

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.347.097

DOI: [10.46698/VNC.2021.77.59.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.77.59.006)

Оригинальная статья

Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным

В.Б. Заалишвили , **Д.А. Мельков** , **А.Ф. Габараев** , **Т.И. Мерзликин** 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru

Статья поступила: 21.10.2021, после рецензирования: 18.11.2021, принята к публикации: 29.11.2021

Резюме: Актуальность работы. Исследования нелинейных явлений в грунтах, начатые в России почти 60 лет назад, явились стимулом современного развития исследований сейсмоаномальных явлений в комплексе геофизических показателей, наблюдающихся при сильных и разрушительных землетрясениях. Кроме чисто научных интересов большой интерес вызывает вопрос прогнозирования поведения грунтов и сооружений с точки зрения адекватности ожидаемому проявлению сейсмического воздействия. Адекватное изучение нелинейности, являющейся неотъемлемой характеристикой природных явлений, позволит приблизить соответствующее антисейсмические мероприятия к реальным особенностям проявлений сейсмического эффекта при сильных землетрясениях. **Целью** работы являлось построение расчетной модели, описывающей явления, наблюдаемые в грунтовой среде при сильных сейсмических воздействиях и сопоставление расчетных данных с результатами инструментальных наблюдений. **Методы.** В работе анализируется инструментальная запись, полученная на слабых грунтах, на основе вейвлет анализа. Моделируются импульсы различной продолжительности в среде с различной степенью проявления нелинейных свойств (крутизны нелинейной зависимости напряжение-деформация) методом конечных элементов. **Результаты.** В результате установлены различия в спектральном составе моделируемых импульсов. Сильное проявление нелинейных свойств характеризуется резкими изменениями фаз колебаний, в фазах высокой скорости нарастания амплитуд. В нелинейных спектрах происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику, тем сильнее, чем сильнее нелинейность кривой напряжение-деформация.

Ключевые слова: землетрясения, нелинейность, сильные воздействия, грунтовая толща.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Габараев А.Ф., Мерзликин Т.И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11(4): 70-82. DOI: [10.46698/VNC.2021.77.59.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.77.59.006).

G E O P H Y S I C S

[DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.77.59.006)

Original paper

Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data

V.B. Zaalishvili , **D.A. Melkov** , **A.F. Gabaraev** , **T.I. Merzlikin** 

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru

Received: 21.10.2021, revised: 18.11.2021, accepted: 29.11.2021

Abstract: Relevance. Studies of nonlinear phenomena in soils, which began in Russia almost 60 years ago, have stimulated the modern development of studies of seismically anomalous phenomena in the complex of geophysical indicators observed during strong and destructive earthquakes. In addition to scientific interests, the issue of forecasting the behavior of soils and structures from the point of view of adequacy to the expected manifestation of seismic impact is of great interest. An adequate study of nonlinearity, which is an integral characteristic of natural phenomena, will make it possible to bring the corresponding antiseismic measures closer to the real features of the manifestations of the seismic effect during strong earthquakes. **Aim.** The aim of the work was to build a computational model describing the phenomena observed in a soil medium under strong seismic effects and to compare the computed data with the results of instrumental observations. **Methods.** The paper analyzes an instrumental record obtained on soft soils using wavelet analysis. With the help of the finite element method pulses of different duration are modeled in a medium with different degrees of nonlinear properties manifestation (steepness of nonlinear stress-strain dependence). **Results.** As a result, differences in the spectral composition of the modeled pulses were determined. A strong manifestation of nonlinear properties is characterized by sharp changes in the phases of vibrations, in the phases of a high rate of amplitude rise. In nonlinear spectra, the energy is redistributed to a higher frequency region, which is a multiple of the main peak and the stronger the nonlinearity of the stress-strain curve is stronger.

Keywords: earthquakes, nonlinearity, strong impacts, soil strata.

For citation: Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Gabaraev A.F., Merzlikin T.I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11(4): 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.

Введение

При интенсивных воздействиях в рыхлых грунтах наблюдаются различные нелинейные явления, выраженные, как правило, в увеличении сейсмического эффекта. В то же время, при сильных воздействиях сейсмический эффект из-за нелинейности грунтов может иногда значительно уменьшаться, как например при Нотридском землетрясении (США, 1994). Таким образом, приближение к реальным условиям процессов сейсмического воздействия и реакции грунтов должно предполагать непосредственный учет нелинейных свойств грунтов.

