

Особенности проведения расчетов ожидаемых сейсмических воздействий на участках распространения многолетнемерзлых грунтов

- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва
- Воробьев М.А., Фаргиев И.И., РГГУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва

Аннотация: В статье рассмотрены проблемы расчёта ожидаемых сейсмических воздействий на участках распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) при выполнении сейсмического микрорайонирования. Показано, что стандартные нелинейные динамические характеристики (зависимости модуля сдвига и демпфирования от деформации), полученные для талых и мерзлых грунтов, существенно отличаются. Отмечено, что в программных комплексах NERA, DEEPSOIL и ProShake отсутствуют встроенные кривые для мерзлого состояния, что требует ручного ввода пользователем. На примере сейсмогеологической модели, включающей слой талого и мерзлого песка, выполнено численное моделирование процесса оттаивания в программе NERA. Установлено, что с увеличением мощности талых грунтов возрастает пиковое ускорение, а при достижении определенной мощности талого слоя изменяется форма спектра реакции со смещением пикового значения в область более длинных периодов.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, многолетнемерзлые грунты, инженерная геофизика, сейсморазведка, криолитозона, сейсмическое микрорайонирование.

Введение

Сейсмическое микрорайонирование (СМР) является обязательной частью инженерно-геологических изысканий, выполняемых в сейсмически опасных районах [1, 2]. Ключевой задачей СМР выступает определение скоростей распространения поперечных волн (V_s) в грунтовой толще на участке изысканий, поскольку эти скорости непосредственно используются для расчёта приращения сейсмической интенсивности и построения сейсмогеологических моделей [3–5].

На территориях распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), занимающих значительную часть Российской Федерации, сейсмические свойства грунтовой толщи подвержены существенным сезонным и техногенным (в ходе строительства и эксплуатации) изменениям. Наличие сезонно-мерзлого слоя, а также возможность техногенного или климатического оттаивания ММГ приводят к изменению скоростных и

нелинейных динамических характеристик грунтов. При этом существующие нормативные документы и программные комплексы (NERA, DEEPSOIL, ProShake) не содержат встроенных нелинейных зависимостей модуля сдвига и демпфирования для мерзлого состояния, а методика прогноза сейсмических воздействий для оттаивающих грунтов разработана недостаточно.

Целью настоящей работы является оценка влияния мощности талых грунтов на параметры ожидаемых сейсмических воздействий (пиковое ускорение и спектры реакции) при оттаивании многолетнемерзлых грунтов на основе моделирования в программе NERA.

Проблемы проведения расчетов для участков распространения ММГ

Расчет ожидаемых сейсмических воздействий является важным этапом сейсмического микрорайонирования (СМР), на котором получают основные

количественные характеристики движения грунта непосредственно на площадке строительства.

В соответствии с требованиями нормативных документов и сложившейся практикой, основным инструментом таких расчетов служат одномерные модели распространения сейсмических волн в слоистой грунтовой толще, реализующие либо эквивалентно-линейный, либо нелинейный подход к описанию динамического поведения грунтов. К числу наиболее широко применяемых в отечественной и мировой практике программных средств относятся NERA, DEEPSOIL и ProShake, каждая из которых обладает определенными вычислительными особенностями, но в то же время опирается на общую систему исходных данных.

В рамках данной работы расчеты ожидаемых воздействий будут выполняться в специализированной программе NERA. Программа NERA (Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil deposits) разработана в [3]. Ранее авторами уже была опубликована серия работ по особенностям проведения расчетов сейсмических воздействий в программе NERA [4–6], поэтому процедура расчетов здесь подробно не описывается.

Для проведения расчётов в программе NERA требуется ввести входное сейсмическое воздействие, которое представляет собой акселерограмму, подаваемую на нижнюю границу модели. Акселерограмма должна быть представительной для сеймотектонической обстановки района, соответствовать по магнитуде, расстоянию и типу подвижки зонам возможных очагов землетрясений (зонам ВОЗ), выделенным на этапах общего сейсмического районирования (ОСР) и детального сейсмического райо-

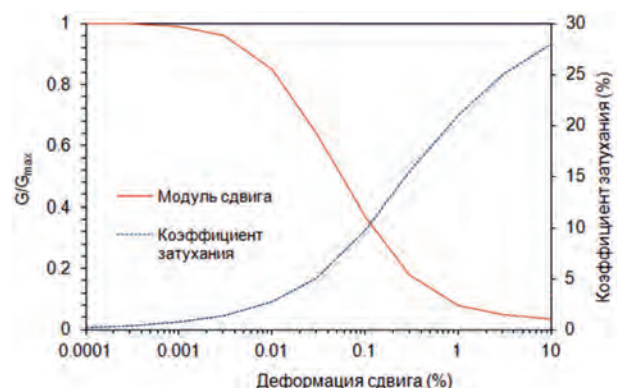
нирования (ДСР).

