

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 1. ИСПЫТАНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ КОЛОНКЕ



МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к. т. н., г. Москва, Россия
info@indep-geo.ru

ИДРИСОВ И.Х.

Генеральный директор
ООО НПП «Геотек», г. Москва, Россия

МОСИНА А.С.

Научный сотрудник лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН, заместитель генерального директора ООО «Независимая геотехника», к. г.-м. н., г. Москва, Россия
Mosina.A.S@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Результаты испытаний мерзлых грунтов в динамическом режиме тяжело найти в трудах российских ученых. При этом их механическое поведение при динамическом воздействии может оказывать влияние на функционирование зданий и сооружений и имеет свои особенности. Малый опыт испытаний, отсутствие должного оборудования и методик делает невозможным качественное получение показателей динамических свойств мерзлых грунтов отечественными исследователями. Для развития данной темы подготовлен цикл статей, в первой из которых рассмотрены динамические свойства мерзлых грунтов, определенные при испытаниях в резонансной колонке, приведен литературный обзор исследований этого вопроса иностранными учеными начиная с 1960–1880-х годов и до нашего времени, сделаны их анализ и обобщение. В статье показано влияние на начальный модуль сдвига и коэффициент поглощения: температуры грунта, его влажности, состава, плотности и амплитуды деформаций. Проведено сравнение показателей динамических свойств мерзлых грунтов с немерзлыми, в частности основной упор сделан на влияние температуры мерзлого грунта на его динамические свойства. Показано, что при низких отрицательных температурах от минус 10 °С до минус 3 °С начальный модуль сдвига в среднем находится в диапазоне от 3000 до 900 МПа, при температурах выше минус 2 °С его значение снижается до 500–90 МПа. Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в целом варьирует в широком диапазоне: при температуре грунта минус 5 °С и выше его значение изменяется от 0,08 до 0,12, при температуре минус 10 °С и ниже оно варьирует в пределах 0,05–0,07.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

многолетнемерзлые грунты; динамические свойства грунтов; резонансная колонка; динамические испытания; коэффициент поглощения; лабораторные испытания; криолитозона.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Динамические свойства мерзлых грунтов. Часть 1. Испытания в резонансной колонке // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 1/2. С. 28–35 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-28-35

DYNAMIC PROPERTIES OF FROZEN SOILS. PART 1. RESONANT COLUMN TESTS

MIRNYY A.Yu.

Associate professor at the Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, the head of "Independent Geotechnics" LLC, PhD, Moscow, Russia
info@indep-geo.ru

IDRISOV I.Kh.

Head of "Geotek" LLC, Moscow, Russia

MOSINA A.S.

Researcher at the Laboratory for Studying the Composition and Properties of Soils, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science; the deputy general director of "Independent Geotechnic" LLC, PhD, Moscow, Russia
Mosina.A.S@yandex.ru

ABSTRACT

The results of dynamic frozen soil tests are difficult to find in the Russian scientific publications. However, frozen soils dynamic characteristics can affect the operation of buildings. Russian researchers have little test experience, no proper equipment and research methods. And that does not allow them to obtain accurate dynamic properties of frozen soils. To study this issue, a series of articles has been prepared, the first of which shows the dynamic properties of frozen soils on the basis of resonant column tests, presents a literary review of foreign scientists' publications on the considered topic from 1960–1980 to the present time, their analysis and generalization. The article shows the influence of temperature, humidity, composition, density and vibration amplitude of frozen soil on its dynamic shear modulus and damping ratio. A comparison of the dynamic properties of frozen soils and unfrozen ones is made, the influence of the temperature of frozen soils on their dynamic characteristics is estimated. At low negative temperatures that are from minus 10 °C to minus 3 °C, dynamic shear modulus is on average 3000–900 MPa, at temperatures that are higher than minus 2 °C its value decreases to 500–90 MPa. The damping ratio of frozen soils at a temperature of on average minus 5 °C and higher is 0.08–0.12, at a temperature of minus 10 °C and lower it is 0.05–0.07.

KEYWORDS:

frozen soil; dynamic properties of frozen soils; resonant column tests; dynamic tests; damping ratio; laboratory testing; permafrost zone (cryolithozone).

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Idrisov I.H., Mosina A.S. Dinamicheskiye svoystva merzlykh gruntov. Chast' 1. Ispytaniya v rezonansnoy kolonke [Dynamic properties of frozen soils. Part 1. Resonant column tests] // Geoinfo. 2024. Vol. 6. № 1/2. S. 28–35 DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-1/2-28-35 (in Rus.).

Введение ▶

Строительство зданий и сооружений на мерзлых грунтах неминуемо сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) всего массива. От степени этого изменения зависят безопасность эксплуатации будущего объекта, срок его службы и т. д. В связи с этим на стадии проектирования выполняются прогнозные расчеты изменений НДС массива, позволяющие рассчитать осадку сооружения, возможность нарушения прочности грунтов основания и др. На основании данных расчетов проектируются допустимая нагрузка и режим работы будущего сооружения.

Одним из важнейших этапов прогноза является выбор оцениваемых факторов влияния на мерзлое основание. Традиционно в качестве внешних факторов специалистами принимается в расчет статическая нагрузка от сооружения и динамическое (изменяющееся во времени) температурное воздействие. Динамикой же передаваемых на

мерзлый грунт нагрузок чаще всего пренебрегают. Однако поведение мерзлых грунтов под динамической нагрузкой имеет свои особенности, которые необходимо учитывать.