Перечислим кратко основные признаки нелинейных систем. Это – неприменимость принципа суперпозиции, свободные колебания нелинейных систем не всегда затухающие. Так при наличии сопротивления в нелинейных системах могут наблюдаться периодические, устойчивые, свободные колебания. В нелинейных системах вынужденные колебания от гармонической силы могут происходить не только с

ее периодом, но и с периодами, равными целым кратным периода возмущающей силы, т.е. при этом можно наблюдать несколько резонансов. И, самое главное, собственный период нелинейной системы, как правило, зависит от начальных условий, в частности, от величины амплитуды возмущающей силы.

При воздействии на грунтовую толщу относительно умеренного динамического воздействия, грунты ведут себя в соответствии с основными положениями теории упругости [Снеддон, Берри, 1961], что позволяет определять допустимые нагрузки, при которых в зданиях и сооружениях не возникают напряжения или перемещения, опасные для их прочности. Физические законы упругости рыхлых грунтов при малых деформациях отражают взаимно однозначные зависимости между значениями напряжений и деформаций, в отличие от законов пластичности, где напряжения зависят от процесса изменения деформаций.

Основным физическим законом теории упругости является обобщенный закон Гука, согласно которому нормальные напряжения линейно зависят от деформаций. С помощью указанного закона решается весьма обширный круг практических задач, правда, пределы его применимости ограничены.

Отметим, что строгой линейности в таком фундаментальном физическом законе, как закон Гука, все же нет – существует определенный допуск (по интервалу напряжений, отклонение от линейности) в пределах которого этот закон выполняется. Известно, что еще в 1849 г. Британская Королевская комиссия по железу «отменила» закон Гука и рекомендовала пользоваться нелинейными зависимостями между деформациями и напряжениями [Белл, 1984].

Первой работой, которая была посвящена вопросам непосредственной оценки физической нелинейности в грунтах, явилась теоретическая работа А.В.Николаева [Николаев, 1967]. Позже А.А.Гвоздев и В.В.Кузнецов исследовали нелинейные явления в эпицентре небольшого взрыва [Гвоздев, Кузнецов, 1977]. Как показывают соответствующие исследования, в формировании сейсмических волновых полей в реальных средах определенную роль играет физическая нелинейность, характеризующаяся нелинейностью связи напряжения и деформации.

Экспериментальные исследования в методическом плане необходимо было проводить на участках с известной проявленной интенсивностью землетрясения, что предполагает сопоставление параметров нелинейности соответствующих грунтов. С другой стороны, из существующих приемов оценки нелинейности необходимо было избрать наиболее оптимальные, дающие возможность получения указанных параметров в виде, который мог быть непосредственно использован в последующем, при решении практических задач сейсмического микрорайонирования.

Действительно, при интенсивных сейсмических воздействиях, в грунтах возникают явления, которые не могут быть описаны с помощью линейной теории упругости. В частности, при возрастании возмущающей силы и амплитуды колебаний фундаментов наблюдается смещение максимума резонансной кривой в сторону длинных периодов. С увеличением площади фундамента, при постоянной возмущающей силе и постоянном давлении на грунт, наблюдается увеличение частоты его собственных колебаний. Хорошо видно, что при трансформации линейно-упругих деформаций в нелинейно-упругие энергия «перекачивается» в ВЧ диапазон спектра, оставаясь постоянной, и площадь реального спектра колебаний не меняется – рис. 1 [Bonnet, Heitz, 1994]. Проявление нелинейных свойств грунтов, в высокочастотной области спектра инструментально было установлено одним из авторов

(Заалишвили) ещё в 1987 г. при исследованиях грунтов мощным невзрывным импульсным источником СИ – 32 на территории г. Гори (рис. 2) [Заалишвили, 1987].

