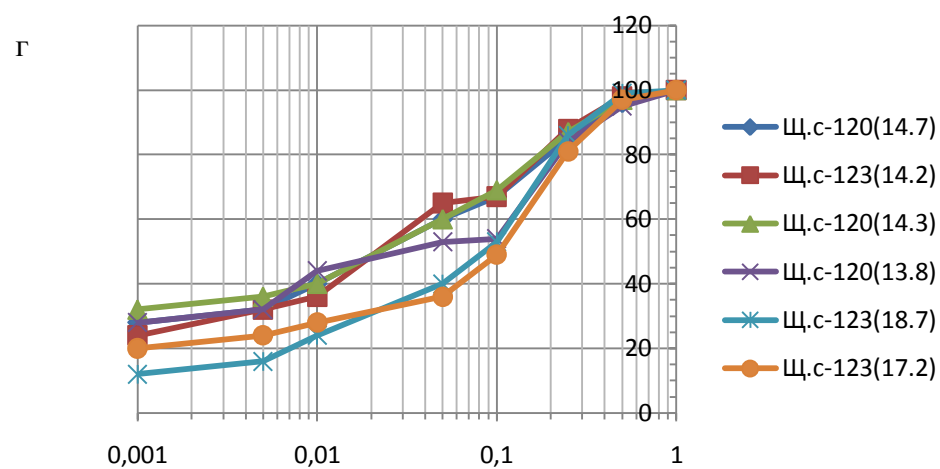
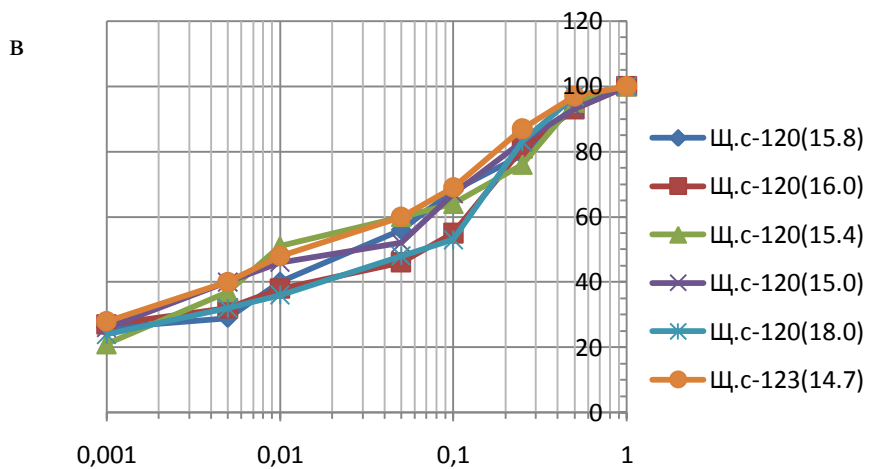
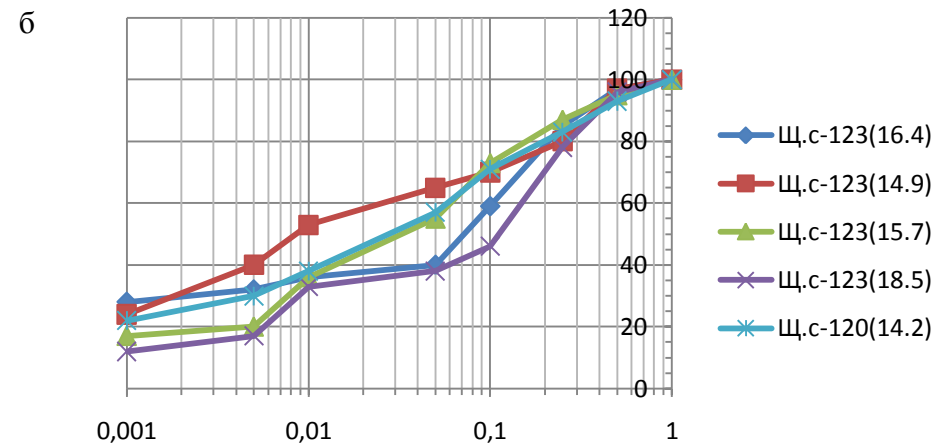
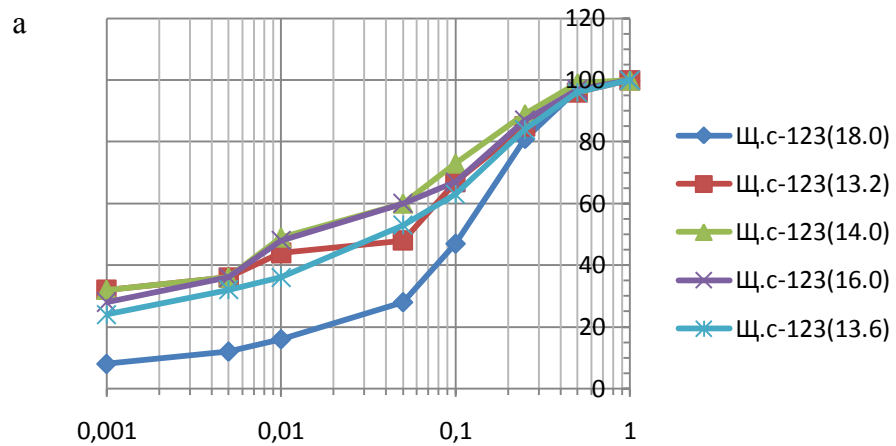


Рис. 3. Интегральные кривые гранулометрического состава образцов четвертичных суглинков Щ.с-120, Щ.с-123

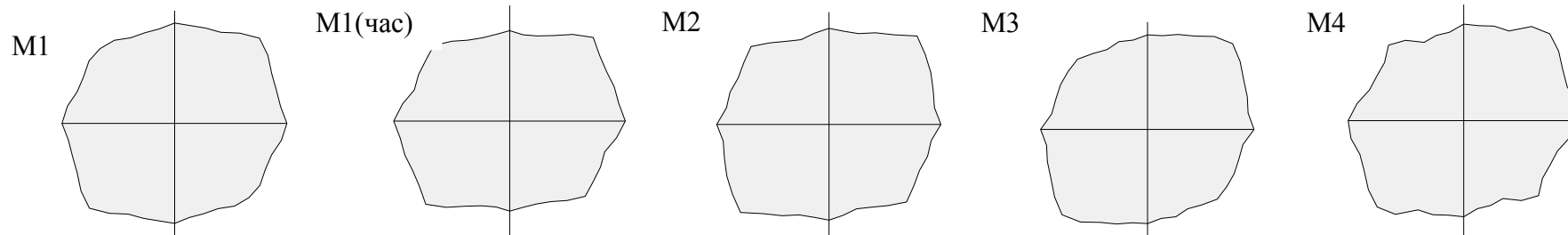
Количественные характеристики микростроения модельных грунтов

| Образец | Влажность | Микроморфологические параметры | Категории пор | | | | | | Общая / разобшенная пористость n/n _{разобщ.} , % | Коэффициент анизотропии K _a , %; параметр дисперсности D; параметр анизотропии A |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|--|---|-------------------------------------|------------------------|--|---|
| | | | межчастичные D ₁ <0.1 мкм | межультрамикроагрегатные D ₂ 0.1-1.0 мкм | межмикроагрегатные D ₃ 1.0-10 мкм | межагрегатные D ₄ 10-100 мкм | межзернистые D ₅ >0.1 мм | D _{max} , мкм | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Суглинки М1 | ~W _{ММВ} | содержание пор N, % | 0,5 | 6,9 | 34,5 | 58,1 | - | 88 | 35/31 | K _a =17,14 D=1,14 A=1,09 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,33-0,50 | | | | | | | |
| Суглинки М1 (1 час) | | содержание пор N, % | 0,2 | 7,3 | 37,5 | 54,3 | 0,7 | 109 | 37/28 | K _a =22,48 D=1,24 A=1,29 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,25-0,33; 0,41-0,50; 0,83-0,91 | | | | | | | |
| Суглинки М2 | | содержание пор N, % | 0,6 | 6,1 | 43,0 | 49,6 | 0,7 | 107 | 33/27 | K _a =14,47 D=1,01 A=1,32 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,25-0,33; 0,41-0,50; 0,58-0,75 | | | | | | | |
| Супеси М3 | | содержание пор N, % | 0,4 | 13,6 | 33,5 | 50,1 | 2,4 | 124 | 32/17 | K _a =20,52 D=1,29 A=1,08 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,16-0,25; 0,41-0,50; 0,83-0,91 | | | | | | | |
| Супеси М4 | содержание пор N, % | 0,1 | 7,9 | 39,9 | 50,3 | 1,8 | 128 | 35/20 | K _a =16,38 D=1,43 A=1,12 | |
| | коэффициент формы K _f | 0,25-0,41; 0,58-0,66; 0,75-0,83 | | | | | | | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----|------|------|-----|-----|---------|---|
| Суглинки М1 | ~W _{mg} | содержание пор N, % | 0,7 | 4,2 | 24,5 | 70,6 | - | 90 | 32/24 | K _a =13,04 D=1,24 A=1,08 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,16-0,33; 0,50-0,66 | | | | | | | |
| Суглинки М1 (1 час) | | содержание пор N, % | 0,6 | 3,5 | 24,5 | 69,4 | 2,0 | 115 | 33/24 | K _a =20,53 D=1,39 A=1,31 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,16-0,33; 0,41-0,50; 0,66-0,75 | | | | | | | |
| Суглинки М2 | | содержание пор N, % | 0,3 | 3,4 | 39,5 | 53,2 | 3,6 | 131 | 27/25 | K _a =17,62 D=1,12 A=1,26 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,33-0,41; 0,58-0,66 | | | | | | | |
| Супеси М3 | | содержание пор N, % | 0,1 | 1,9 | 19,6 | 73,6 | 4,8 | 175 | 33/22,3 | K _a =18,45 D=1,37 A=1,15 |
| | | коэффициент формы K _f | 0-0,08; 0,16-0,25; 0,75-0,83 | | | | | | | |
| Супеси М4 | | содержание пор N, % | 0,2 | 3,8 | 26,7 | 63,0 | 6,3 | 174 | 34/27 | K _a =21,03 D=1,13 A=1,09 |
| | | коэффициент формы K _f | 0,16-0,25; 0,33-0,41; 0,58-0,66 | | | | | | | |

Примечания: W_{ммв} и W_{mg} – влажности максимальной молекулярной влагоемкости и максимальная гигроскопическая.

Розы ориентации твердых структурных элементов при влажности близкой W_{ммв}



Влажностные характеристики грунтов

| № образца | Геологический индекс | Глубина отбора, м | Влажности, % | | | | | Число пластичности, I_p | Показатель консистенции, I_c | Название грунта |
|----------------|----------------------|-------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| | | | Гигроскопическая, W_G | макс. гигроскопическая, $W_{MГ}$ | макс. молек. влагоемкость, $W_{ММВ}$ | нижнего предела пластичности, W_p | верхнего предела пластичности, W_L | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Щ.с-123 (13,2) | gQ ₁ dns | 13,2-13,4 | 1,4 | 4,6 | 9 | 12 | 21 | 9 | 0,22 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-123(13,6) | | 13,6-13,8 | 1,8 | 4,9 | 9 | 13 | 21 | 8 | -0,13 | суглинок твердый |
| Щ.с-123(13,8) | | 13,8-14,0 | 1,1 | 5 | 11 | 12 | 19 | 7 | 0,00 | супесь твердая |
| Щ.с-123 (14,0) | | 14,0-14,2 | 1,8 | 4,7 | 10 | 12 | 21 | 9 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-123 (14,2) | | 14,2-14,7 | 1,8 | 5 | 10,5 | 13 | 21 | 8 | -0,13 | суглинок твердый |
| Щ.с-123 (14,7) | | 14,7-14,9 | 1,6 | 4,5 | 9 | 12 | 20 | 8 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-123(14,9) | | 14,9-15,1 | 0,2 | 4,4 | 10 | 12 | 21 | 9 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-123(15,7) | | 15,7-15,9 | 1,1 | 4,4 | 10 | 12 | 22 | 10 | 0,10 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-123(16,0) | | 16,0-16,2 | 1,4 | 4,3 | 10 | 10 | 19 | 9 | 0,22 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-123(16,4) | | 16,4-16,6 | 0,9 | 3,5 | 9 | 10 | 18 | 8 | 0,13 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-123(17,2) | | 17,2-17,4 | 1,3 | 2,6 | 8 | 16 | 25 | 9 | -0,56 | супесь твердая |
| Щ.с-123 (18,0) | | 18,0-18,2 | 1,0 | 2,5 | 8 | 9 | 16 | 7 | 0,29 | супесь пластичная |
| Щ.с-123(18,3) | | 18,3-18,5 | 1,1 | 2,5 | 9 | 9 | 17 | 8 | 0,38 | суглинок тугопластичный |
| Щ.с-123(18,7) | | 18,7-18,9 | 1,2 | 2,6 | 8 | 10 | 16 | 6 | 0,50 | супесь пластичная |
| Щ.с-120 (14,0) | | 14,0-14,2 | 1,8 | 5,2 | 11 | 13 | 22 | 9 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-120(14,2) | | 14,2-14,6 | 1,0 | 3,8 | 10 | 10 | 22 | 12 | 0,25 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-120 (14,3) | | 14,3-14,5 | 1,2 | 4 | 10 | 11 | 20 | 9 | 0,22 | суглинок полутвердый |
| Щ.с-120 (14,7) | | 14,7-14,9 | 1,7 | 4,2 | 9 | 12 | 23 | 11 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-120 (15,0) | | 15,0-15,2 | 1,3 | 4 | 10 | 12 | 22 | 10 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-120(15,4) | | 15,4-15,6 | 1,2 | 4,3 | 10 | 11 | 21 | 10 | 0,10 | суглинок полутвердый |