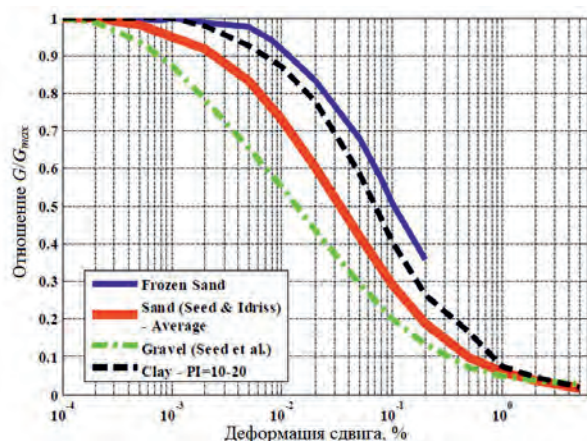
Кроме исходной акселерограммы необходимо внести данные о сейсмогеологической модели, которая представляет собой систему слоёв, для каждого из которых приводятся мощность, скорости поперечных волн V_s (м/с), удельный вес (в кН/м³) и тип грунта — глинистый, песчаный или условно скальный.

Центральное место в модели грунтовой толщи занимают нелинейные динамические характеристики, задаваемые для каждого слоя, зависимостью нормированного модуля сдвига G/G_{max} и коэффициента демпфирования ξ (%) от величины сдвиговой деформации γ (в долях единицы или процентах). Диапазон деформаций должен охватывать уровни от 10^{-6} до 10^{-2} (1%), что позволяет корректно описать поведение грунта как при слабых, так и при сильных землетрясениях. Типовые зависимости для различных типов талых грунтов, широко используемые в практике изысканий, были получены в фундаментальных работах Seed и Idriss (рисунок 1.) [7], Vucetic и Dobry [8] и впоследствии уточнены многими исследователями.

Однако для мерзлых грунтов подобные зависимости получены в ограниченном числе исследований в связи со

▼ Рис. 1. Зависимости модуля сдвига G и коэффициента затухания ξ от деформации сдвига γ , применённые в программе NERA для песков [3,7].





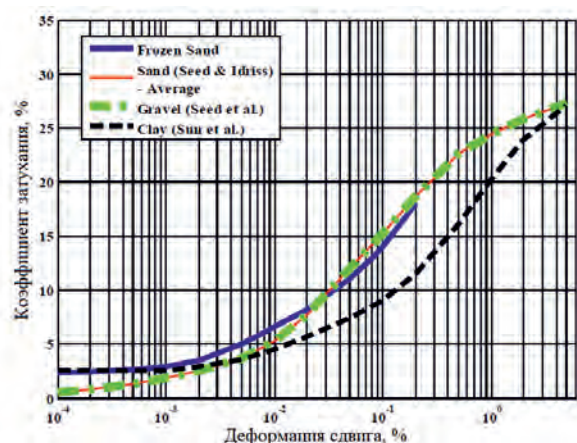
▲ Рис. 2. Зависимости модуля сдвига G от деформации сдвига γ , для мерзлых и талых грунтов [9].

сложностью динамических лабораторных испытаний при отрицательных температурах. В этом состоит одна из ключевых проблем при расчетах ожидаемых сейсмических воздействий на участках распространения многолетнемерзлых грунтов.

В качестве примера рассмотрим сравнение зависимостей модуля сдвига G и коэффициента затухания ξ от деформации сдвига γ для талых и мерзлых грунтов (рисунок 2-3)[9]. Как показано на рисунке 2, положение кривой для мерзлых песков (синий цвет) существенно отличается от расположения кривой для талых (красный цвет); максимально близко расположена кривая для глинистых грунтов с числом пластичности 10–20. Зависимости коэффициента затухания ξ от деформации сдвига γ для мерзлых и талых песков (рисунок 3) отличаются не так существенно.

программах для расчетов ожидаемых сейсмических воздействий и должны вводиться пользователем самостоятельно. Отсутствие корректно заданных зависимостей для каждого типа грунта в сейсмогеологической модели может приводить к погрешности в 10 и более процентов.