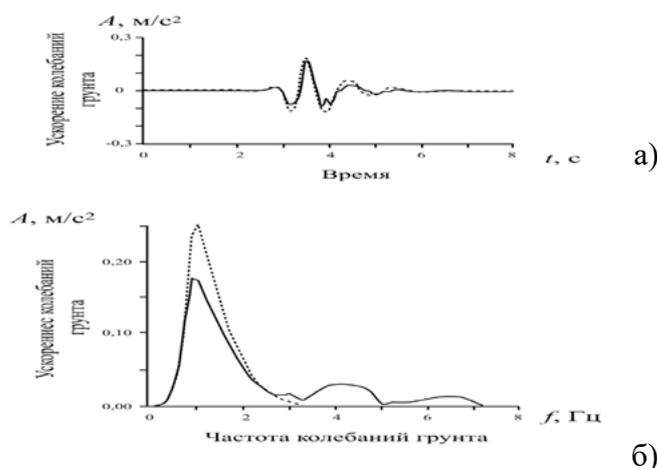


Рис. 1. Сопоставление расчетных акселерограмм (а) и соответствующих спектров Фурье (б) в линейном (пункт.) и нелинейном решениях [Bonnet, Heitz, 1994] /
 Fig. 1. Comparison of the calculated accelerograms (a) and the corresponding Fourier spectra (b) in the linear (dash line) and nonlinear solutions [Bonnet, Heitz, 1994]

Хорошо видно, что на первой записи наблюдается неупругая реакция грунта, и возврат колебаний в исходное положение связан с типом регистрирующего прибора и его инерционными характеристиками.

При интенсивных нагрузках на «мягких» или рыхлых грунтах могут наблюдаться весьма сильные остаточные деформации грунтов, во много раз превышающие упругие. Задачи эти решаются более или менее приближенно на основе использования различных моделей поведения (Фогхт, Прандтль, С.С. Григорян и т.д.) [Григорян, 1960; Ержанов и др., 1984].

Наилучшее приближение к реальным условиям землетрясения с точки зрения, например, сейсмического микрорайонирования должно предполагать непосредственный учет степени нелинейности грунтов. Действительно, многие классические законы сейсмологии плохо отображают явления, наблюдающиеся в ближней зоне землетрясения. Законы, основанные на теории малых деформаций здесь, практически, не выполняются. При интенсивных воздействиях меняются модули упругости грунтов, падает их несущая способность, характеризуемая, в большинстве своем, «мягкой» нелинейностью. Кроме того, волны в процессе распространения обогащаются высокочастотными составляющими, т.е. идет накопление нелинейности и т.д.

Поскольку при сильных землетрясениях (Ниигата, 1966; Кобе, 1995) наблюдались разжижение грунта и неравномерные осадки сооружений, будет физически обоснованным оценить возможную неупругость грунтов при интенсивных природных (сейсмических) и искусственных динамических (импульсных и вибрационных) воздействиях (рис. 2) – актуальнейшая задача инженерной сейсмологии, сейсмостойкого строительства, инженерной геофизики и геотехнологии. Это обуславливает необходимость прямой инструментальной оценки величины зон неупругости и нелинейности, которая становится вполне реализуемой благодаря применению современной цифровой аппаратуры. Проведение экспериментов должно сопровождаться разработкой численных моделей, описывающих наблюдаемые явления. При этом на начальном этапе может быть рассмотрена модель плоской свободной