Например, важным с точки зрения несущей способности грунтов является сезонное изменение их динамических свойств в регионах с суровыми климатическими условиями. При промерзании грунта изменяется его жесткость, что сказывается на характере распространения волн в грунтах, деформациях сооружений, и наоборот.

Зафиксировано, что при сейсмических событиях в Китае [1] наблюдались разные типы разрушений зданий в зависимости от времени года: землетрясения в зимний период приводили к более сильным повреждениям зданий с жесткой конструкцией, а в летний период – приводили к более сильным повреждениям зданий с гибкой конструкцией.

Некоторые из исследователей наблюдали деформации мерзлого грунта под

вибрационными воздействиями проходящего железнодорожного и автомобильного транспорта [2–4].

Это говорит о том, что недоучет особенностей динамического поведения мерзлых грунтов может привести к снижению надежности зданий и сооружений в холодных регионах.

На территории нашей страны игнорирование динамического поведения мерзлых грунтов во многом обусловлено недостаточным опытом исследований и, отсюда, отсутствием необходимого оборудования и требуемых методик для выполнения экспериментов.

Несмотря на то что в холодных регионах фиксируются все те же источники динамического воздействия (землетрясения, движение транспорта и т. д.), для мерзлых грунтов неприменимо обычное оборудование. Из-за большей жесткости мерзлых грунтов и иных показателей динамических свойств использование в экспериментах приборов для немерзлых грунтов приведет к высокой погрешности результатов, а в не-



Рис. 1. Испытания мерзлого грунта в резонансной колонке: а – схема испытания; б – колонка резонансная ГТ 1.3.3 производства ООО НПП «Геотек» [6]

которых случаях и в целом не позволит провести испытания.

Отсюда вытекает необходимость разработки специализированного лабораторного оборудования, а также создания методов и методик таких испытаний. Для полного рассмотрения данного вопроса мы решили выпустить серию статей, в которых будет поэтапно представлен опыт исследований динамических свойств мерзлых грунтов и дальнейшие их перспективы.

Обзор литературы ▶

В первую очередь необходимо изучить особенности динамических свойств объекта нашего внимания. Для этого приведем результаты имеющихся в литературе испытаний, проанализируем их и дадим их обобщенную характеристику.

В целом, как показывает практика иностранных исследователей, количественная характеристика динамических свойств мерзлых грунтов преимущественно определяется на основе лабораторных методов. Одним из них является испытание мерзлых грунтов в резонансной колонке. Оно позволяет моделировать упруго-вязкое поведение мерзлых грунтов при высокочастотных низкоамплитудных воздействиях (при диапазоне деформаций 10^{-8} – 10^{-3}), воспроизводящих в первую очередь воздействие от движения транспорта. По мнению некоторых авторов [1, 5], такой метод хорошо подходит для исследования динамического поведения мерзлых грунтов. Это обосновывается

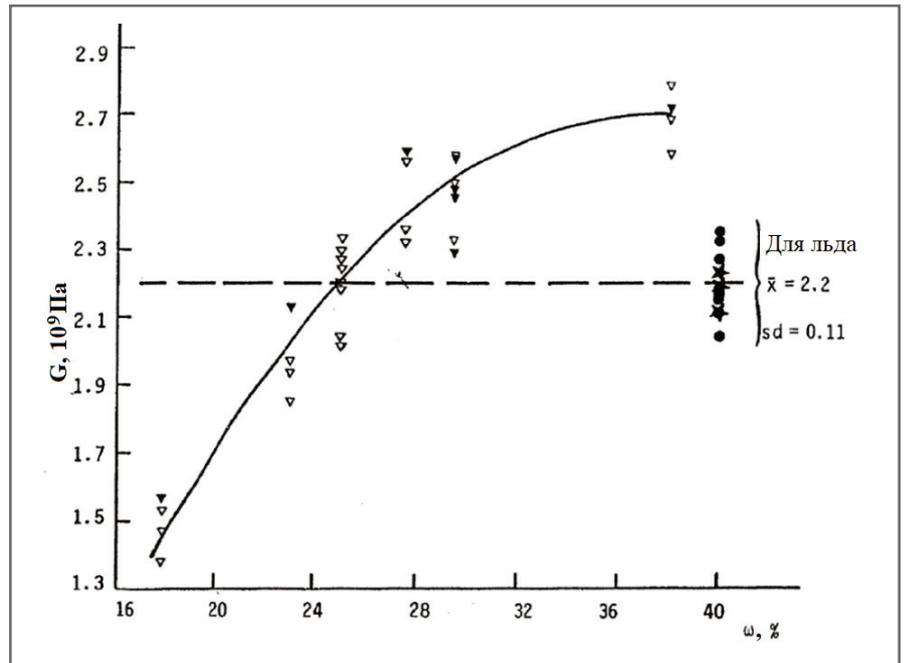


Рис. 2. Динамический модуль сдвига мерзлой каолиновой глины при разной степени влажности по результатам испытаний в резонансной колонке [7]

значительной жесткостью таких грунтов, из-за которой в них по большей части фиксируется низкий уровень деформаций и наблюдается упруго-вязкое поведение.