Продолжение приложения 7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------------------------------|---------------------|-----------|-----|-----|----|----|----|----|-------|--------------------------|
| Щ.с-120(15,8) | gQ ₁ dns | 15,8-16,0 | 1,1 | 4,5 | 10 | 12 | 24 | 12 | 0,00 | суглинок твердый |
| Щ.с-120(16,0) | | 16,2-16,2 | 0,8 | 2,8 | 8 | 9 | 17 | 8 | 0,50 | суглинок тугопластичный |
| Щ.с-120 (16,5) | | 16,5-16,7 | 1,2 | 2,6 | 8 | 9 | 17 | 8 | 0,63 | суглинок мягкопластичный |
| Щ.с-120 (18,0) | | 18,0-18,2 | 1,0 | 2,7 | 9 | 11 | 16 | 5 | 0,40 | супесь пластичная |
| Щ. с-120(18,5) | | 18,5-18,7 | 0,7 | 2,5 | 9 | 8 | 24 | 16 | 0,29 | суглинок тугопластичный |
| 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 | | 9,5-9,7 | 2,4 | 7 | 20 | 33 | 44 | 11 | -1,18 | суглинок твердый |
| 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 | | 8,8-9,0 | 2,1 | 6 | 15 | 25 | 35 | 10 | -0,74 | суглинок твердый |
| 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 | | 7,0-7,2 | 2,3 | 7 | 16 | 26 | 34 | 8 | -0,96 | суглинок твердый |
| 7.1, 7.2, 8.1, 8.2 | | 7,0-7,2 | 2,0 | 7 | 16 | 22 | 38 | 16 | 0,15 | суглинок полутвердый |
| 9.1, 9.2, 10.1, 10.2 | | 6,0-6,2 | 2,1 | 7 | 17 | 24 | 38 | 14 | -0,13 | суглинок твердый |
| Суглинки тяжелые пылеватые (M1) | - | - | 0,8 | 3 | 9 | 15 | 28 | 13 | <0 | суглинок твердый |
| Суглинки легкие песчанистые (M2) | | - | 0,7 | 2 | 8 | 12 | 20 | 8 | <0 | суглинок твердый |
| Супеси песчанистые (M3) | | - | 0,3 | 1 | 7 | 12 | 18 | 6 | <0 | супесь твердая |
| Супеси песчанистые (M4) | | - | 0,2 | 1 | 6 | 11 | 17 | 6 | <0 | супесь твердая |
| с-9(19,5-20,0) | J _{30x} | 19,5-20,0 | 3,5 | 9 | 23 | 24 | 42 | 18 | 0,00 | глина твердая |
| с-9(20,5-21,0) | | 20,5-21,0 | 3,9 | 9 | 24 | 28 | 40 | 12 | 0,08 | суглинок полутвердый |
| с-5(18,5-19,0) | | 18,5-20,0 | 5,0 | 12 | 22 | 30 | 43 | 13 | 0,00 | суглинок твердый |
| с-11(18,0-18,5) | | 18,0-18,5 | 3,2 | 9 | 23 | 29 | 43 | 14 | 0,00 | суглинок твердый |
| А.с-23(23,3) | | 23,3-23,5 | 3,5 | 9 | 23 | 28 | 39 | 11 | -0,18 | суглинок твердый |
| А.с-23(24,0) | | 24,0-24,2 | 5,6 | 12 | 25 | 26 | 44 | 18 | 0,00 | глина твердая |
| А.с-23(24,3) | | 24,3-24,5 | 5,5 | 11 | 22 | 29 | 41 | 12 | -0,08 | суглинок твердый |
| А.с-23(24,7) | | 24,7-24,9 | 6,7 | 12 | 23 | 27 | 47 | 20 | 0,05 | глина полутвердая |
| А.с-23(25,2) | | 25,2-25,4 | 7,0 | 12 | 24 | 31 | 42 | 11 | -0,18 | суглинок твердый |
| А.с-23(25,8) | | 25,8-26,0 | 6,0 | 11 | 22 | 29 | 42 | 13 | 0,00 | суглинок твердый |
| А.с-23(27,0) | | 27,0-27,2 | 3,1 | 12 | 23 | 31 | 42 | 11 | -0,36 | суглинок твердый |
| А.с-23(27,6) | | 27,6-27,8 | 4,4 | 12 | 24 | 24 | 42 | 18 | 0,28 | глина тугопластичная |
| А.с-23(30,0) | | 30,0-30,2 | 3,8 | 11 | 23 | 30 | 41 | 11 | 0,00 | суглинок твердый |
| А.с-23(26,0) | | 26,0-26,2 | 3,5 | 12 | 23 | 34 | 44 | 10 | -0,70 | суглинок твердый |
| З.с-12(17,4) | | 17,4-17,6 | 5,1 | 12 | 25 | 27 | 57 | 30 | -0,07 | глина твердая |

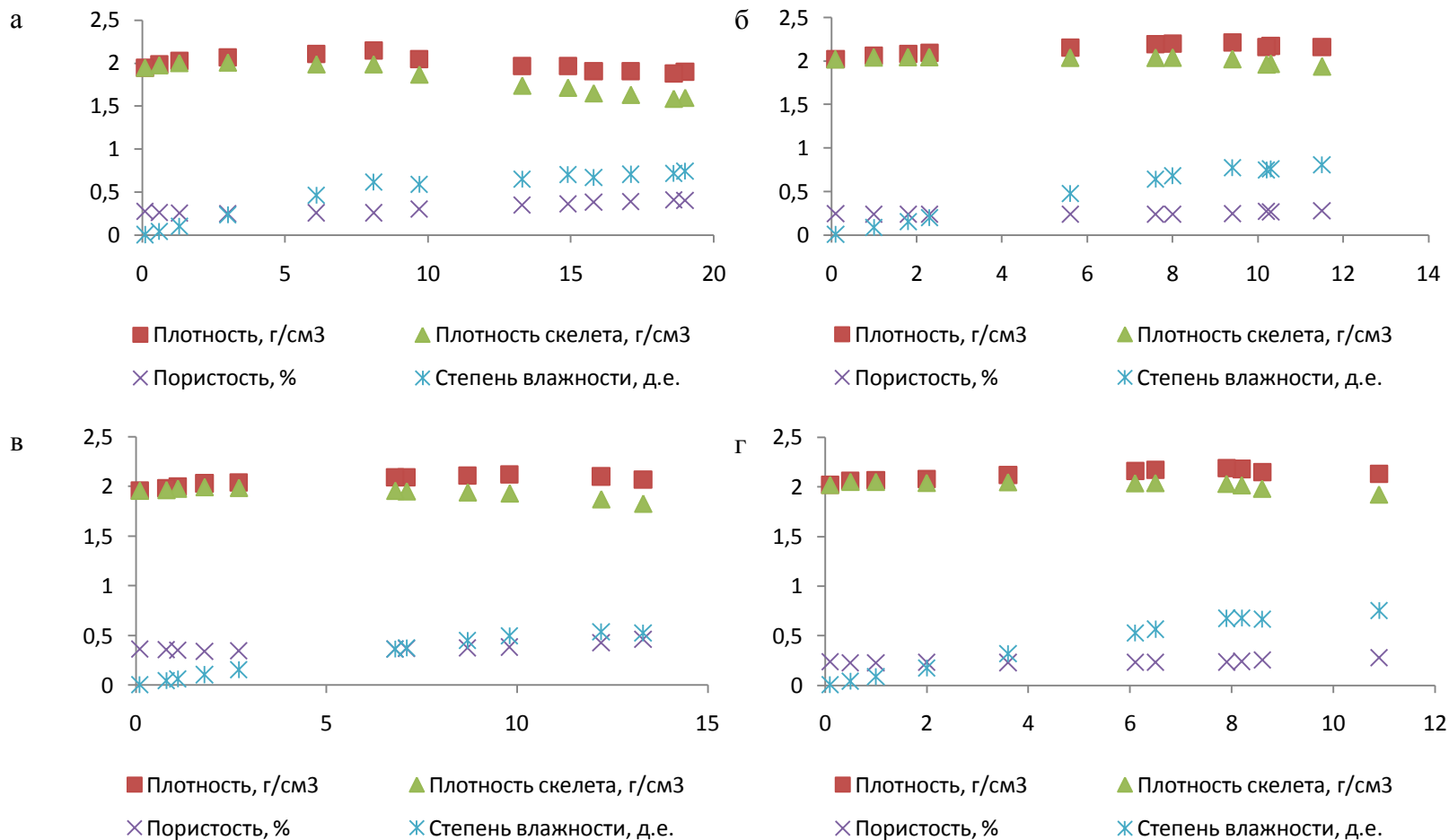
Изменение состояния и физических свойств модельных суглинков (M1, M2) и супесей (M3, M4) по мере их дегидратации

| Название грунта | Влажность W, % | Плотность грунта ρ , г/см ³ | Плотность скелета грунта ρ_d , г/см ³ | Пористость n, % | Степень влажности S_r , д.е. | Скорость продольных волн V_p , м/с | Скорость поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p |
|-----------------|----------------|---|---|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Суглинки M1 | 19,0 | 1,9 | 1,60 | 41 | 0,75 | - | - | - |
| | 18,6 | 1,88 | 1,59 | 41 | 0,72 | 610 | - | - |
| | 17,1 | 1,91 | 1,63 | 39 | 0,71 | 840 | - | - |
| | 15,8 | 1,91 | 1,65 | 39 | 0,67 | 1020 | 210 | 0,21 |
| | 14,9 | 1,97 | 1,71 | 36 | 0,70 | 1200 | 265 | 0,22 |
| | 13,3 | 1,97 | 1,74 | 35 | 0,65 | 1210 | 290 | 0,24 |
| | 9,7 | 2,05 | 1,87 | 31 | 0,59 | 1490 | 500 | 0,34 |
| | 8,1 | 2,15 | 1,99 | 26 | 0,62 | 1360 | 585 | 0,43 |
| | 6,1 | 2,11 | 1,99 | 26 | 0,47 | 1260 | 650 | 0,52 |
| | 3,0 | 2,07 | 2,01 | 25 | 0,24 | 1250 | 830 | 0,66 |
| | 1,3 | 2,03 | 2,00 | 26 | 0,10 | 1290 | 910 | 0,71 |
| | 0,6 | 1,99 | 1,98 | 26 | 0,04 | 1410 | 970 | 0,69 |
| | 0,1 | 1,95 | 1,95 | 28 | 0,01 | 1720 | 840 | 0,49 |
| Суглинки M2 | 11,5 | 2,16 | 1,94 | 28 | 0,80 | 760 | 180 | 0,24 |
| | 10,3 | 2,17 | 1,97 | 27 | 0,76 | 1010 | 280 | 0,28 |
| | 10,2 | 2,16 | 1,96 | 27 | 0,74 | 1190 | 360 | 0,30 |
| | 9,4 | 2,21 | 2,02 | 25 | 0,77 | 1150 | 400 | 0,35 |
| | 8,0 | 2,2 | 2,04 | 24 | 0,68 | 1120 | 460 | 0,41 |
| | 7,6 | 2,19 | 2,04 | 24 | 0,64 | 1160 | 540 | 0,47 |
| | 5,6 | 2,15 | 2,04 | 24 | 0,47 | 1190 | 650 | 0,55 |
| | 2,3 | 2,09 | 2,04 | 24 | 0,20 | 1240 | 750 | 0,60 |
| | 1,8 | 2,08 | 2,04 | 24 | 0,15 | 1325 | 800 | 0,60 |
| | 1,0 | 2,06 | 2,04 | 24 | 0,09 | 1480 | 990 | 0,67 |