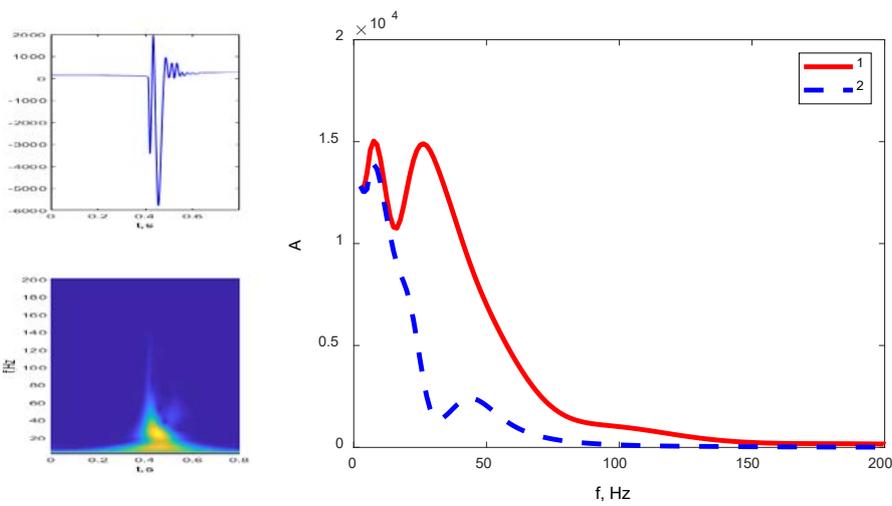
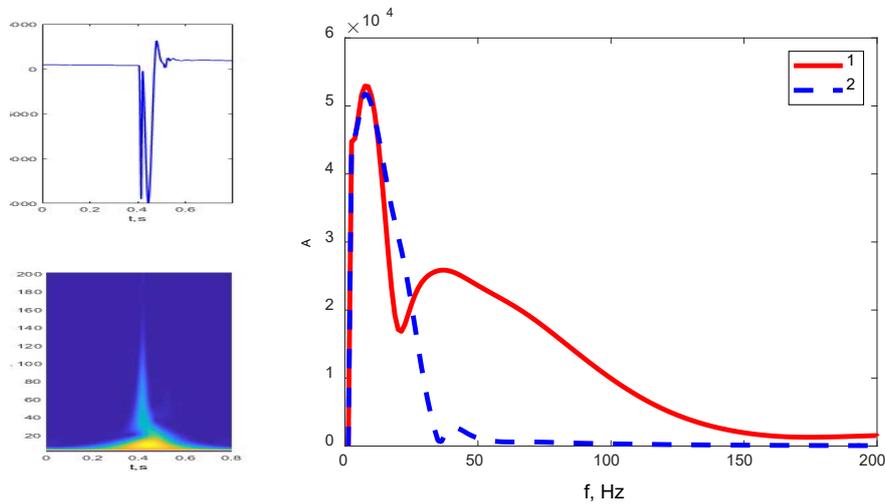
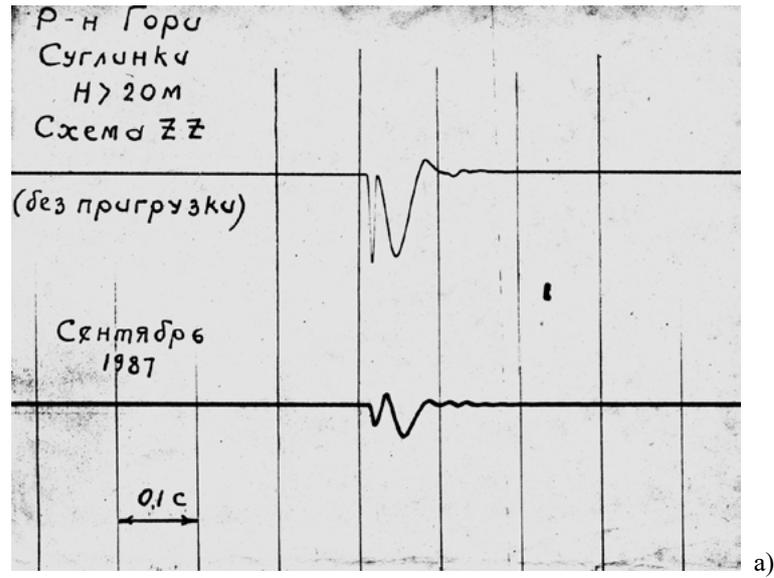


Рис. 2. Эксперимент в г. Горы, 1987 г. а) Инструментальная запись; б), в) вейвлет разложение сигналов и спектральный состав высокочастотной – 1 и низкочастотной – 2 составляющих /
Fig. 2. Experiment in Gori, 1987 a) Instrumental recording; б), в) wavelet decomposition of signals and spectral composition of high-frequency – 1 and low-frequency – 2 components

поверхности при различных уровнях воздействия, как, например, в работе [Gicev, et al., 2021], в которой использован метод конечных разностей. В данной работе рассматривается построение модели на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов

Расчетную среду представляют в виде совокупности элементов, в целом, образующих модель с произвольными границами раздела. На модели выделяют отдельные части подсистемы, разделенные на конечные элементы. Входными данными при этом являются [Полтавцев и др., 1998]:

- номера закрепленных узлов;
- объемная масса ρ , коэффициент Пуассона μ и динамический модуль упругости E для каждого элемента;
- номера узлов, для которых выдаются результаты расчетов;
- входная акселерограмма (или амплитуда и период синусоиды).

В результате расчета для заданных номеров узлов конечно-элементной модели выдаются:

- акселерограммы с заданным шагом дискретизации;
- спектр реакции ускорения, построенный по расчетной акселерограмме;
- максимальная величина ускорения.