Суть испытания мерзлого грунта в резонансной колонке заключается в нагружении его цилиндрического образца торсионным колебательным движением с изменяемой частотой колебаний вплоть до резонансной частоты. По полученным результатам определяются динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения как функция ампли-

туды деформации сдвига, резонансная частота (рис. 1) [4].

Исследования динамического поведения мерзлых грунтов в резонансной колонке начались еще в 1960–1980-х годах, когда были предприняты первые попытки модификации существующего на тот момент оборудования.

В 1980 году в Канаде автор работы [7] провел динамические испытания мерзлых грунтов на обычной и модифицированной резонансных колонках типа Hardina в диапазоне деформаций от 10^{-7} до 10^{-4} и температурах минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и

минус 15 °С. Образцы представляли собой мерзлые пески, мерзлые глины и льды. По результатам испытаний были получены следующие значения динамического модуля сдвига: у мерзлого песка он оказался равным 7000–9000 МПа, у мерзлой глины – 1000–2750 МПа, у льда – 2000–2100 МПа. Резонансная частота мерзлого песка варьировала от 800 до 1000 Гц, глины – от 500 до 800 Гц, льда – от 450 до 800 Гц. В исследовании [7] также было выяснено, что при увеличении влажности до оптимального значения (от 18 до 30%) наблюдается приближение модуля сдвига мерзлой глины к модулю сдвига льда (в среднем от 1600 до 2200 МПа). По мере дальнейшего увеличения влажности мерзлой глины, выше ее оптимального значения, жесткость продолжала расти и модуль сдвига достигал примерно 2750 МПа (рис. 2).

В 1982 году автор работы [8] изучил влияние всестороннего давления, температуры, влажности и плотности грунта, амплитуды деформации и частоты на показатели динамических свойств мерзлых пылеватых грунтов. Полученные результаты показали, что модуль сдвига значительно уменьшается с повышением температуры, причем интенсивность его снижения увеличивается по мере повышения температуры от минус 10 до минус 1 °С (рис. 3). При температуре минус 10 °С модуль сдвига мерзлого пылеватого грунта составляет 3900–4900 МПа, а при минус 1 °С его значение опускается до 1000–1900 МПа. Модуль сдвига мерзлого грунта увеличивается с увеличением частоты и ростом влажности.

В 1996 году исследователи из Канады [9] выпустили статью с результатами динамических испытаний мерзлой глины при температуре минус 9 °С и всестороннем давлении 0,01 МПа. С этой целью в резонансной колонке типа Стокое были созданы крутильные колебания с амплитудой деформации сдвига 10^{-5} – 10^{-3} %. Дополнительно для сравнения были проведены испытания немерзлой глины при температуре плюс 22 °С в диапазоне деформаций от 10^{-3} до 10^{-2} %. Результаты показали, что в зависимости от уровня деформации динамический модуль сдвига мерзлой глины варьирует от 944 до 1298 МПа, коэффициент поглощения – от 4,01 до 5,60%, резонансная частота – от 283,5 до 323,7 Гц (таблица 1).

Авторы работы [1] в 2017 году изучили влияние температуры пылеватого грунта (от минус 15 °С до плюс 25 °С)

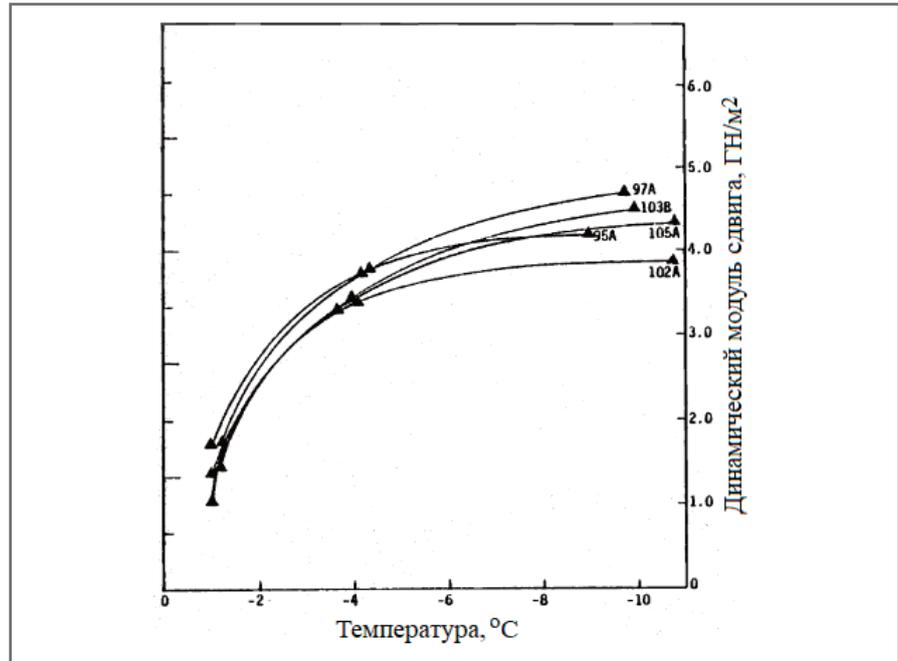


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига мерзлого пылеватого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке [8]

Таблица 1. Результаты испытания мерзлой и немерзлой глины в резонансной колонке [9]