Продолжение приложения 8

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|------|------|------|----|------|------|------|------|
| | 0,1 | 2,02 | 2,02 | 25 | 0,01 | 2120 | 1300 | 0,61 |
| Супеси М3 | 13,3 | 2,07 | 1,83 | 46 | 0,53 | 390 | - | - |
| | 12,2 | 2,1 | 1,87 | 43 | 0,54 | 650 | 170 | 0,26 |
| | 9,8 | 2,12 | 1,93 | 38 | 0,49 | 1020 | 290 | 0,28 |
| | 8,7 | 2,11 | 1,94 | 38 | 0,45 | 1050 | 350 | 0,33 |
| | 7,1 | 2,09 | 1,95 | 37 | 0,38 | 1040 | 430 | 0,41 |
| | 6,8 | 2,09 | 1,96 | 36 | 0,37 | 1110 | 460 | 0,41 |
| | 2,7 | 2,04 | 1,99 | 34 | 0,16 | 1290 | 680 | 0,53 |
| | 1,8 | 2,03 | 1,99 | 34 | 0,11 | 1310 | 780 | 0,60 |
| | 1,1 | 2 | 1,98 | 35 | 0,06 | 1330 | 810 | 0,61 |
| | 0,8 | 1,98 | 1,96 | 36 | 0,04 | 1880 | 1200 | 0,64 |
| | 0,1 | 1,96 | 1,96 | 36 | 0,01 | 2050 | 1300 | 0,63 |
| Супеси М4 | 10,9 | 2,13 | 1,92 | 28 | 0,75 | 630 | 150 | 0,24 |
| | 8,6 | 2,15 | 1,98 | 26 | 0,67 | 1050 | 270 | 0,26 |
| | 8,2 | 2,18 | 2,01 | 24 | 0,68 | 900 | 315 | 0,35 |
| | 7,9 | 2,19 | 2,03 | 24 | 0,68 | 900 | 370 | 0,41 |
| | 6,5 | 2,17 | 2,04 | 23 | 0,57 | 980 | 440 | 0,45 |
| | 6,1 | 2,16 | 2,04 | 23 | 0,53 | 1070 | 490 | 0,46 |
| | 3,6 | 2,12 | 2,05 | 23 | 0,32 | 1210 | 640 | 0,53 |
| | 2,0 | 2,08 | 2,04 | 23 | 0,17 | 1290 | 720 | 0,56 |
| | 1,0 | 2,07 | 2,05 | 23 | 0,09 | 1380 | 810 | 0,59 |
| | 0,5 | 2,06 | 2,05 | 23 | 0,04 | 1570 | 1000 | 0,64 |
| | 0,1 | 2,02 | 2,02 | 24 | 0,01 | 2090 | 900 | 0,43 |

Изменение плотности, плотности скелета, пористости и степени влажности модельных суглинков (М1-а, М2-б) и супесей (М3-в, М4-г) при дегидратации



Показатели состояния и физических свойств грунтов

| № образца | Глубина отбора, м | Название грунта по ГОСТ 25100-2011 | Геологический индекс | Естественная влажность $W_e, \%$ | Плотность, $г/см^3$ | | | Пористость, % | Коэффициент пористости, ед. | Степень влажности, д.е. | Объемные доли фаз, % об | | |
|----------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----|-------|
| | | | | | естественная ρ | частиц ρ_s | скелета ρ_d | | | | n | e | S_r |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Щ.с-123 (13,2) | 13,2-13,4 | суглинок легкий песчанистый | gQ ₁ dns | 14 | 2,14 | 2,81 | 1,88 | 33 | 0,50 | 0,79 | 67 | 26 | 7 |
| Щ.с-123(13,6) | 13,6-13,8 | суглинок легкий песчанистый | | 12 | 2,10 | 2,87 | 1,88 | 35 | 0,53 | 0,65 | 65 | 23 | 12 |
| Щ.с-123(13,8) | 13,8-14,0 | супесь пылеватая | | 12 | 2,16 | 2,82 | 1,93 | 32 | 0,46 | 0,73 | 68 | 24 | 8 |
| Щ.с-123 (14,0) | 14,0-14,2 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,21 | 2,84 | 1,97 | 31 | 0,44 | 0,78 | 69 | 24 | 7 |
| Щ.с-123 (14,2) | 14,2-14,7 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,02 | 2,83 | 1,80 | 36 | 0,57 | 0,60 | 64 | 21 | 15 |
| Щ.с-123 (14,7) | 14,7-14,9 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,16 | 2,77 | 1,93 | 30 | 0,44 | 0,76 | 65 | 22 | 13 |
| Щ.с-123(14,9) | 14,9-15,1 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,10 | 2,74 | 1,88 | 32 | 0,46 | 0,71 | 71 | 23 | 6 |
| Щ.с-123(15,7) | 15,7-15,9 | суглинок легкий песчанистый | | 13 | 2,16 | 2,77 | 1,91 | 31 | 0,45 | 0,80 | 69 | 25 | 6 |
| Щ.с-123(16,0) | 16,0-16,2 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,16 | 2,78 | 1,93 | 31 | 0,44 | 0,76 | 69 | 24 | 7 |
| Щ.с-123(16,4) | 16,4-16,6 | суглинок легкий песчанистый | | 11 | 2,16 | 2,77 | 1,95 | 30 | 0,42 | 0,72 | 70 | 21 | 8 |
| Щ.с-123(17,2) | 17,2-17,4 | супесь песчанистая | | 11 | 2,14 | 2,78 | 1,93 | 31 | 0,44 | 0,69 | 69 | 21 | 10 |
| Щ.с-123(18,0) | 18,0-18,2 | супесь песчанистая | | 11 | 2,20 | 2,8 | 1,98 | 29 | 0,41 | 0,75 | 71 | 22 | 7 |
| Щ.с-123(18,3) | 18,3-18,5 | суглинок легкий песчанистый | | 12 | 2,06 | 2,79 | 1,84 | 34 | 0,52 | 0,65 | 70 | 23 | 7 |
| Щ.с-123(18,7) | 18,7-18,9 | супесь песчанистая | | 13 | 2,15 | 2,75 | 1,90 | 31 | 0,45 | 0,80 | 69 | 25 | 6 |
| Щ.с-120 (14,0) | 14,0-14,2 | суглинок легкий песчанистый | | 13 | 2,14 | 2,9 | 1,89 | 35 | 0,53 | 0,71 | 65 | 25 | 10 |
| Щ.с-120(14,2) | 14,2-14,6 | суглинок легкий песчанистая | | 13 | 2,16 | 2,85 | 1,91 | 33 | 0,49 | 0,75 | 67 | 25 | 8 |
| Щ.с-120 (14,3) | 14,3-14,5 | суглинок легкий пылеватый | | 13 | 2,18 | 2,83 | 1,93 | 32 | 0,47 | 0,79 | 68 | 25 | 7 |
| Щ.с-120 (14,7) | 14,7-14,9 | суглинок легкий пылеватый | 12 | 2,14 | 2,81 | 1,91 | 32 | 0,47 | 0,72 | 68 | 23 | 9 | |
| Щ.с-120 (15,0) | 15,0-15,2 | суглинок легкий песчанистый | 12 | 2,17 | 2,84 | 1,94 | 32 | 0,47 | 0,73 | 68 | 23 | 9 | |

Продолжение приложения 10

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------------------|-----------|------------------------------|---|----|------|------|------|----|------|------|----|----|----|
| Щ.с-120(15,4) | 15,4-15,6 | суглинок легкий пылеватый | | 12 | 2,15 | 2,9 | 1,92 | 34 | 0,51 | 0,68 | 65 | 23 | 12 |
| Щ.с-120(15,8) | 15,8-16,0 | суглинок легкий песчанистый | | 12 | 2,15 | 2,83 | 1,92 | 32 | 0,47 | 0,72 | 68 | 23 | 9 |
| Щ.с-120(16,0) | 16,2-16,2 | суглинок легкий песчанистый | | 13 | 2,14 | 2,77 | 1,89 | 32 | 0,46 | 0,78 | 68 | 25 | 7 |
| Щ.с-120 (16,5) | 16,5-16,7 | суглинок легкий песчанистый | | 14 | 2,08 | 2,69 | 1,82 | 32 | 0,47 | 0,79 | 68 | 26 | 6 |
| Щ.с-120 (18,0) | 18,0-18,2 | супесь песчанистая | | 13 | 2,14 | 2,71 | 1,89 | 30 | 0,43 | 0,82 | 70 | 25 | 5 |
| Щ.с-120(18,5) | 18,5-18,7 | суглинок тяжелый песчанистый | | 13 | 2,16 | 2,79 | 1,91 | 31 | 0,46 | 0,79 | 69 | 24 | 7 |
| 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 | 9,5-9,7 | суглинок легкий пылеватый | | 23 | 2,07 | 2,98 | 1,68 | 44 | 0,77 | 0,89 | 56 | 39 | 5 |
| 3.1, 3.2,4.1, 4.2 | 8,8-9,0 | суглинок легкий пылеватый | | 18 | 2,16 | 3,00 | 1,82 | 39 | 0,65 | 0,85 | 61 | 33 | 6 |
| 5.1, 5.2,6.1, 6.2 | 7,0-7,2 | суглинок легкий пылеватый | | 18 | 2,17 | 2,93 | 1,84 | 37 | 0,59 | 0,88 | 63 | 32 | 5 |
| 7.1, 7.2,8.1, 8.2 | 7,0-7,2 | суглинок тяжелый песчанистый | | 24 | 2,06 | 2,93 | 1,66 | 43 | 0,76 | 0,92 | 57 | 40 | 3 |
| 9.1, 9.2, 10.1, 10.2 | 6,0-6,2 | суглинок тяжелый песчанистый | | 22 | 2,09 | 2,93 | 1,71 | 42 | 0,72 | 0,91 | 58 | 38 | 4 |
| M1.1-10 | | | | 8 | 1,40 | 2,68 | 1,30 | 52 | 1,07 | 0,20 | 48 | 10 | 42 |
| M1.2-10 | | | | 8 | 1,54 | 2,68 | 1,42 | 47 | 0,88 | 0,24 | 53 | 11 | 36 |
| M1.3-10 | | | | 8 | 1,60 | 2,68 | 1,48 | 45 | 0,81 | 0,26 | 55 | 12 | 33 |
| M1.5-10 | | | | 8 | 1,69 | 2,68 | 1,56 | 42 | 0,71 | 0,30 | 58 | 13 | 29 |
| M1.8-10 | | | | 10 | 1,72 | 2,68 | 1,56 | 42 | 0,71 | 0,37 | 58 | 16 | 26 |
| M1.10-10 | | | | 8 | 2,05 | 2,68 | 1,90 | 29 | 0,41 | 0,52 | 71 | 15 | 14 |
| M1.12-10 | - | суглинок тяжелый пылеватый | - | 8 | 2,18 | 2,68 | 2,02 | 25 | 0,33 | 0,65 | 75 | 16 | 9 |
| M1.14-10 | | | | 8 | 2,31 | 2,68 | 2,14 | 20 | 0,25 | 0,85 | 80 | 17 | 3 |
| M1.2-15 | | | | 11 | 1,76 | 2,68 | 1,58 | 41 | 0,69 | 0,42 | 59 | 17 | 24 |
| M1.3-15 | | | | 11 | 1,99 | 2,68 | 1,79 | 33 | 0,49 | 0,60 | 67 | 20 | 13 |
| M1.5-15 | | | | 11 | 2,16 | 2,68 | 1,95 | 27 | 0,37 | 0,79 | 73 | 21 | 6 |
| M1.8-15 | | | | 11 | 2,19 | 2,68 | 1,97 | 26 | 0,36 | 0,82 | 74 | 21 | 5 |
| M1.10-15 | | | | 11 | 2,21 | 2,68 | 1,99 | 26 | 0,35 | 0,85 | 74 | 22 | 4 |
| M1.12-15 | | | | 9 | 2,30 | 2,68 | 2,11 | 21 | 0,27 | 0,89 | 79 | 19 | 2 |
| M1.14-15 | | | | 8 | 2,32 | 2,68 | 2,14 | 20 | 0,25 | 0,86 | 80 | 17 | 3 |
| M1.2-20 | | | | 15 | 2,06 | 2,68 | 1,79 | 33 | 0,49 | 0,81 | 67 | 27 | 6 |
| M1.3-20 | | | | 14 | 2,11 | 2,68 | 1,86 | 31 | 0,44 | 0,82 | 69 | 25 | 6 |