Подробное описание метода конечных элементов дается в работе [Бате, Вильсон, 1982].

Согласно МКЭ континуум рассматривают в качестве совокупности дискретных элементов (границы которых определяются узловыми точками). Делают допущение, что реакция континуума на внешнее воздействие может быть описана реакцией узловых точек.

На основе принципа д'Аламбера инерционные силы рассматривают как составную часть объемных сил. В результате с учетом диссипации уравнение примет вид:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (1)$$

- где M – матрица масс,
- K – матрица жесткости ансамбля;
- C – матрица демпфирования.

На практике часто используются приближенные методы вычисления матриц. Так, для треугольного элемента матрицу M вычисляют, предполагая, что в узле сосредоточена $1/3$ всей массы элемента. Матрицу C вычисляют по следующей формуле, предполагая демпфирование по Релею [Бате, Вильсон, 1982]:

$$C = \alpha M + \beta K, \quad (2)$$

где α и β – постоянные, определяемые обычно по значениям коэффициента демпфирования системы для нескольких частот колебаний.

Зависимость напряжение-деформация

Поведение свойств грунта описывается зависимостью, связывающей функции деформации $\gamma(z, t)$ и касательного напряжения $\tau(z, t)$ (t – время) [Hardin, Drnevich, 1972; Bonnet, Heitz, 1995]:

$$\tau = G(\gamma)\gamma, \quad G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \frac{|\gamma|}{\gamma_0}}, \quad \gamma_0 = \frac{\tau_{\max}}{G_0}, \quad (3)$$

τ_{\max} – предельно допустимое (максимальное) значение касательного напряжения. Иначе,

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \alpha|\gamma|}, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{1}{\gamma_0}$ – нелинейный параметр, соответствующий тому или иному типу

грунта [Vanab et al, 2012; Voaga et al., 2021].

Далее вводится в рассмотрение коэффициент, т.н. коэффициент потерь, зависящий от деформации, и определенной зависимостью связанный с модулем сдвига

$G(\gamma)$:

$$\beta(\gamma) = \beta_0 + [\beta_m - \beta_0]\varphi(\gamma), \quad (5)$$

$$\varphi(\gamma) = \frac{\alpha|\gamma|}{1 + \alpha|\gamma|}$$

β_0 – коэффициент поглощения при слабом уровне воздействия,

β_m – коэффициент поглощения при деформациях грунта с нелинейными свойствами при интенсивной нагрузке на среду.

Нелинейные колебания грунта по данным расчета численным способом метода конечных элементов (МКЭ) сейсмического микрорайонирования

Задачу определения реакции грунтового массива на динамическое воздействие, учитывая нелинейные свойства грунта, можно решить, используя метод конечных элементов (МКЭ) подобно подходу, предложенному В.Б. Заалишвили и М.Г. Отиашвили [Заалишвили и др., 2001].

При этом, грунтовая среда или толща представлена в виде двухмерного массива, аппроксимированного треугольными конечными элементами. Сетка из треугольных элементов позволяет достаточно точно описать любую форму рельефа и слоистой структуры грунтового массива со своими физико-механическими параметрами. В пределах конечного элемента грунт однороден с присущими ему характеристиками, изменяющимися во времени в зависимости от интенсивности воздействия. В качестве воздействия используют акселерограмму землетрясения горизонтального или вертикального направления, задаваемую, как правило, к основанию грунтового массива. Грунт находится в условиях плоской деформации и рассматривается как ортотропная среда. Оси ортотропии совпадают с направлениями главных напряжений.

Задачу нелинейной динамики грунтового массива решают путем последовательного определения напряженно-деформированного состояния системы в каждый момент времени (дискретизации акселерограммы), учитывая состояние системы на предыдущем шаге. На каждом шаге система – линейно-упругая.

Для построения расчетной модели рассматривалась толща глинистых грунтов с $V_s=300$ м/с мощностью 20 метров. Расчетная сетка строилась для прямоугольной области шириной 50 метров. Внешнее воздействие задавалось в нижней части массива. Использовался генератор треугольных сеток, максимальный размер элемента был задан не более 0.5 м.