Образец	Резонансная частота, Гц	Макс. Деформация сдвига, %	Модуль сдвига, МПа	Коэффициент поглощения, %
ВН21-Ф (мерзлый)	323,7	0,00015	1298	4,87
	320,6	0,00026	1273	5,60
	297,5	0,00057	1096	5,59
ВН21-У (немерзлый)	42,9	0,00113	22,8	4,17
	43,1	0,00306	23,0	5,35
	41,3	0,00320	21,1	4,90
	42,0	0,00614	21,9	5,65
	39,7	0,01197	19,5	6,57
ВН31-Ф (мерзлый)	285,4	0,00002	956	4,01
	284,2	0,00002	939	5,32
	283,5	0,00028	944	5,02
	283,5	0,00030	944	5,14
ВН31-У (немерзлый)	53,6	0,00081	33,7	3,39
	52,1	0,00409	31,9	3,69
	48,3	0,01166	27,4	5,06

на его динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения. Отдельно были проведены исследования динамического поведения мерзлого грунта при высокой отрицательной температуре, близкой к температуре фазового перехо-

да – при минус 1,4 °С, минус 2,2 °С и минус 3 °С. Эксперименты выполнялись в модифицированной резонансной колонке производства компании GDS с всесторонним давлением 0,1 МПа в диапазоне амплитуды деформаций 10^{-7} – 10^{-4} . По по-

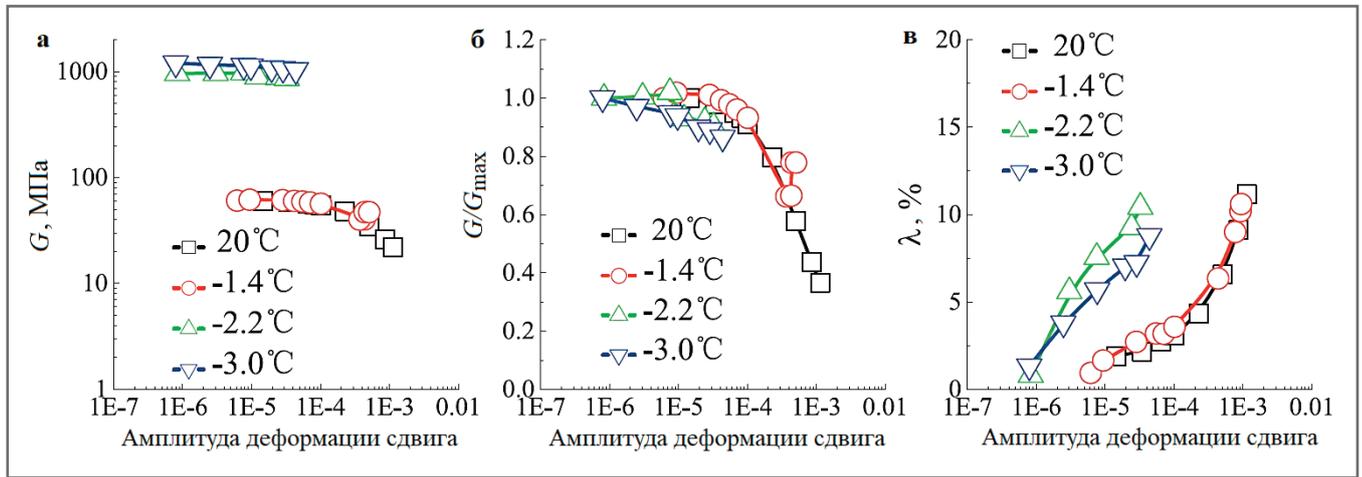


Рис. 4. Зависимость показателей динамических свойств мерзлого пылеватого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке: а – динамический модуль сдвига G ; б – отношение текущего модуля сдвига к его максимальному значению G/G_{max} ; в – коэффициент поглощения λ [1]

лученным результатам было установлено, что динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения пылеватого грунта (а также их изменения при увеличении уровня деформации) при температурах минус 1,4 °С и плюс 20 °С оказались практически одинаковыми – менее 100 МПа (рис. 4). При понижении температуры мерзлого грунта до минус 2,2 °С и минус 3 °С наблюдался резкий скачок всех показателей динамических свойств: динамический модуль сдвига увеличился практически в 10 раз и составил более 1200 МПа при минус 3 °С. При дальнейшем снижении температуры (от минус 3 °С до минус 15 °С) показатели динамических свойств изменялись, но со значительно меньшей интенсивностью (таблица 2).

В 2018 году авторы работы [10] дополнили свои исследования (по той же схеме испытаний) серией испытаний мерзлых грунтов разного состава (таких как мерзлые глины, мерзлые пылеватые грунты и мерзлые пески) с разной степенью водонасыщения (S_r) – от 0,3 до 1 при температуре от минус 5 °С до ми-

Таблица 2. Результаты испытаний мерзлых пылеватых грунтов методом резонансной колонки при разных температурах [1]

Температура, °С	G_{max} , МПа	λ_r	λ_{max}
-15	1539,2	$6,312 \times 10^{-5}$	0,073
-10	1467,4	$6,670 \times 10^{-5}$	0,078
-5	1341,8	$7,520 \times 10^{-5}$	0,106
-3	1238,4	$9,354 \times 10^{-5}$	0,116
15–25 °С (комнатная температура)	64,2	$6,602 \times 10^{-4}$	0,183

нус 18 °С. На основе полученных результатов был сделан вывод, что показатели динамических свойств мерзлых глинистых и пылеватых грунтов не зависят от степени водонасыщения. Некоторое ее влияние было отмечено только на максимальный модуль сдвига (G_{max}) и максимальный коэффициент поглощения (D_{max}) мерзлого песчаного грунта (рис. 5). Резонансная частота, определенная для мерзлой глины при температуре минус 18 °С, составила 310 Гц.