Продолжение приложения 10

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------|----|-----------------------------|------|------|------|------|------|----|------|------|----|----|----|
| M1.5-20 | - | суглинок тяжелый пылеватый | - | 13 | 2,13 | 2,68 | 1,88 | 30 | 0,42 | 0,82 | 70 | 25 | 5 |
| M1.7-20 | | | | 10 | 2,27 | 2,68 | 2,07 | 23 | 0,30 | 0,90 | 77 | 21 | 2 |
| M1.10-20 | | | | 9 | 2,29 | 2,68 | 2,10 | 21 | 0,27 | 0,88 | 79 | 18 | 3 |
| M 2.2-10 | - | суглинок легкий песчанистый | - | 9 | 1,77 | 2,69 | 1,63 | 39 | 0,65 | 0,37 | 60 | 15 | 25 |
| M 2.3-10 | | | | 9 | 1,78 | 2,69 | 1,63 | 39 | 0,65 | 0,37 | 60 | 15 | 25 |
| M 2.5-10 | | | | 9 | 1,87 | 2,69 | 1,72 | 36 | 0,57 | 0,43 | 64 | 15 | 21 |
| | | | | 7 | 1,81 | 2,69 | 1,69 | 37 | 0,59 | 0,32 | 63 | 12 | 25 |
| M 2.7-10 | | | | 8 | 2,06 | 2,69 | 1,90 | 29 | 0,41 | 0,52 | 71 | 15 | 14 |
| | | | | 7 | 1,89 | 2,69 | 1,76 | 34 | 0,53 | 0,36 | 66 | 12 | 22 |
| M2.8-10 | | | | 7 | 1,88 | 2,69 | 1,75 | 35 | 0,53 | 0,35 | 65 | 12 | 23 |
| M2.10-10 | | | | 7 | 1,94 | 2,69 | 1,82 | 32 | 0,48 | 0,39 | 68 | 13 | 19 |
| | | | | 7 | 2,02 | 2,69 | 1,88 | 30 | 0,43 | 0,44 | 70 | 13 | 17 |
| M2.12-10 | | | | 7 | 2,00 | 2,69 | 1,87 | 30 | 0,44 | 0,43 | 70 | 13 | 17 |
| M2.14-10 | | | | 7 | 2,17 | 2,69 | 2,03 | 25 | 0,33 | 0,58 | 75 | 15 | 10 |
| M2.2-15 | | | | 12 | 2,12 | 2,69 | 1,89 | 30 | 0,42 | 0,77 | 70 | 23 | 7 |
| M2.3-15 | | | | 12 | 2,13 | 2,69 | 1,90 | 29 | 0,42 | 0,77 | 71 | 22 | 7 |
| M2.5-15 | | | | 11 | 2,12 | 2,69 | 1,91 | 29 | 0,41 | 0,72 | 71 | 21 | 8 |
| M2.7-15 | | | | 10 | 2,19 | 2,69 | 1,99 | 26 | 0,35 | 0,76 | 74 | 20 | 6 |
| M2.8-15 | | | | 10 | 2,20 | 2,69 | 2,00 | 26 | 0,35 | 0,78 | 74 | 20 | 6 |
| M2.10-15 | | | | 10 | 2,21 | 2,69 | 2,01 | 25 | 0,34 | 0,79 | 75 | 20 | 5 |
| M2.12-15 | | | | 9 | 2,20 | 2,69 | 2,02 | 25 | 0,33 | 0,73 | 75 | 18 | 7 |
| M2.14-15 | | | | 9 | 2,23 | 2,69 | 2,04 | 24 | 0,32 | 0,76 | 76 | 18 | 6 |
| M2.2-20 | | | | 15 | 2,05 | 2,69 | 1,79 | 34 | 0,51 | 0,80 | 66 | 27 | 7 |
| M2.3-20 | | | | 14 | 2,09 | 2,69 | 1,83 | 32 | 0,47 | 0,81 | 68 | 26 | 6 |
| M2.5-20 | | | | 13 | 2,12 | 2,69 | 1,88 | 30 | 0,43 | 0,81 | 70 | 24 | 6 |
| M2.7-20 | | | | 13 | 2,13 | 2,69 | 1,88 | 30 | 0,43 | 0,82 | 70 | 25 | 5 |
| M2.8-20 | 13 | 2,12 | 2,69 | 1,87 | 30 | 0,44 | 0,80 | 70 | 24 | 6 | | | |
| M2.10-20 | 14 | 2,09 | 2,69 | 1,84 | 32 | 0,47 | 0,81 | 68 | 26 | 6 | | | |
| M2.12-20 | 12 | 2,13 | 2,69 | 1,90 | 29 | 0,42 | 0,78 | 70 | 23 | 7 | | | |

Продолжение приложения 10

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------|----|-----------------------------|------|------|------|------|------|----|------|------|----|----|----|
| M2.14-20 | - | суглинок легкий песчанистый | - | 12 | 2,14 | 2,69 | 1,91 | 29 | 0,41 | 0,79 | 71 | 23 | 6 |
| M3.2-7 | | супесь песчанистая | - | 6 | 1,88 | 2,66 | 1,77 | 33 | 0,50 | 0,32 | 67 | 10 | 23 |
| M3.3-7 | | | | 5 | 1,91 | 2,66 | 1,82 | 32 | 0,46 | 0,29 | 68 | 9 | 23 |
| M3.5-7 | | | | 6 | 1,95 | 2,66 | 1,84 | 31 | 0,45 | 0,36 | 69 | 11 | 20 |
| M3.7-7 | | | | 5 | 1,96 | 2,66 | 1,87 | 30 | 0,42 | 0,31 | 71 | 9 | 20 |
| M3.8-7 | | | | 5 | 2,01 | 2,66 | 1,91 | 28 | 0,39 | 0,34 | 72 | 10 | 18 |
| M3.10-7 | | | | 6 | 2,03 | 2,66 | 1,92 | 28 | 0,39 | 0,41 | 72 | 12 | 16 |
| M3.12-7 | | | | 5 | 2,11 | 2,66 | 2,01 | 24 | 0,32 | 0,41 | 76 | 10 | 14 |
| M3.14-7 | | | | 5 | 2,07 | 2,66 | 1,97 | 26 | 0,35 | 0,38 | 74 | 10 | 16 |
| M3.2-10 | | | | 6 | 2,17 | 2,66 | 2,05 | 23 | 0,30 | 0,53 | 77 | 12 | 11 |
| M3.3-10 | | | | 8 | 2,22 | 2,66 | 2,05 | 23 | 0,30 | 0,72 | 77 | 17 | 6 |
| M3.5-10 | | | | 8 | 2,21 | 2,66 | 2,04 | 23 | 0,30 | 0,70 | 77 | 16 | 7 |
| M3.7-10 | | | | 8 | 2,24 | 2,66 | 2,07 | 22 | 0,28 | 0,75 | 78 | 17 | 5 |
| M3.10-10 | | | | 8 | 2,28 | 2,66 | 2,11 | 21 | 0,26 | 0,81 | 79 | 17 | 4 |
| M3.12-10 | | | | 7 | 2,26 | 2,66 | 2,11 | 21 | 0,26 | 0,72 | 79 | 15 | 6 |
| M3.2-15 | | | | 7 | 2,28 | 2,66 | 2,13 | 20 | 0,25 | 0,76 | 80 | 15 | 5 |
| M3.3-15 | | | | 11 | 2,19 | 2,66 | 1,97 | 26 | 0,35 | 0,84 | 74 | 22 | 4 |
| M3.5-15 | 10 | 2,20 | 2,66 | 2,00 | 25 | 0,33 | 0,81 | 75 | 20 | 5 | | | |
| M3.7-15 | 10 | 2,23 | 2,66 | 2,02 | 24 | 0,31 | 0,85 | 76 | 20 | 4 | | | |
| M3.8-15 | 10 | 2,23 | 2,66 | 2,03 | 24 | 0,31 | 0,85 | 76 | 20 | 4 | | | |
| M3.10-15 | 9 | 2,19 | 2,66 | 2,01 | 25 | 0,33 | 0,73 | 75 | 18 | 7 | | | |
| M3.12-15 | 9 | 2,28 | 2,66 | 2,09 | 21 | 0,27 | 0,88 | 79 | 18 | 3 | | | |
| M3.8-20 | 9 | 2,24 | 2,66 | 2,06 | 23 | 0,29 | 0,82 | 77 | 19 | 4 | | | |
| M3.14-15 | 10 | 2,20 | 2,66 | 2,00 | 25 | 0,33 | 0,81 | 75 | 20 | 5 | | | |
| M3.2-20 | 8 | 2,28 | 2,66 | 2,11 | 21 | 0,26 | 0,82 | 79 | 17 | 4 | | | |
| M3.5-20 | 12 | 2,15 | 2,66 | 1,92 | 28 | 0,39 | 0,83 | 72 | 23 | 5 | | | |
| M3.7-20 | 11 | 2,18 | 2,66 | 1,97 | 26 | 0,35 | 0,83 | 74 | 22 | 4 | | | |
| M3.10-20 | 10 | 2,26 | 2,66 | 2,06 | 23 | 0,29 | 0,91 | 77 | 21 | 2 | | | |
| | 10 | 2,20 | 2,66 | 2,00 | 25 | 0,33 | 0,81 | 75 | 20 | 5 | | | |