Другая проблема связана непосред-



▲ Рис. 3. Зависимости коэффициента затухания ξ от деформации сдвига γ , для мерзлых и талых песков [9].

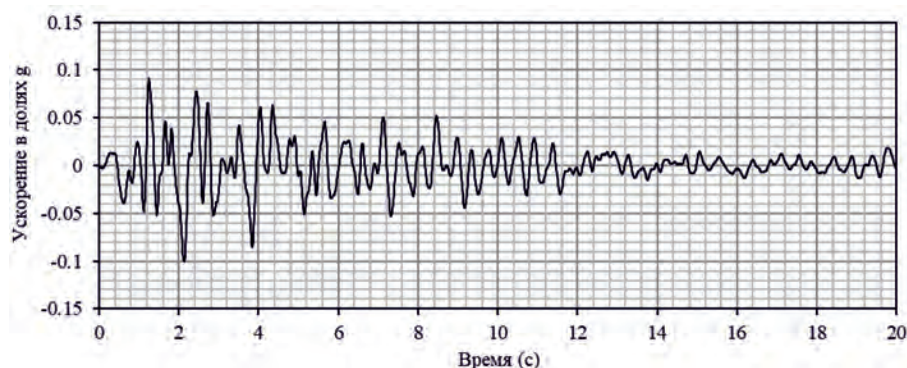
ственно с методологией сейсмического микрорайонирования. При проведении работ по сейсмическому микрорайонированию на участках с ММГ необходимо выполнять прогноз изменения расчетной сейсмичности в связи с возможным оттаиванием многолетнемерзлых грунтов. В рамках метода сейсмических жесткостей данный прогноз выполняется хотя и с определенными сложностями [10].

В свою очередь, пересчет ожидаемых сейсмических воздействий для сейсмогеологических моделей с оттаявшими грунтами практически не выполняется. С одной стороны, если приведенные в техническом отчете сейсмические воздействия носят формальный характер и не используются проектировщиками для расчета конструкций, данная проблема не является критической. С другой стороны, отсутствие такого пересчета при вовлечении соответствующих данных в строительные расчеты может привести к занижению проектных нагрузок и, как следствие, к снижению сейсмостойкости проектируемого здания.

Как и в случае метода сейсмических жесткостей, для выполнения расчета ожидаемых сейсмических воздействий необходимо знать, какая мощность

Тип грунта	Мощность, м	Плотность, г/см ³	Скорость поперечных волн, м/с
Талый песок	2	1.98	200
Мерзлый песок	28	2.00	800
Скальный грунт		2.50	1600

▲ Табл. 1. Параметры сейсмогеологической модели.



▲ Рис. 4. Акселерограмма исходного сейсмического воздействия.

грунтов может перейти в талое состояние и как при этом изменятся их физико-механические и сейсмические свойства. Этой проблеме была посвящена статья [10], в которой подробно описана необходимость применения теплотехнических расчетов для прогноза изменения сейсмической интенсивности.

Для демонстрации изменения интенсивности ожидаемых сейсмических воздействий, обусловленного оттаиванием грунтов в разрезе, выполним серию расчетов в программе NERA для следующей сейсмогеологической модели.

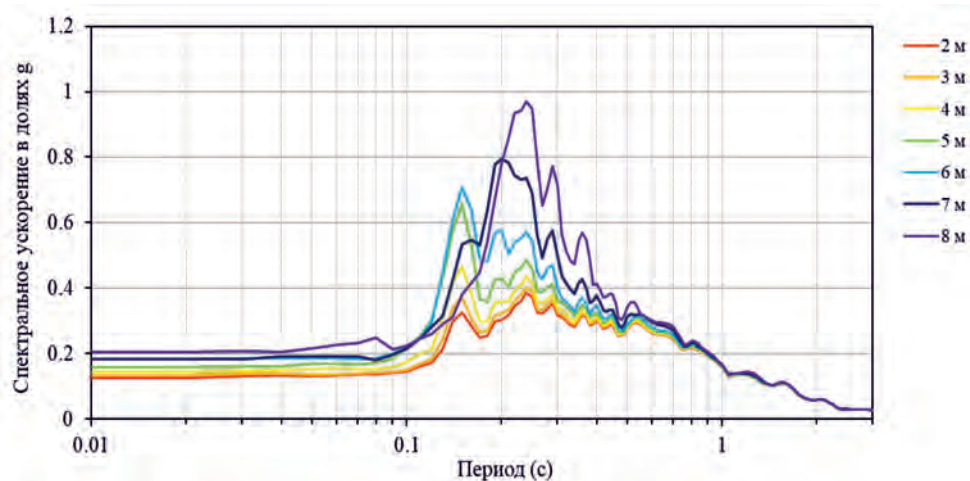
В качестве исходного сейсмического воздействия (входной акселерограммы)