При снижении температуры мерзлого грунта от 0 °С до минус 18 °С начальный модуль сдвига значительно увеличивается в среднем от 20–60 до 1600–2750 МПа, а коэффициент поглощения уменьшается от 0,05–0,07 до 0,11–0,22 (рис. 6) [10].

Ученые из Южной Кореи [11] провели исследование динамического поведения мерзлого песка. С помощью модифицированной резонансной колонки типа Stokoe они выполнили испытания в диапазоне деформаций от 10^{-7} до

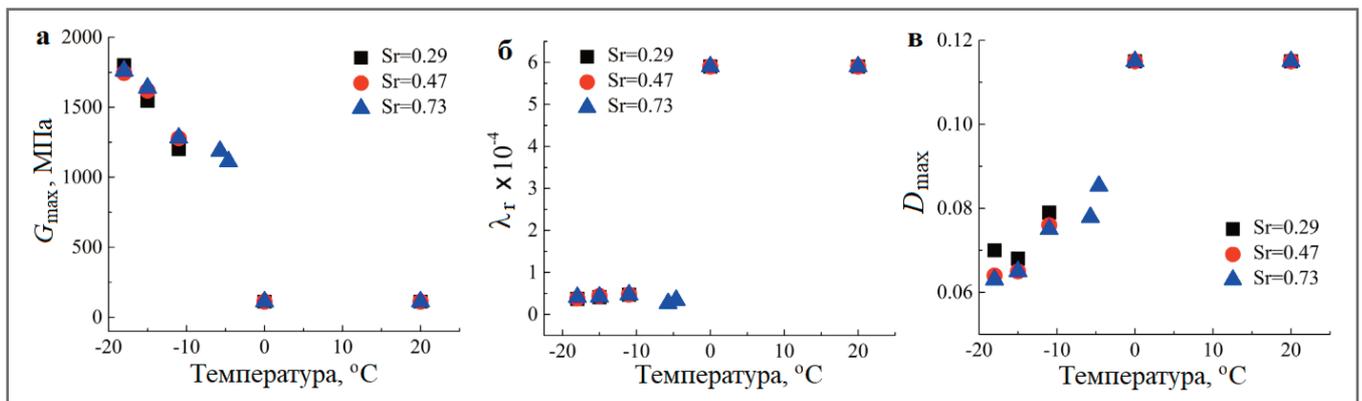


Рис. 5. Зависимость показателей динамических свойств мерзлого песка от степени водонасыщения (S_r) и температуры по результатам испытаний в резонансной колонке [10]