Таким образом, если рассматривать, что на длину волны приходится не менее 10 узловых точек, моделируемая максимальная частота колебаний или максимальная частота колебаний, которая может быть рассчитана для данной сетки, составит 60 Гц. В результате анализа шаг по времени был выбран равным 0.02 с, что соответствует частоте дискретизации 50 Гц. Внешнее воздействие моделировалось гармоническим колебанием, нормированным функцией Гаусса, т.е. функцией локализованной по частоте и времени и, таким образом, по сути, представляющей собой вейвлет функцию (действительный вейвлет Морле):

$$U(f,t)=U_0 \sin (2\pi f (t-t_0)) \exp ((t-t_0)^2/\sigma^2) \quad (6)$$

где f – частота, t – время,

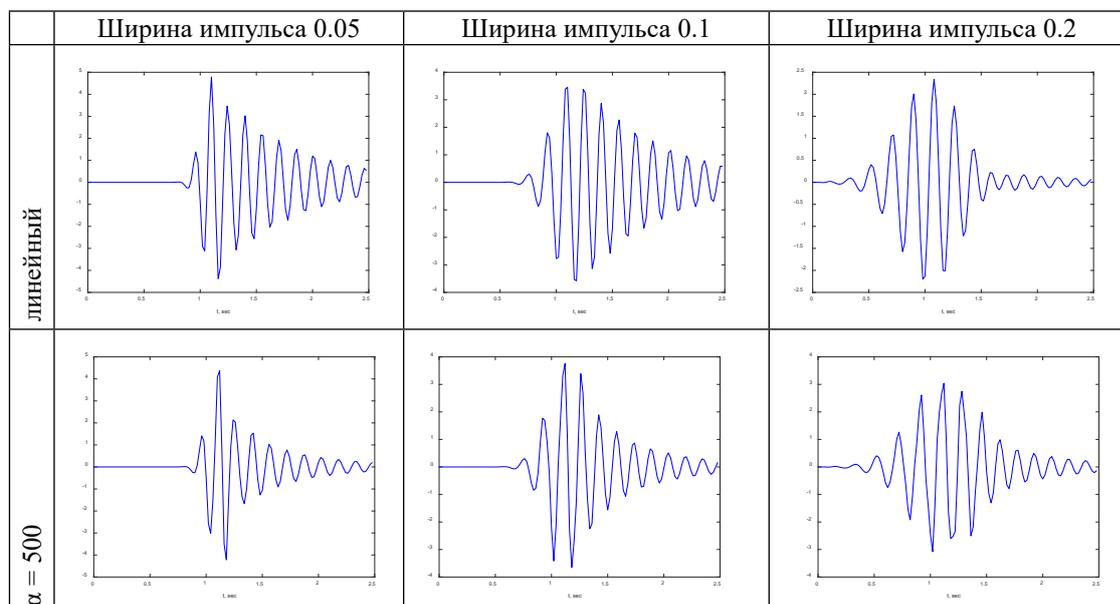
t_0 – момент времени, в который задается максимум (центр) функции,

σ^2 – параметр, определяющий ширину (продолжительность) импульса.

Известно, что продолжительность колебаний является важным фактором, влияющим на повреждаемость объектов [Аптикаев, 2021].

Параметр t_0 был выбран равным 1 с при общей продолжительности рассчитываемого интервала 2.5 с. Частота воздействия – 5 Гц. Расчеты выполнялись для различной ширины импульса: 0.05, 0.1 и 0.2 и параметра нелинейности α – 0 (линейный расчет), 500 и 2000. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

На каждом временном шаге выполнялись расчеты уравнения (1) с учетом свойств среды, зависящих от текущих деформаций в соответствии с выражениями (4)-(5).