Продолжение приложения 10

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|----------|---|--------------------|------|------|------|------|------|----|------|------|----|----|----|
| M3.12-20 | - | супесь песчанистая | - | 11 | 2,19 | 2,66 | 1,98 | 26 | 0,35 | 0,85 | 74 | 22 | 4 |
| M3.14-20 | | | | 10 | 2,21 | 2,66 | 2,01 | 24 | 0,32 | 0,82 | 76 | 20 | 4 |
| M4.2-7 | - | супесь песчанистая | - | 4 | 1,76 | 2,67 | 1,69 | 37 | 0,58 | 0,19 | 63 | 7 | 30 |
| M4.3-7 | | | | 4 | 1,82 | 2,67 | 1,75 | 34 | 0,52 | 0,20 | 66 | 7 | 27 |
| M4.5-7 | | | | 4 | 1,87 | 2,67 | 1,80 | 33 | 0,48 | 0,22 | 67 | 8 | 25 |
| M4.7-7 | | | | 4 | 1,93 | 2,67 | 1,86 | 30 | 0,44 | 0,24 | 70 | 7 | 23 |
| M4.8-7 | | | | 5 | 2,07 | 2,67 | 1,97 | 26 | 0,36 | 0,38 | 74 | 10 | 16 |
| M4.10-7 | | | | 6 | 2,10 | 2,67 | 1,98 | 26 | 0,35 | 0,46 | 74 | 12 | 14 |
| M4.12-7 | | | | 5 | 2,12 | 2,67 | 2,02 | 24 | 0,32 | 0,42 | 76 | 10 | 14 |
| M4.14-7 | | | | 6 | 2,18 | 2,67 | 2,05 | 23 | 0,30 | 0,53 | 77 | 12 | 11 |
| M4.2-10 | | | | 9 | 2,05 | 2,67 | 1,88 | 30 | 0,42 | 0,57 | 70 | 17 | 13 |
| M4.3-10 | | | | 8 | 2,17 | 2,67 | 2,01 | 25 | 0,33 | 0,65 | 75 | 16 | 9 |
| M4.5-10 | | | | 9 | 2,21 | 2,67 | 2,03 | 24 | 0,32 | 0,75 | 76 | 18 | 6 |
| M4.7-10 | | | | 8 | 2,24 | 2,67 | 2,08 | 22 | 0,29 | 0,75 | 78 | 16 | 6 |
| M4.8-10 | | | | 8 | 2,22 | 2,67 | 2,06 | 23 | 0,30 | 0,71 | 77 | 16 | 7 |
| M4.10-10 | | | | 8 | 2,23 | 2,67 | 2,07 | 23 | 0,29 | 0,73 | 77 | 17 | 6 |
| M4.12-10 | | | | 8 | 2,30 | 2,67 | 2,13 | 20 | 0,26 | 0,83 | 80 | 17 | 3 |
| M4.5-20 | | | | 9 | 2,21 | 2,67 | 2,03 | 24 | 0,32 | 0,76 | 76 | 18 | 6 |
| M4.14-10 | | | | 8 | 2,26 | 2,67 | 2,09 | 22 | 0,28 | 0,77 | 78 | 17 | 5 |
| M4.2-15 | | | | 10 | 2,20 | 2,67 | 2,00 | 25 | 0,34 | 0,80 | 75 | 20 | 5 |
| M4.3-15 | | | | 11 | 2,24 | 2,67 | 2,02 | 25 | 0,32 | 0,90 | 75 | 23 | 2 |
| M4.5-15 | | | | 9 | 2,26 | 2,67 | 2,07 | 22 | 0,29 | 0,83 | 78 | 18 | 4 |
| M4.7-15 | 9 | 2,27 | 2,67 | 2,09 | 22 | 0,28 | 0,86 | 78 | 19 | 3 | | | |
| M4.8-15 | 9 | 2,26 | 2,67 | 2,08 | 22 | 0,29 | 0,84 | 77 | 19 | 4 | | | |
| M4.10-15 | 9 | 2,27 | 2,67 | 2,08 | 22 | 0,28 | 0,85 | 78 | 19 | 3 | | | |
| M4.12-15 | 8 | 2,29 | 2,67 | 2,12 | 21 | 0,26 | 0,82 | 79 | 17 | 4 | | | |
| M4.14-15 | 8 | 2,27 | 2,67 | 2,10 | 21 | 0,27 | 0,78 | 79 | 16 | 5 | | | |
| M4.2-15 | 8 | 2,29 | 2,67 | 2,12 | 21 | 0,26 | 0,82 | 79 | 17 | 4 | | | |
| M4.3-15 | 8 | 2,27 | 2,67 | 2,10 | 21 | 0,27 | 0,78 | 79 | 16 | 5 | | | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-----------------|-----------|----------------------------|------------------|----|------|------|------|----|------|------|----|----|----|
| M4.2-20 | - | супесь песчанистая | - | 10 | 2,14 | 2,67 | 1,95 | 27 | 0,37 | 0,72 | 73 | 19 | 8 |
| M4.7-20 | | | | 9 | 2,23 | 2,67 | 2,05 | 23 | 0,30 | 0,79 | 77 | 18 | 5 |
| M4.8-20 | | | | 8 | 2,25 | 2,67 | 2,08 | 22 | 0,28 | 0,76 | 78 | 17 | 5 |
| M4.10-20 | | | | 9 | 2,25 | 2,67 | 2,06 | 23 | 0,29 | 0,82 | 77 | 19 | 4 |
| с-9(19,5-20,0) | 19,5-20,0 | глина легкая пылеватая | J _{3ox} | 24 | 1,71 | 2,77 | 1,38 | 50 | 1,01 | 0,66 | 50 | 33 | 17 |
| с-9(20,5-21,0) | 20,5-21,0 | суглинок легкий пылеватый | | 29 | 1,74 | 2,79 | 1,35 | 52 | 1,07 | 0,76 | 48 | 39 | 13 |
| с-5(18,5-19,0) | 18,5-20,0 | суглинок тяжелый пылеватый | | 30 | 1,66 | 2,97 | 1,28 | 57 | 1,33 | 0,67 | 43 | 38 | 19 |
| с-11(18,0-18,5) | 18,0-18,5 | суглинок тяжелый пылеватый | | 29 | 1,78 | 2,87 | 1,38 | 52 | 1,08 | 0,77 | 48 | 40 | 12 |
| A.с-23(23,3) | 23,3-23,5 | суглинок легкий пылеватый | | 26 | 1,74 | 2,69 | 1,38 | 49 | 0,95 | 0,74 | 51 | 36 | 13 |
| A.с-23(24,0) | 24,0-24,2 | глина легкая пылеватая | | 26 | 1,76 | 2,63 | 1,40 | 47 | 0,88 | 0,77 | 53 | 36 | 11 |
| A.с-23(24,3) | 24,3-24,5 | суглинок легкий пылеватый | | 28 | 1,78 | 2,8 | 1,39 | 50 | 1,01 | 0,77 | 50 | 39 | 11 |
| A.с-23(24,7) | 24,7-24,9 | глина легкая пылеватая | | 28 | 1,79 | 2,76 | 1,40 | 49 | 0,97 | 0,79 | 51 | 39 | 10 |
| A.с-23(25,2) | 25,2-25,4 | суглинок легкий пылеватый | | 29 | 1,7 | 2,69 | 1,32 | 51 | 1,04 | 0,75 | 49 | 38 | 13 |
| A.с-23(25,8) | 25,8-26,0 | суглинок тяжелый пылеватый | | 29 | 1,77 | 2,73 | 1,37 | 50 | 0,99 | 0,80 | 50 | 40 | 10 |
| A.с-23(26,0) | 26,0-26,2 | суглинок легкий пылеватый | | 27 | 1,73 | 2,71 | 1,36 | 50 | 0,99 | 0,74 | 50 | 37 | 13 |
| A.с-23(27,0) | 27,0-27,2 | суглинок легкий пылеватый | | 27 | 1,76 | 2,75 | 1,39 | 50 | 0,98 | 0,75 | 50 | 38 | 12 |
| A.с-23(27,6) | 27,6-27,8 | глина легкая пылеватая | | 29 | 1,75 | 2,87 | 1,36 | 53 | 1,12 | 0,75 | 47 | 40 | 13 |
| A.с-23(30,0) | 30,0-30,2 | суглинок легкий пылеватый | | 30 | 1,83 | 2,82 | 1,41 | 50 | 1,00 | 0,84 | 50 | 42 | 8 |
| З.с-12(17,4) | 17,4-17,6 | глина легкая пылеватая | | 25 | 1,76 | 2,76 | 1,41 | 49 | 0,96 | 0,72 | 51 | 35 | 14 |

Ультразвуковые характеристики грунтов и данные одноосного сжатия

| № образца | Ультразвуковые характеристики | | | | | Одноосное сжатие | | | |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| | Скорости продольных волн V_p , м/с | Скорости поперечных волн V_s , м/с | Отношение скоростей V_s/V_p | Динамический модуль упругости, E_d , МПа | Коэффициент Пуассона μ | Прочность на сжатие R_c , МПа | Начальный модуль сжатия E_n , МПа | Модуль относительной деформации $E_{отн}$, МПа | Коэффициент поперечной деформации μ_0 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Щ.с-123 (13,2) | 1650 | 700 | 0,42 | 2916 | 0,39 | 0,31 | 10 | 10 | 0,37 |
| Щ.с-123(13,6) | 1350 | 390 | 0,29 | 929 | 0,45 | 0,4 | 20 | 15 | 0,34 |
| Щ.с-123(13,8) | 1760 | 350 | 0,20 | 783 | 0,48 | 0,54 | 22 | 22 | 0,40 |
| Щ.с-123 (14,0) | 2000 | 280 | 0,14 | 516 | 0,49 | 0,38 | 15 | 15 | 0,33 |
| Щ.с-123 (14,2) | 1050 | 410 | 0,39 | 958 | 0,41 | 0,3 | 14 | 18 | 0,31 |
| Щ.с-123 (14,7) | 1750 | 380 | 0,22 | 861 | 0,48 | 0,44 | 17 | 12 | 0,36 |
| Щ.с-123(14,9) | 1920 | 280 | 0,15 | 509 | 0,49 | 0,33 | 12 | 10 | 0,31 |
| Щ.с-123(15,7) | 1570 | 380 | 0,24 | 916 | 0,47 | 0,43 | 13 | 12 | 0,42 |
| Щ.с-123(16,0) | 1560 | 170 | 0,10 | 187 | 0,49 | 0,43 | 10 | 11 | 0,41 |
| Щ.с-123(16,4) | 1860 | 230 | 0,11 | 341 | 0,49 | 0,31 | 14 | 10 | 0,42 |
| Щ.с-123(17,2) | 1800 | - | - | - | - | 0,17 | 10 | 2 | 0,37 |
| Щ. с-123 (18,0) | 1900 | 300 | 0,16 | 589 | 0,49 | 0,18 | 4 | 2 | 0,45 |
| Щ.с-123(18,3) | 1810 | - | - | - | - | 0,16 | 2 | 1,5 | 0,44 |
| Щ.с-123(18,7) | 1800 | - | - | - | - | 0,54 | 6 | 2 | 0,45 |
| Щ.с-120 (14,0) | 1550 | 380 | 0,25 | 907 | 0,47 | 0,32 | 17 | 20 | 0,36 |
| Щ.с-120(14,2) | 1640 | 300 | 0,18 | 576 | 0,48 | 0,27 | 10 | 10 | 0,38 |
| Щ.с-120 (14,3) | 1760 | 320 | 0,18 | 662 | 0,48 | 0,32 | 12 | 7 | 0,34 |
| Щ.с-120 (14,7) | 1810 | 360 | 0,20 | 7011 | 0,48 | 0,41 | 10 | 10 | 0,36 |
| Щ.с-120 (15,0) | 1720 | 320 | 0,19 | 659 | 0,48 | 0,36 | 8 | 6 | 0,31 |
| Щ.с-120(15,4) | 1760 | 260 | 0,15 | 429 | 0,49 | 0,34 | 12 | 8 | 0,40 |
| Щ.с-120(15,8) | 1710 | 280 | 0,16 | 501 | 0,49 | 0,29 | 12 | 6 | 0,33 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|
| Щ,с-120(16,0) | 1700 | - | - | - | - | 0,09 | 3 | 1,5 | 0,45 |
| Щ,с-120 (16,5) | 1760 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Щ,с-120 (18,0) | 1770 | 170 | 0,08 | 185 | 0,50 | 0,14 | 7 | 1 | 0,45 |
| Щ,с-120(18,5) | 1910 | - | - | - | - | 0,1 | 3 | 1 | 0,45 |
| M1.2-10 | 511 | 202 | 0,40 | 176 | 0,41 | 0,20 | 14 | 35 | 0,40 |
| M1.3-10 | 449 | 195 | 0,43 | 168 | 0,38 | 0,26 | 25 | 41 | 0,24 |
| M1.5-10 | 676 | 278 | 0,41 | 365 | 0,40 | 0,36 | - | - | 0,20 |
| M1.8-10 | 630 | 280 | 0,44 | 371 | 0,38 | 0,54 | 36 | 45 | 0,42 |
| M1.10-10 | 800 | 490 | 0,61 | 1182 | 0,20 | 0,92 | 93 | 98 | 0,36 |
| M1.12-10 | 1500 | 520 | 0,35 | 1685 | 0,43 | 1,76 | 128 | 129 | 0,33 |
| M1.14-10 | 1690 | 440 | 0,26 | 1310 | 0,46 | 0,8 | 85 | 200 | 0,27 |
| M1.2-15 | 400 | 200 | 0,50 | 187 | 0,33 | 0,34 | 21 | 35 | 0,39 |
| M1.3-15 | 610 | 240 | 0,39 | 323 | 0,41 | 0,64 | 36 | 39 | 0,38 |
| M1.5-15 | 1560 | 420 | 0,27 | 1116 | 0,46 | 0,86 | 63 | 71 | 0,43 |
| M1.8-15 | 1670 | 450 | 0,27 | 1295 | 0,46 | 1,02 | 71 | 95 | 0,41 |
| M1.10-15 | 1830 | 580 | 0,32 | - | 0,44 | 1,05 | - | - | 0,32 |
| M1.12-15 | 1960 | 410 | 0,21 | 1142 | 0,48 | 0,72 | 84 | 146 | 0,3 |
| M1.14-15 | 2270 | 490 | 0,22 | 1641 | 0,48 | 0,90 | 115 | 159 | - |
| M1.2-20 | 1350 | 270 | 0,20 | 445 | 0,48 | 0,54 | 9 | 21 | 0,48 |
| M1.3-20 | 1670 | 340 | 0,20 | 721 | 0,48 | 0,58 | 20 | 32 | 0,48 |
| M1.5-20 | 1550 | 320 | 0,21 | 644 | 0,48 | 0,59 | 27 | 40 | 0,40 |
| M1.7-20 | 1740 | 380 | 0,22 | 968 | 0,47 | 0,53 | 40 | 50 | 0,39 |
| M1.10-20 | 511 | 202 | 0,40 | - | - | 1 | 97 | 75 | - |
| M 2.2-10 | 850 | 330 | 0,39 | 545 | 0,41 | 0,23 | 26 | 44 | 0,28 |
| M 2.3-10 | 830 | 340 | 0,41 | 575 | 0,40 | 0,26 | 42 | 62 | 0,31 |
| M 2.5-10 | 1040 | 380 | 0,37 | 769 | 0,42 | 0,37 | 44 | 64 | 0,38 |
| M 2.7-10 | 900 | 450 | 0,50 | 975 | 0,33 | 0,36 | 35 | - | 0,30 |
| | 940 | 310 | 0,33 | 569 | 0,44 | 0,56 | 43 | 75 | 0,39 |
| M2.8-10 | 970 | 400 | 0,41 | 843 | 0,40 | 0,46 | 44 | - | 0,32 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|
| M2.8-10 | 1060 | 400 | 0,38 | 851 | 0,42 | 0,6 | 72 | - | 0,28 |
| M2.10-10 | 1130 | 480 | 0,42 | 1245 | 0,39 | 0,7 | 80 | 105 | 0,30 |
| M2.12-10 | 1290 | 370 | 0,29 | 803 | 0,46 | 0,7 | 69 | - | 0,38 |
| | 700 | 350 | 0,50 | 654 | 0,33 | 0,72 | 49 | - | 0,32 |
| M2.14-10 | 1770 | 520 | 0,29 | 1705 | 0,45 | 1,1 | 81 | 108 | 0,36 |
| M2.2-15 | 1030 | 290 | 0,28 | 519 | 0,46 | 0,3 | 14 | 19 | 0,30 |
| M2.3-15 | 1310 | 310 | 0,24 | 601 | 0,47 | 0,37 | 28 | 35 | 0,28 |
| M2.5-15 | 1620 | 370 | 0,23 | 854 | 0,47 | 0,55 | 28 | 45 | 0,26 |
| M2.7-15 | 1840 | 440 | 0,24 | 1244 | 0,47 | 0,89 | 45 | 69 | 0,32 |
| M2.8-15 | 1900 | 490 | 0,26 | 1547 | 0,46 | 0,84 | 74 | 122 | - |
| M2.10-15 | 1960 | 500 | 0,26 | 1617 | 0,47 | 0,51 | 76 | 157 | - |
| M2.12-15 | 1900 | 470 | 0,25 | 1428 | 0,47 | 0,71 | 70 | 182 | 0,31 |
| M2.14-15 | 1930 | 480 | 0,25 | 1506 | 0,47 | 0,8 | 110 | 200 | 0,35 |
| M2.2-20 | 1080 | 220 | 0,20 | 294 | 0,48 | 0,17 | 19 | 28 | 0,4 |
| M2.3-20 | 1440 | 270 | 0,19 | 452 | 0,48 | 0,25 | 16 | 27 | 0,32 |
| M2.5-20 | 1760 | 350 | 0,20 | 769 | 0,48 | 0,38 | 28 | 40 | 0,45 |
| M2.7-20 | 1800 | 390 | 0,22 | 956 | 0,48 | 0,42 | 53 | 92 | - |
| M2.8-20 | 1670 | 340 | 0,20 | 723 | 0,48 | 0,35 | 44 | 80 | 0,44 |
| M2.10-20 | 1760 | 280 | 0,16 | 488 | 0,49 | 0,25 | 20 | 21 | 0,38 |
| M2.12-20 | 1790 | 370 | 0,21 | 861 | 0,48 | 0,39 | 35 | 58 | 0,34 |
| M2.14-20 | 1840 | 360 | 0,20 | 820 | 0,48 | 0,42 | 32 | 35 | 0,35 |
| M3.2-7 | 900 | 200 | 0,22 | 222 | 0,47 | 0,30 | 21 | 41 | - |
| M3.3-7 | 940 | 400 | 0,43 | 848 | 0,39 | 0,28 | 10 | 10 | - |
| M3.5-7 | 880 | 380 | 0,43 | 779 | 0,39 | 0,25 | 36 | 43 | - |
| M3.7-7 | 950 | 320 | 0,34 | 577 | 0,44 | - | 30 | 43 | - |
| M3.8-7 | 970 | 370 | 0,38 | 779 | 0,41 | 0,24 | 36 | 57 | 0,27 |
| M3.10-7 | 990 | 400 | 0,40 | 923 | 0,40 | - | 42 | 64 | 0,31 |
| M3.12-7 | 1000 | 410 | 0,41 | 957 | 0,40 | - | 60 | 70 | 0,24 |
| | 1010 | 420 | 0,42 | 1040 | 0,40 | 0,32 | 52 | 63 | 0,38 |