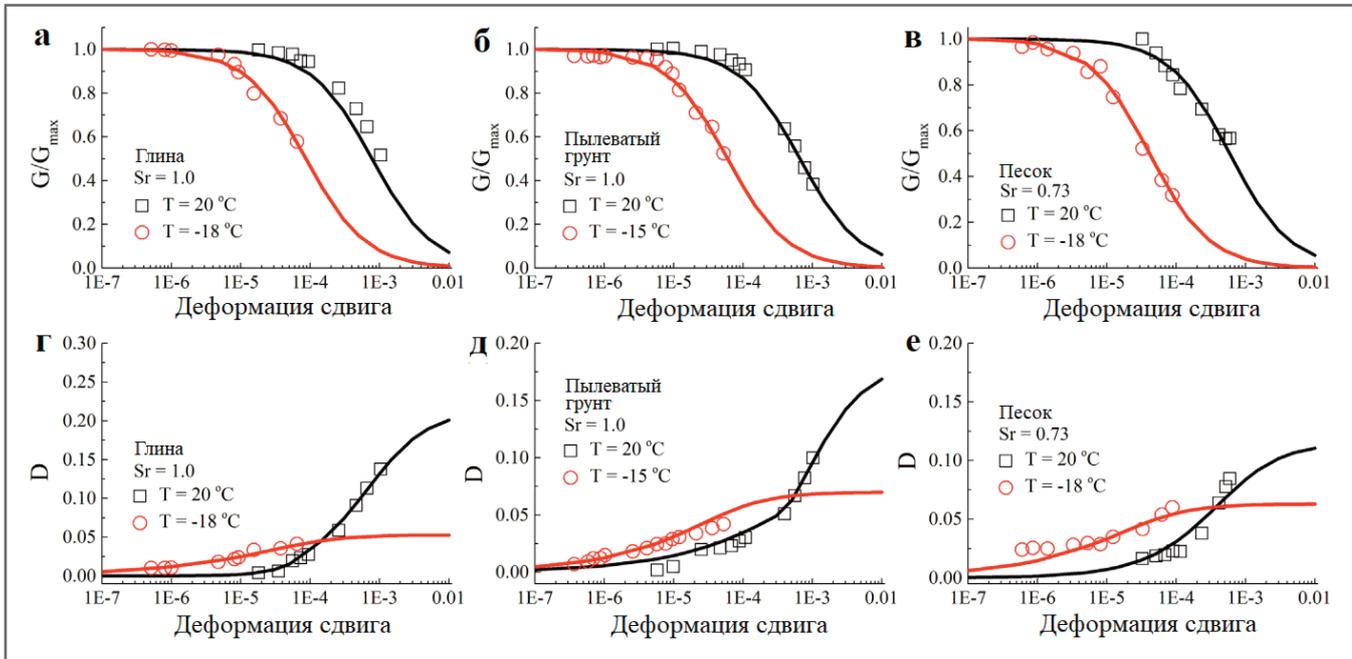


Рис. 6. Результаты испытаний грунтов разного состава методом резонансной колонки: а, б, в – отношение G/G_{max} для мерзлой глины, мерзлого пылеватого грунта и мерзлого песка соответственно; г, д, е – коэффициент поглощения D для мерзлой глины, мерзлого пылеватого грунта и мерзлого песка соответственно [10]

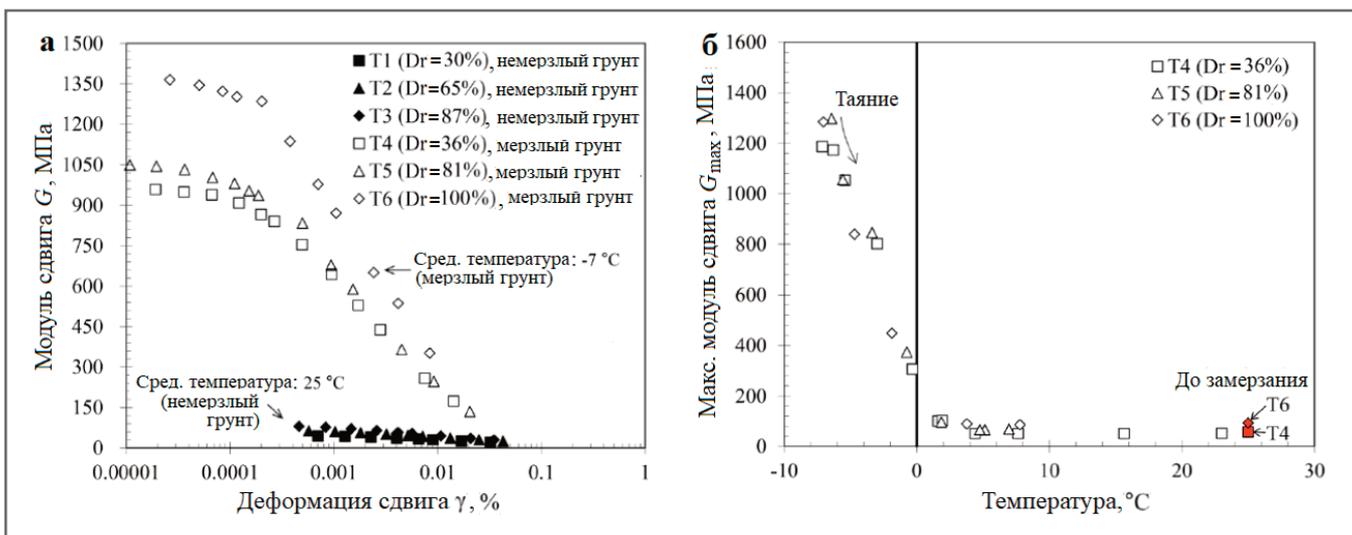


Рис. 7. Динамический модуль сдвига песчаных грунтов по результатам испытаний в резонансной колонке в зависимости от уровня деформации сдвига (а) и температуры (б) (D_r – относительная плотность мерзлого грунта, %) [11]

2×10^{-4} с всесторонним давлением 0,03 МПа. Результаты показали, что при увеличении удельной плотности увлажненного грунта от 1910 кг/м^3 до 2200 кг/м^3 начальный модуль сдвига мерзлого грунта увеличивается от 960 МПа до 1375 МПа при температуре минус 7°C . С увеличением температуры мерзлого грунта модуль сдвига значительно снижается. Так, при температуре минус 2°C модуль сдвига составляет 300–440 МПа (в зависимости от плотности). При температуре выше 0°C модуль сдвига ниже 100 МПа (рис. 7). Кроме того, деградация модуля сдвига при увеличении уровня деформации у

мерзлых грунтов идет интенсивнее, чем у немерзлых.

Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в среднем в 2–4 раза больше, чем у немерзлых. При увеличении температуры мерзлого грунта наблюдается тенденция к снижению коэффициента поглощения, однако это не так явно просматривается, как в случае модуля сдвига. При приближении температуры грунта к 0°C зафиксировано некоторое увеличение коэффициента поглощения (рис. 8) [11].

Обобщение и выводы ►

Приведем некоторое количественное обобщение показателей динамических

свойств мерзлых грунтов, полученных методом резонансной колонки. При низких отрицательных температурах менее минус 10°C начальный модуль сдвига мерзлого грунта имеет значение в среднем более 2000–3000 МПа. Увеличение температуры грунта до диапазона от минус 4°C до минус 7°C способствует снижению начального модуля сдвига до 900–1500 МПа. Мерзлые грунты с температурой минус 3°C и выше характеризуются начальным модулем сдвига в среднем от 1200 МПа (при минус 3°C) до 90 МПа (при минус $1,4^\circ\text{C}$).