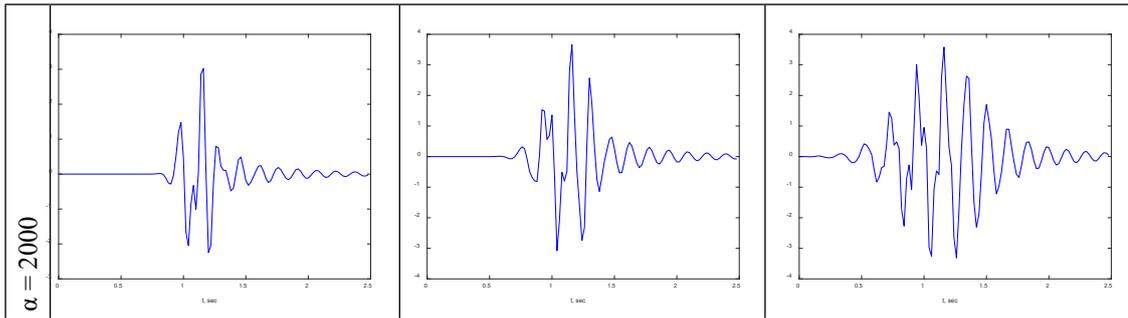
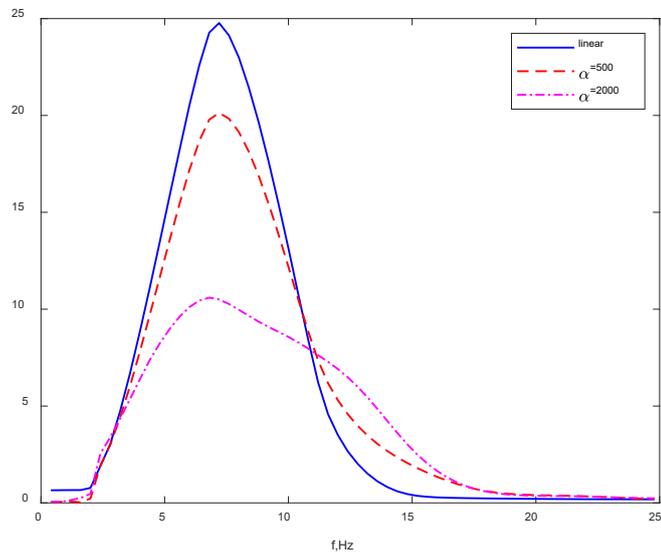
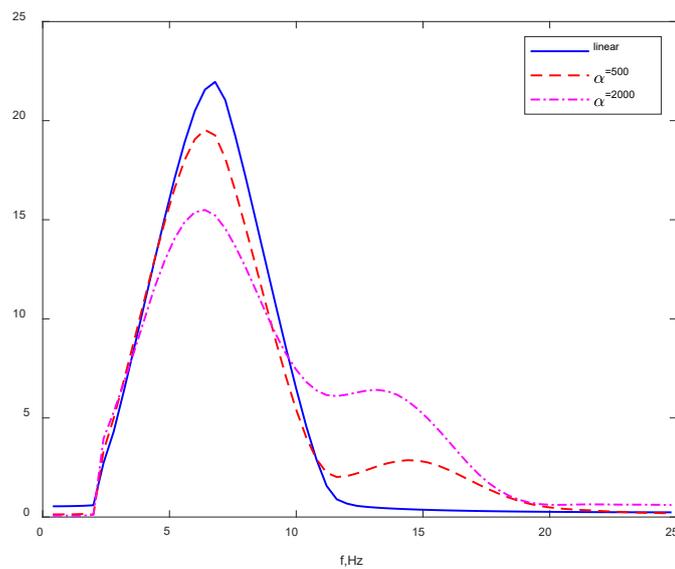


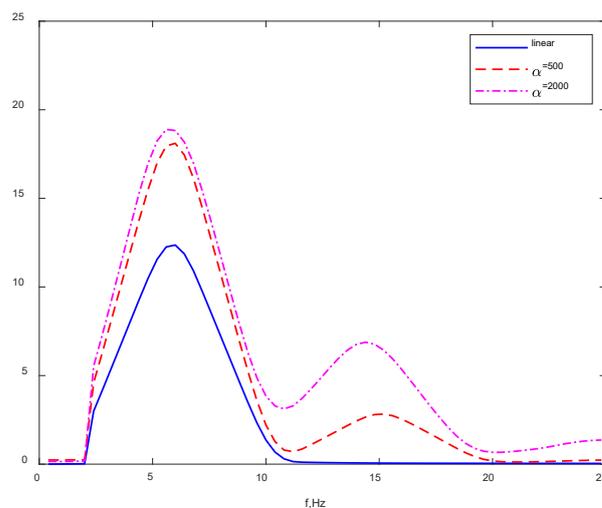
Рис. 3. Результаты моделирования методом конечных элементов нелинейного отклика грунтовой толщи при различном параметре нелинейности α и длительности импульса /
Fig. 3. The results of modeling the nonlinear response of the soil layer by the finite elements method for different nonlinearity parameter α and pulse duration



a)



б)



в)