использована синтезированная запись землетрясения с параметрами: магнитуда 6,5, эпицентральное расстояние 40 км, тип подвижки в очаге – сброс. Акселерограмма в программе была масштабирована до значения пикового ускорения 0,1g (рисунок 4).

Для моделирования процесса оттаивания производилось постепенное изменение мощностей талых и мерзлых грунтов в сейсмогеологической модели с шагом 1 м, и для каждого шага выполнялся расчет ожидаемых сейсмических воздействий.

Результаты расчетов в виде сравнения полученных спектров реакции приведены на рисунке 5. Из рисунка видно, что

► Рис. 5. Спектры реакции для разной мощности талых грунтов в разрезе.



Мощность талых грунтов в сейсмогеологической модели, м	Значение пикового ускорения расчетной акселерограммы, g
2	0.125
3	0.135
4	0.146
5	0.16
6	0.183
7	0.195
8	0.205

▲ Табл. 2.

при мощности талых грунтов в разрезе до 6 м происходит увеличение спектрально-го ускорения без изменения формы спектра реакции. Начиная с 6 метров наблюдается не только увеличение спектрального ускорения, но и изменение формы спектра реакции со смещением пикового значения в сторону более длинных периодов.

В таблице 2 представлены результаты расчетов в виде сравнения пиковых ускорений ожидаемых сейсмических воздействий. Как следует из полученных данных, с увеличением мощности талых грунтов в сейсмогеологической модели наблюдается рост пикового ускорения.

Выводы

1. Стандартные нелинейные динамические характеристики (зависимости модуля сдвига и демпфирования), встроенные в программы NERA, DEEPSOIL и ProShake, получены для талых грунтов и существенно отличаются от мерзлых.

2. Численное моделирование в программе NERA показало, что с увеличением мощности талых грунтов в разрезе возрастает пиковое ускорение. При достижении мощности талого слоя 6 м и более происходит не только рост ускорений, но и существенное изменение формы спектра реакции – смещение пика в область более длинных периодов, что критически важно для расчёта периода собственных колебаний зданий.

3. Для составления корректных сейсмогеологических моделей необходимо привлекать результаты теплотехнических расчётов в части прогноза изменения мощности талых грунтов.

4. В настоящей работе не рассматривались такие важные аспекты, как изменение резонансной частоты сейсмогеологической модели при моделировании оттаивания, а также вариативность исходных сейсмических воздействий. Указанные вопросы планируется изучить и представить в последующих публикациях.

Литература

1. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Стандартинформ, 2018.
2. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрозонирования. М.: Стандартинформ, 2017.
3. Bardet J.P., Tobita T., 2001. NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Publishing house of the University of Southern California, Los Angeles, CA, USA.
4. Кауркин М.Д., Романов В.В. Особенности проведения расчета сейсми-

ческих воздействий в специализированной программе NERA. Геоинформатика. 2019. № 1. С. 44-52.

5. Кауркин М.Д., Романов В.В. Расчет сейсмических воздействий в специализированных программах NERA и EERA. Инженерные изыскания. 2017. № 4. С. 54-62.

6. Кауркин М.Д., Романов В.В., Андреев Д.О. Особенности проведения расчетов сейсмической интенсивности на участках распространения скальных грунтов. Инженерные изыскания. 2021. Т. 15. № 3-4. С. 70-79.

7. Seed H.B., Idriss I.M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. – Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley, 1970.

8. Vucetic M., Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response // Journal of Geotechnical Engineering. – 1991. – Vol. 117, No. 1. – P. 89-107.

9. Yang Z.J., Dutta U., Xu G., Hazirbaba K. Effects of Permafrost and Seasonally Frozen Ground on the Seismic Response of Transportation Infrastructure Sites, 2010. 92 p.

10. Кауркин М.Д., Кауркин В.Д. О необходимости разработки методики прогноза изменения сейсмичности на участках распространения многолетнемерзлых грунтов. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 72-76.