Однако в отдельных работах, преимущественно 1980-х годов и в более

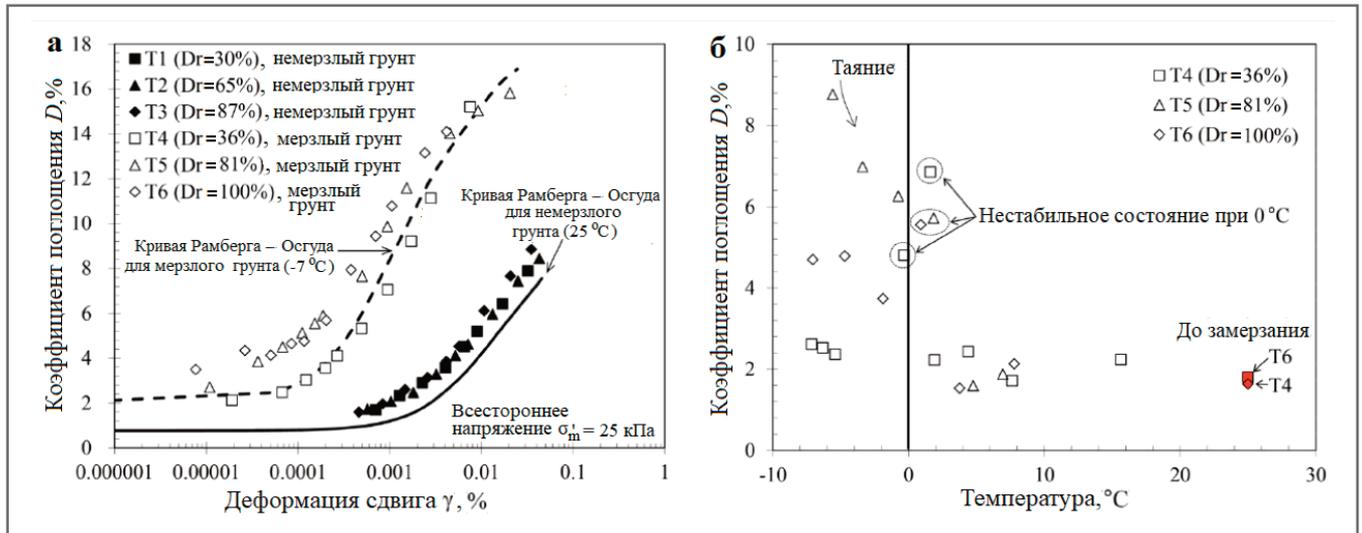


Рис. 8. Коэффициент поглощения песчаных грунтов по результатам испытаний в резонансной колонке в зависимости от уровня деформации сдвига (а) и температуры (б) (D_r – относительная плотность мерзлого грунта, %) [11]