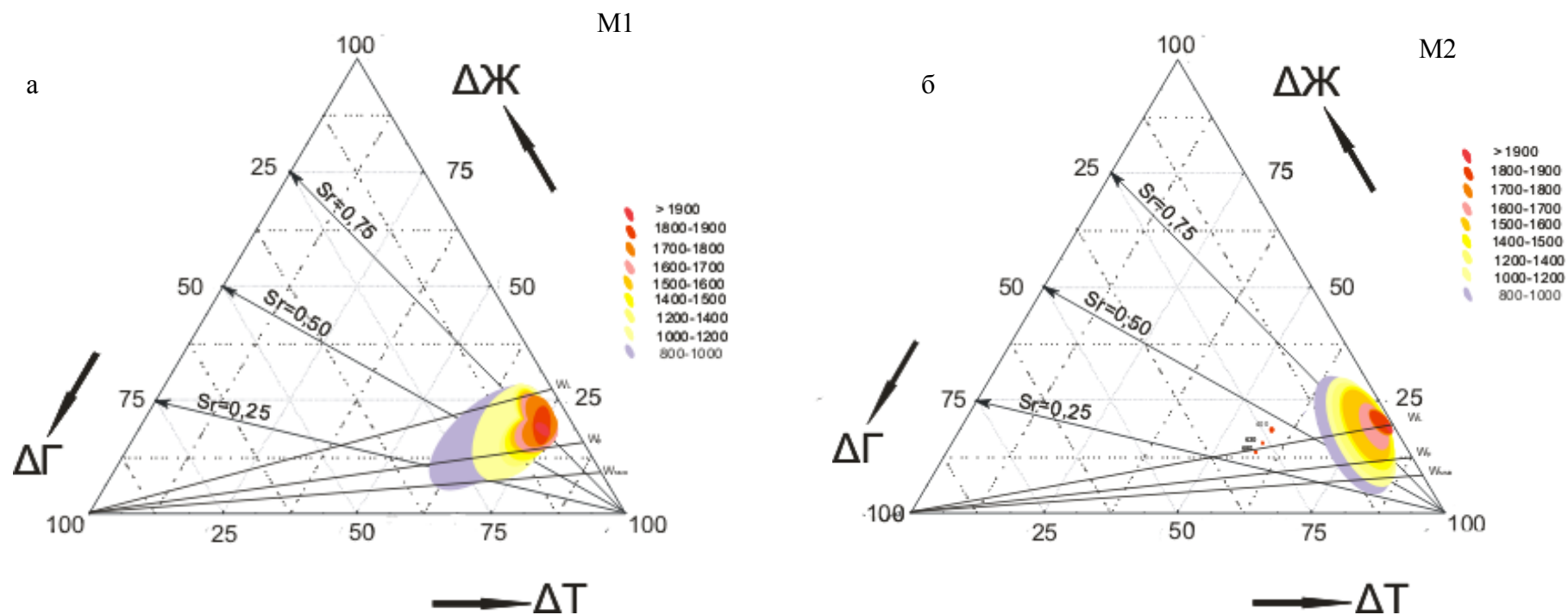
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|------|-----|------|------|------|------|----|----|------|
| M3.14-7 | 1100 | 400 | 0,36 | 944 | 0,42 | - | 54 | 76 | 0,32 |
| M3.2-10 | 810 | 240 | 0,30 | 369 | 0,45 | 0,38 | 36 | 40 | 0,55 |
| | 860 | 260 | 0,30 | 435 | 0,45 | 0,22 | 65 | 65 | 0,38 |
| M3.3-10 | 810 | 240 | 0,30 | 369 | 0,45 | 0,28 | 24 | 30 | 0,39 |
| M3.5-10 | 1070 | 290 | 0,27 | 550 | 0,46 | 0,34 | 26 | 41 | 0,38 |
| M3.7-10 | 1170 | 330 | 0,28 | 722 | 0,46 | 0,44 | - | - | 0,45 |
| M3.10-10 | 1130 | 320 | 0,28 | 679 | 0,46 | 0,4 | 58 | - | 0,38 |
| | 1150 | 330 | 0,29 | 717 | 0,46 | 0,45 | 30 | 49 | 0,35 |
| M3.12-10 | 1360 | 400 | 0,29 | 1061 | 0,45 | 0,64 | 40 | 50 | 0,27 |
| M3.2-15 | 720 | 190 | 0,26 | 231 | 0,46 | 0,11 | 60 | 64 | 0,44 |
| M3.3-15 | 850 | 230 | 0,27 | 340 | 0,46 | 0,16 | 41 | 64 | 0,42 |
| M3.5-15 | 1300 | 300 | 0,23 | | 0,47 | 0,24 | 24 | 42 | - |
| M3.7-15 | 1410 | 350 | 0,25 | 801 | 0,47 | 0,19 | 18 | 23 | 0,40 |
| M3.8-15 | 1180 | 300 | 0,25 | 577 | 0,47 | 0,21 | 27 | 25 | - |
| M3.10-15 | 1430 | 370 | 0,26 | 913 | 0,46 | 0,34 | 35 | - | 0,43 |
| M3.12-15 | 1480 | 390 | 0,26 | 997 | 0,46 | 0,38 | 31 | 42 | 0,33 |
| M3.14-15 | 1410 | 390 | 0,28 | 1011 | 0,46 | 0,35 | 22 | 29 | 0,44 |
| M3.2-20 | 1260 | 260 | 0,21 | 430 | 0,48 | 0,13 | 48 | - | - |
| M3.5-20 | 1250 | 240 | 0,19 | 372 | 0,48 | 0,16 | 36 | 40 | 0,43 |
| M3.7-20 | 1100 | 230 | 0,21 | 353 | 0,48 | 0,19 | 65 | 65 | 0,41 |
| M3.8-20 | 1380 | 310 | 0,22 | 623 | 0,47 | 0,21 | 24 | 30 | 0,4 |
| M3.10-20 | 1370 | 320 | 0,23 | 664 | 0,47 | 0,22 | 26 | 41 | 0,4 |
| M3.12-20 | 1140 | 200 | 0,18 | 260 | 0,48 | 0,11 | | - | - |
| M3.14-20 | 1430 | 320 | 0,22 | 667 | 0,47 | 0,23 | 58 | - | - |
| M4.2-7 | 870 | 340 | 0,39 | 575 | 0,41 | 0,11 | 20 | 58 | 0,37 |
| M4.3-7 | 900 | 470 | 0,52 | 1057 | 0,31 | 0,15 | 25 | 63 | 0,30 |
| M4.5-7 | 950 | 410 | 0,43 | 872 | 0,39 | 0,28 | 55 | 82 | 0,30 |
| M4.7-7 | 1060 | 440 | 0,42 | 1044 | 0,40 | 0,26 | 42 | 52 | 0,38 |
| M4.8-7 | 1100 | 450 | 0,41 | 1172 | 0,40 | 0,32 | 54 | 69 | - |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|------|
| M4.10-7 | 1120 | 450 | 0,40 | 1195 | 0,40 | 0,42 | 111 | 139 | 0,39 |
| M4.12-7 | 1150 | 470 | 0,41 | 1313 | 0,40 | 0,38 | 42 | 46 | 0,25 |
| M4.14-7 | 1220 | 490 | 0,40 | 1467 | 0,40 | 0,56 | 69 | 68 | 0,43 |
| M4.2-10 | 520 | 170 | 0,33 | 171 | 0,44 | 0,08 | 8 | 18 | - |
| M4.3-10 | 530 | 160 | 0,30 | 161 | 0,45 | 0,08 | 6 | 16 | - |
| M4.5-10 | 540 | 160 | 0,30 | 164 | 0,45 | 0,09 | 12 | 20 | - |
| M4.7-10 | 710 | 240 | 0,34 | 371 | 0,44 | 0,17 | 26 | 53 | - |
| M4.8-10 | 760 | 210 | 0,28 | 286 | 0,46 | 0,17 | 13 | 16 | - |
| M4.10-10 | 910 | 290 | 0,32 | 542 | 0,44 | 0,27 | 16 | 25 | 0,42 |
| M4.12-10 | 1290 | 540 | 0,42 | 1866 | 0,39 | 0,36 | 19 | 35 | - |
| M4.14-10 | 960 | 300 | 0,31 | 587 | 0,45 | 0,29 | 15 | 18 | - |
| M4.2-15 | 1230 | 330 | 0,27 | 700 | 0,46 | 0,19 | 20 | 65 | - |
| M4.3-15 | 1350 | 350 | 0,26 | 803 | 0,46 | 0,2 | 34 | 120 | 0,39 |
| M4.5-15 | 1520 | 400 | 0,26 | 1056 | 0,46 | 0,32 | 35 | 51 | 0,43 |
| M4.7-15 | 1410 | 330 | 0,23 | 728 | 0,47 | 0,34 | 25 | 40 | 0,35 |
| M4.8-15 | 1630 | 450 | 0,28 | 1337 | 0,46 | 0,38 | 57 | 100 | 0,38 |
| M4.10-15 | 1640 | 490 | 0,30 | 1582 | 0,45 | 0,47 | 82 | 106 | 0,35 |
| M4.12-15 | 1710 | 490 | 0,29 | 1598 | 0,46 | 0,63 | 72 | 72 | 0,32 |
| M4.14-15 | 1660 | 480 | 0,29 | 1518 | 0,45 | 0,5 | 56 | 60 | 0,30 |
| M4.2-20 | 1090 | 235 | 0,22 | 349 | 0,48 | 0,12 | 14 | 36 | 0,35 |
| M4.3-20 | 1410 | 325 | 0,23 | 678 | 0,47 | 0,19 | 19 | 23 | 0,38 |
| M4.5-20 | 1530 | 370 | 0,24 | 889 | 0,47 | 0,28 | 36 | 96 | 0,45 |
| M4.7-20 | 1620 | 420 | 0,26 | 1154 | 0,46 | 0,34 | 46 | 130 | 0,37 |
| M4.8-20 | 1560 | 390 | 0,25 | 1005 | 0,47 | 0,44 | 32 | 24 | 0,44 |
| M4.10-20 | 1470 | 370 | 0,25 | 903 | 0,47 | - | 44 | 57 | - |
| c-9(19,5-20,0) | 1180 | 290 | 0,25 | 422 | 0,47 | - | - | - | - |
| c-9(20,5-21,0) | 1075 | 240 | 0,22 | 295 | 0,47 | - | - | - | - |
| c-5(18,5-19,0) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| c-11(18,0-18,5) | 1400 | 250 | 0,18 | 330 | 0,48 | - | - | - | - |