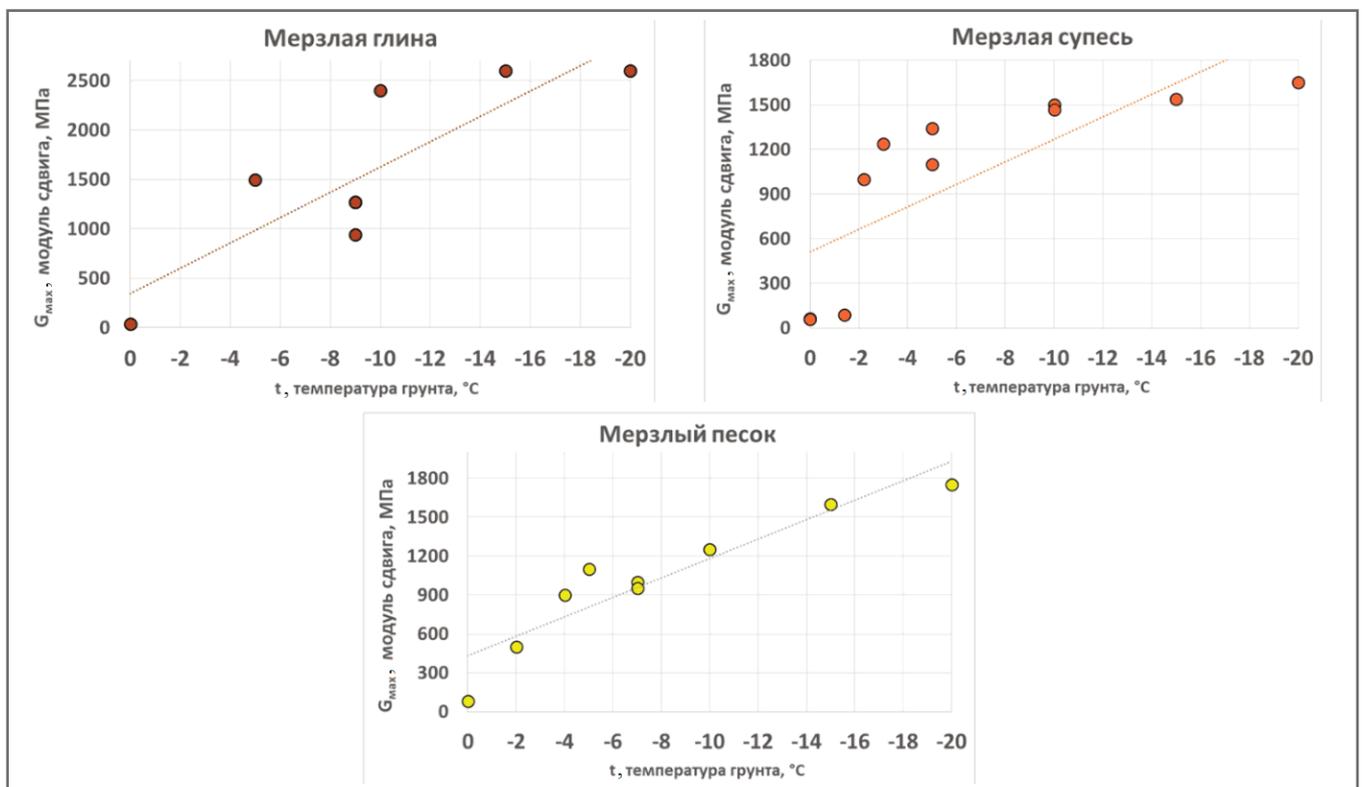


Рис. 9. Обобщенные графики зависимости начального модуля сдвига мерзлого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке

ранних, приводятся иные результаты, показывающие более высокие значения как модуля сдвига, так и резонансной частоты для мерзлых грунтов и мало соотносятся с данными, полученными современными учеными. Это может быть связано с особенностями применяемого оборудования. Так, по результатам некоторых исследований того времени модуль сдвига мерзлых грунтов доходит до 8000 МПа и более.

Обобщенные графики температурной зависимости начального модуля

сдвига мерзлых грунтов разного состава приведены на рисунке 9.

Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в целом варьирует в широком диапазоне. Так, при температуре грунта минус 5 °С и выше его значение изменяется от 0,08 до 0,12, при температуре минус 10 °С и ниже оно варьирует в диапазоне 0,05–0,07.

Информация о резонансной частоте в проанализированной литературе, к сожалению, приводится только для низкой отрицательной температуры.

Так, значение резонансной частоты при температуре мерзлого грунта минус 10 °С и ниже колеблется от 300 до 1000 Гц.

При сравнении результатов испытаний мерзлого и немерзлого грунта при одинаковой амплитуде деформаций в среднем получается, что динамический модуль сдвига мерзлого грунта выше примерно в 50 раз (и иногда более) по сравнению с немерзлым, Коэффициент поглощения мерзлого грунта выше, чем у немерзлого, в несколько раз. И

Список литературы ▶
(References) ▶

1. Yu X., Sun R., Yuan X., Chen Zh., Zhang J. Resonant column test on the frozen silt soil modulus and damping at different temperatures // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017. Vol. 6. № 4. P. 762–769. DOI:10.3311/PPci.10349.
2. Wang Sh., Niu F., Zhao L., Li Sh. The thermal stability of roadbed in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway // Cold Regions Science and Technology. 2003. Vol. 37. № 1. P. 25–34. DOI:10.1016/S0165-232X(03)00011-9.
3. Yu W., Lai Y., Zhang X., Zhang Sh. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology. 2004. Vol. 38. № 1. P. 31–42. DOI:10.1016/S0165-232X(03)00061-2.
4. Zhao S.P., Zhu Y.L., He P., Wang D.Y. Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2003. Vol. 22. № 2. P. 2677–2681.
5. Ling X., Li Q., Wang L., Zhang F., An L., Xu P. Stiffness and damping ratio evolution of frozen clays under long-term low-level repeated cyclic loading: experimental evidence and evolution model // Cold Regions Science and Technology. 2013. № 86. P. 45–54.
6. Boldyrev G.G., Idrisov I.Kh. Metody opredeleniya dinamicheskikh svoystv gruntov [Methods for determining the dynamic properties of soils]. M.: OOO “NPP “Geotek”, OOO “Prondo”, 2018. 488 s. (in Rus.)
7. Turcott-Rios E.E. Resonant column-testing of frozen soils // DDC. 1980. Vol. 8. № 4. P. 135.
8. Wilson Ch.R. (Ted S. Vinson). Dynamic properties of naturally frozen Farbanks silt. 1982. P. 317.
9. Al-Hunaidi M., Chen P.A., Rainer J.H., Tremblay M. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests // Canadian Geotechnical Journal. 1996. Vol. 33. № 3. P. 510–514. DOI:10.1139/T96-073.
10. Yu X., Liu H., Sun R., Yuan X.. Improved Hardin-Drnevich model for the dynamic modulus and damping ratio of frozen soil // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 153. № 1. DOI:10.1016/J.COLDREGIONS.2018.05.004.
11. Kim J.-H., Kwon Y.-M., Park K., Kim Y.S., Kim D.-S. Dynamic soil properties of frozen and unfrozen soils from Terra Nova Bay in Eastern Antarctica // Journal of the Korean geotechnical society. 2017. Vol. 33. № 3. P. 37–47. URL: <https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.3.37>.



Телеграм-канал журнала

Независимый электронный журнал
ГеоИнфо

- Новости
- Статьи
- Обсуждения

<https://t.me/geoinfonews>