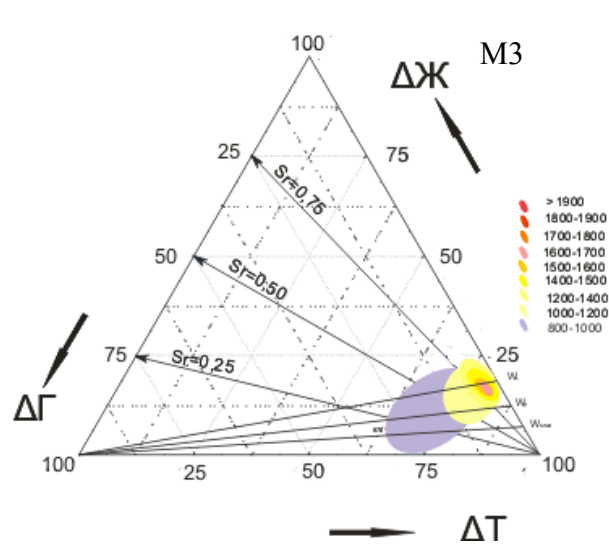
Продолжение приложения 11

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------|------|-----|------|-----|------|------|----|---|------|
| A.c-23(23,3) | 1470 | 300 | 0,20 | 463 | 0,48 | 0,34 | 10 | - | 0,38 |
| A.c-23(24,0) | 1440 | 310 | 0,22 | 499 | 0,48 | 0,31 | 18 | - | 0,40 |
| A.c-23(24,3) | 1640 | 330 | 0,20 | 573 | 0,48 | - | - | - | - |
| A.c-23(24,7) | 1870 | 340 | 0,18 | 614 | 0,48 | - | - | - | - |
| A.c-23(25,2) | 970 | 240 | 0,25 | 287 | 0,47 | - | - | - | - |
| A.c-23(25,8) | 1070 | 240 | 0,22 | 300 | 0,47 | - | - | - | - |
| A.c-23(26,0) | 1190 | 270 | 0,23 | 372 | 0,47 | - | - | - | - |
| A.c-23(27,0) | 1630 | 290 | 0,18 | 439 | 0,48 | - | - | - | - |
| A.c-23(27,6) | 1440 | 300 | 0,21 | 465 | 0,48 | - | - | - | - |
| A.c-23(30,0) | 1340 | 270 | 0,20 | 395 | 0,48 | - | - | - | - |
| З.с-12(17,4) | 1580 | 300 | 0,19 | 469 | 0,48 | 0,47 | 12 | - | 0,31 |

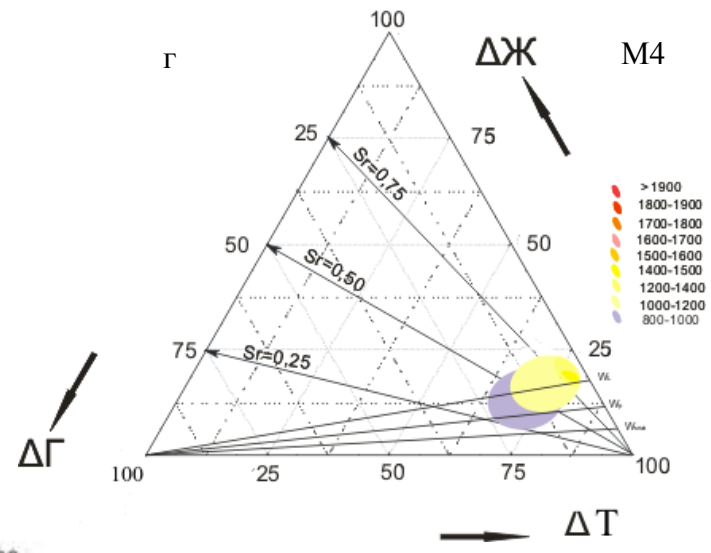
Диаграммы изменения скоростей продольных волн для грунтов разного компонентного состава: (а-г)-модельные, д-природные четвертичные грунты (ΔT , ΔJ , $\Delta \Gamma$ – объемные доли фаз, %)



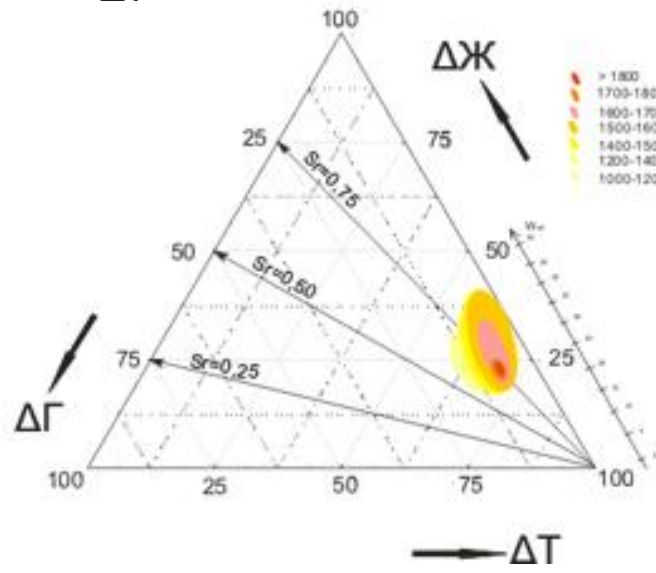
B



Г



Д



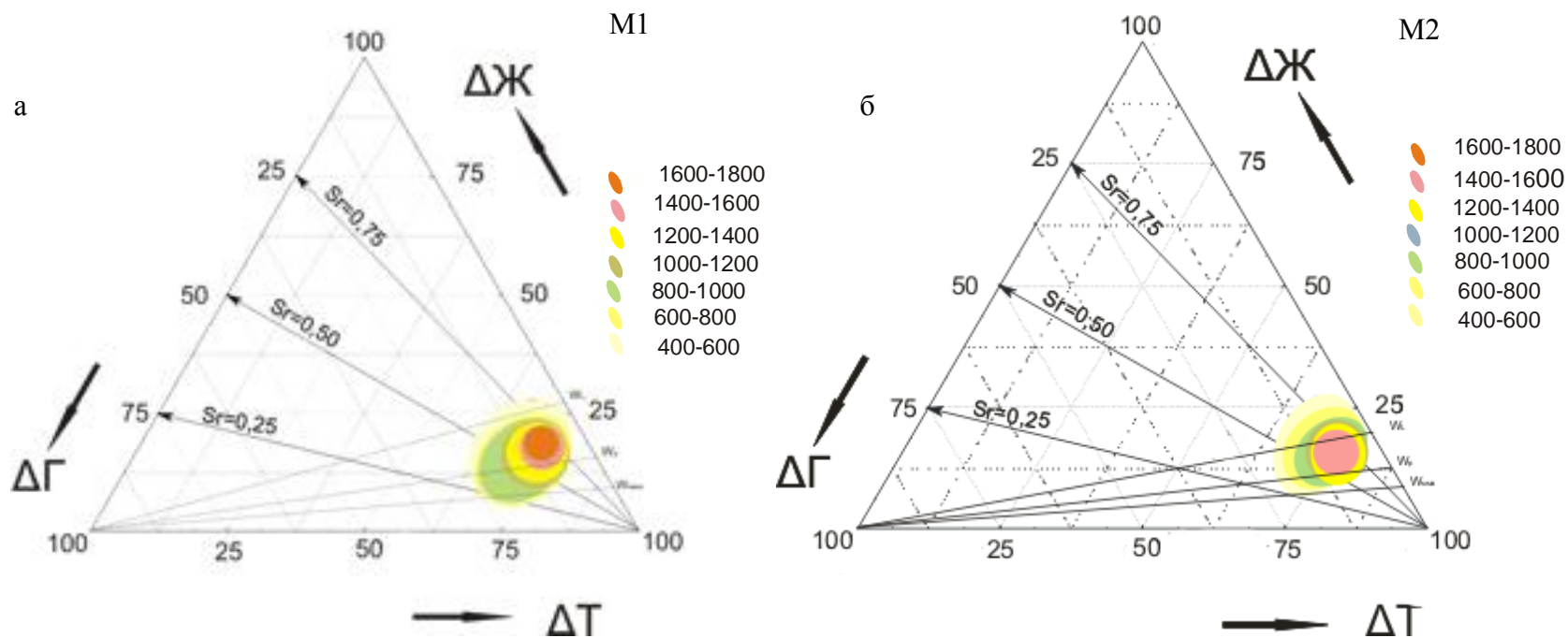
Результаты компрессионных испытаний природных грунтов

| Образцы | Плотность, г/см ³ | | | Влажность W, % | Коэфф. пористости e ₀ , ед. | Коэффициенты сжимаемости (для интервала нагрузки), МПа ⁻¹ | | | Модули компрессионной деформации по ступеням E _к , МПа | | Модули общей деформации по ступеням E ₀ , МПа | | Модули деформации на участке P _{пр} -P _{быт} , МПа | | Модули деформации на участке P _{быт} -1,5P _{быт} , МПа | |
|---------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|--|--|------------|------------|---|-------------|--|-------------|--|----------------|--|----------------|
| | естеств. ρ | частиц ρ _s | скелета ρ _d | | | a(0.1-0.2) | a(0.1-0.3) | a(0.3-0.5) | 0,1-0,3 МПа | 0,3-0,5 МПа | 0,1-0,3 МПа | 0,3-0,5 МПа | E _к | E ₀ | E _к | E ₀ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Щ.с-123(13.2) | 2,14 | 2,81 | 1,88 | 13 | 0,49 | 0,14 | 0,13 | 0,11 | 11 | 14 | 4 | 5 | 11,0 | 4,0 | - | - |
| Щ.с-123(13.6) | 2,10 | 2,87 | 1,88 | 12 | 0,47 | 0,06 | 0,07 | 0,07 | 21 | 20 | 8 | 7 | 21,0 | 7,6 | 18,5 | 6,7 |
| Щ.с-123(13,8) | 2,16 | 2,82 | 1,93 | 12 | 0,46 | 0,12 | 0,11 | 0,08 | 13 | 17 | 5 | 6 | 12,0 | 4,3 | 16,8 | 6,0 |
| Щ.с-123(14.0) | 2,21 | 2,84 | 1,97 | 12 | 0,44 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 11 | 12 | 4 | 4 | 12,0 | 4,3 | 12,4 | 4,5 |
| Щ.с-123(14.2) | 2,02 | 2,83 | 1,80 | 12 | 0,57 | 0,22 | 0,19 | 0,13 | 8 | 12 | 3 | 4 | 7,0 | 2,5 | 11,7 | 4,2 |
| Щ.с-123(14.7) | 2,16 | 2,77 | 1,80 | 12 | 0,43 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 25 | 15 | 9 | 5 | 19,0 | 6,8 | 11,6 | 5,3 |
| Щ.с-123(14.9) | 2,10 | 2,74 | 1,95 | 12 | 0,41 | 0,16 | 0,15 | 0,11 | 9 | 12 | 3 | 4 | 11,0 | 4,0 | 12,5 | 4,5 |
| Щ.с-123(15.7) | 2,16 | 2,77 | 1,91 | 13 | 0,49 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 10 | 13 | 4 | 5 | 11,0 | 4,0 | 16,6 | 6,0 |
| Щ.с-123(16.0) | 2,16 | 2,78 | 1,93 | 12 | 0,50 | 0,17 | 0,15 | 0,07 | 10 | 20 | 4 | 7 | 8,0 | 2,9 | - | - |
| Щ.с-123(16.4) | 2,16 | 2,77 | 1,95 | 11 | 0,47 | 0,22 | 0,20 | 0,07 | 7 | 24 | 3 | 9 | 7,5 | 2,7 | - | - |
| Щ.с-123(17,2) | 2,14 | 2,78 | 1,93 | 11 | 0,44 | 0,12 | 0,1 | 0,06 | 14 | 22 | 5 | 8 | 12,0 | 4,3 | - | - |
| Щ.с-123(18.0) | 2,20 | 2,80 | 1,98 | 11 | 0,49 | 0,20 | 0,16 | 0,09 | 9 | 17 | 3 | 6 | 7,0 | 2,5 | - | - |
| Щ.с-123(18.3) | 2,06 | 2,79 | 1,96 | 12 | 0,42 | 0,18 | 0,15 | 0,08 | 10 | 17 | 4 | 6 | 8,0 | 2,9 | - | - |
| Щ.с-123(18,7) | 2,15 | 2,75 | 1,90 | 13 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Щ.с-120(14.0) | 2,14 | 2,90 | 1,89 | 13 | 0,58 | 0,15 | 0,13 | 0,11 | 12 | 14 | 4 | 5 | 13,0 | 4,7 | 14,2 | 5,1 |
| Щ.с-120(14.2) | 2,16 | 2,85 | 1,91 | 13 | 0,49 | 0,18 | 0,15 | 0,11 | 10 | 13 | 4 | 5 | 9,5 | 3,4 | 14,0 | 5,0 |
| Щ.с-120(14.3) | 2,18 | 2,83 | 1,93 | 14 | 0,46 | 0,21 | 0,18 | 0,14 | 8 | 11 | 3 | 4 | 11,0 | 4,0 | 11,7 | 4,2 |

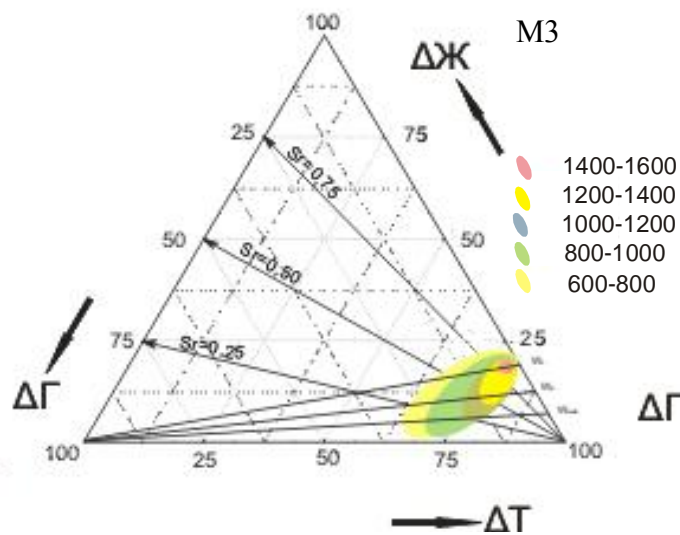
Продолжение приложения 13

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---------------|------|------|------|----|------|------|------|------|-----|----|-----|----|------|------|------|------|
| Щ.с-120(14.7) | 2,14 | 2,81 | 1,91 | 12 | 0,47 | 0,01 | 0,04 | 0,12 | 38 | 12 | 14 | 4 | 21,0 | 7,6 | 11,8 | 4,2 |
| Щ.с-120(15.0) | 2,17 | 2,84 | 1,94 | 12 | 0,49 | 0,02 | 0,05 | 0,11 | 28 | 14 | 10 | 5 | 17,0 | 6,1 | 15,6 | 5,6 |
| Щ.с-120(15.4) | 2,15 | 2,90 | 1,90 | 12 | 0,49 | 0,11 | 0,13 | 0,12 | 12 | 12 | 4 | 4 | 12,0 | 4,3 | 11,7 | 4,2 |
| Щ.с-120(15.8) | 2,15 | 2,83 | 1,92 | 12 | 0,51 | 0,27 | 0,21 | 0,13 | 7 | 12 | 3 | 4 | 11,0 | 4,0 | 11,9 | 4,3 |
| Щ.с-120(16.0) | 2,14 | 2,77 | 1,89 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Щ.с-120(16.5) | 2,08 | 2,69 | 1,82 | 14 | 0,47 | 0,29 | 0,24 | 0,13 | 6 | 11 | 2 | 4 | 6,0 | 2,2 | 11,0 | 4,0 |
| Щ.с-120(18.0) | 2,14 | 2,71 | 1,89 | 13 | 0,41 | 0,15 | 0,12 | 0,07 | 12 | 19 | 4 | 7 | 9,0 | 3,0 | - | - |
| Щ.с-120(18.5) | 2,16 | 2,79 | 1,91 | 13 | 0,42 | 0,16 | 0,14 | 0,06 | 10 | 24 | 3 | 8 | 9,0 | 3,2 | - | - |
| с-9(19,5) | 1,71 | 2,77 | 1,38 | 24 | 1,01 | 0,14 | 0,14 | 0,23 | 14 | 9 | 4 | 3 | 15,0 | 4,5 | 8,7 | 3,1 |
| с-9(20,5) | 1,74 | 2,79 | 1,35 | 29 | 1,07 | 0,12 | 0,11 | 0,15 | 19 | 14 | 7 | 5 | 19,0 | 6,8 | 13,8 | 5,0 |
| с-5(18,5) | 1,66 | 2,97 | 1,28 | 30 | 1,33 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 8 | 9 | 3 | 3 | 9,0 | 3,2 | 8,7 | 3,1 |
| с-11(18,0) | 1,78 | 2,87 | 1,38 | 29 | 1,08 | 0,16 | 0,15 | 0,13 | 14 | 17 | 5 | 6 | 15,0 | 5,4 | 16,6 | 6,0 |
| А.с-23(23,3) | 1,74 | 2,69 | 1,38 | 26 | 0,95 | 0,14 | 0,13 | 0,10 | 15 | 20 | 5 | 7 | 14,0 | 5,0 | - | - |
| А. с-23(24,0) | 1,76 | 2,63 | 1,40 | 26 | 0,88 | 0,18 | 0,14 | 0,08 | 13 | 23 | 4 | 10 | 12,0 | 3,6 | - | - |
| А.с-23(24,3) | 1,76 | 2,8 | 1,39 | 38 | 1,01 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 26 | 34 | 9 | 12 | 35,0 | 12,6 | 35,4 | 12,7 |
| А.с-23(24,7) | 1,79 | 2,76 | 1,40 | 39 | 0,97 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 496 | 35 | 169 | 15 | 35,0 | 12,6 | - | - |
| А.с-23(25,2) | 1,7 | 2,69 | 1,32 | 29 | 1,04 | 0,01 | 0,00 | 0,06 | 500 | 36 | 180 | 13 | 36,0 | 13,0 | 35,7 | 12,9 |
| А.с-23(25,8) | 1,77 | 2,73 | 1,37 | 29 | 0,99 | 0,04 | 0,04 | 0,11 | 45 | 18 | 16 | 6 | 29,0 | 10,4 | - | - |
| А.с-23(26,0) | 1,73 | 2,71 | 1,36 | 27 | 0,99 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | | 42 | | 15 | 18,0 | 6,5 | - | - |
| А.с-23(27,0) | 1,76 | 2,75 | 1,39 | 27 | 0,98 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | | 36 | | 13 | 36,0 | 13,0 | - | - |
| А.с-23(27,6) | 1,75 | 2,87 | 1,41 | 29 | 1,03 | 0,06 | 0,06 | 0,11 | 35 | 18 | 11 | 6 | 35,0 | 10,5 | - | - |
| А.с-23(30,0) | 1,83 | 2,82 | 1,41 | 30 | 1,00 | 0,00 | 0,01 | 0,07 | 248 | 29 | 89 | 10 | 29,0 | 10,4 | - | - |
| 3.с-12(17,4) | 1,76 | 2,76 | 1,41 | 25 | 0,96 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | 24 | 27 | 7 | 12 | 24,5 | 7,4 | - | - |

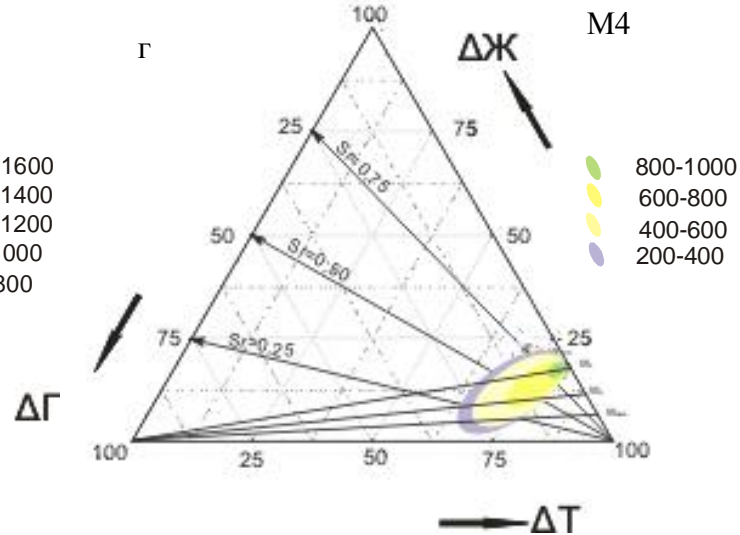
Диаграммы изменения динамического модуля упругости для грунтов разного компонентного состава: (а-г)-модельные, д-природные четвертичные грунты (ΔT , ΔJ , $\Delta \Gamma$ - объемные доли фаз, %)



В



Г



Д