Рис. 4. Спектры сигналов при ширине импульса 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,2 (в) /
Fig. 4. Signal spectra at pulse widths of 0.05 (a), 0.1 (b), and 0.2 (c)

Результаты и обсуждение

При интенсивных воздействиях в «мягких» или рыхлых грунтах наблюдаются различные нелинейные явления, выраженные, как правило, в росте сейсмического эффекта и различных аномалиях [Николаев, 1987; Zaalishvili, 2016; Zaalishvili et al., 2019; Negmatullaev et al., 1999; Kuo et al., 2019, 2021; Huang et al., 2020; Wen et al., 1994]. При сильных воздействиях сейсмический эффект, обусловленный нелинейностью грунтов, иногда значительно уменьшается. Это подтверждается результатами макросейсмических обследований, записями сильных землетрясений и прямыми экспериментальными данными (например, запись на территории г. Гори в 1987 г.) [Заалишвили, 1987]. Актуальность исследований также обуславливается переходом от традиционных интенсивностей к ускорениям при построении карт детального сейсмического районирования и возможным проявлением сильного землетрясения в ближней зоне Владикавказского разлома с потенциалом М 7,1 [Чернов, 2021; Аптикаев, 2021].

На основе экспериментальных зависимостей «Напряжение-деформация» реализован алгоритм МКЭ расчета нелинейного отклика грунтовой толщи на сильное воздействие. Моделировались импульсы различной продолжительности в среде с различной степенью проявления нелинейных свойств (крутизны нелинейной зависимости «Напряжение-деформация»). В результате анализа установлены различия в спектральном составе моделируемых импульсов. Сильное проявление нелинейных свойств характеризуется резкими изменениями фаз колебаний, в фазах высокой скорости нарастания амплитуд, которые могут быть приняты за вступления сейсмических волн другого типа.

В нелинейных спектрах происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику, тем сильнее, чем сильнее нелинейность кривой «Напряжение-деформация».

Выводы

Оценка нелинейных свойств грунтов проявляющихся при интенсивных природных (сейсмических) и искусственных динамических (импульсных и вибрационных) воздействиях представляет собой актуальную задачу инженерной сейсмологии, сейсмостойкого строительства, инженерной геофизики и геотехнологии. Это обуславливает необходимость прямой инструментальной оценки величины зон неупругости и нелинейности, которая становится вполне реализуемой благодаря применению современной цифровой аппаратуры. При этом проведение экспериментов должно сопровождаться разработкой численных моделей, описывающих наблюдаемые явления.

На основе метода конечных элементов (МКЭ) реализован алгоритм расчета нелинейного отклика грунтовой толщи на сильное воздействие. Установлено перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику, совпадающее с экспериментально наблюдаемыми явлениями.

Литература

1. Аптикаев Ф. Ф. О картах ОСР в ускорениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC. 2021.24.94.008.
2. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. / Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
3. Гвоздев А.А., Кузнецов В.В. О явлении частичного откола. // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1977. – №2. – С. 21–27.
4. Григорян С.С. Об основных представлениях динамики грунтов. // ПМ. – 1960. – Т. 24. №6. – С. 1057–1072.
5. Ержанов Ж.С., Журбаев И.Ж., Зусьман А.М., Пикановский В.А., Синяев А.Я., Шацков В.Н. Изучение механических характеристик грунтов при динамических воздействиях. // Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1984. – С. 187–197.
6. Заалишвили В.Б. Опыт применения инструментального метода сейсмического микрорайонирования. // Сейсмическое микрорайонирование территорий городов и крупных строек. – Тбилиси: Мецниереба, 1987. – С. 65–85.
7. Заалишвили В.Б., Джавришвили И.А., Отинашвили М. Г. Расчет нелинейных колебаний грунтовой толщи с помощью численного способа МКЭ сейсмического микрорайонирования. // Теория сооружений и сейсмостойкость. №1. Тбилиси: ИСМИС им. К.С. Завриева, 2001. — С. 67–73.
8. Николаев А.В. Сейсмические свойства рыхлой среды. // Физика Земли. – 1967. – №2. – С. 23–31.
9. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии. // Проблемы нелинейной сейсмологии. – М.: Наука, 1987. – С. 2–5.
10. Снеддон И.Н., Берри Д.С. Классическая теория упругости. – М.: Физ.-Мат. ГИЗ, 1961. – 219 с.
11. Чернов Ю.К. Опыт детальных вероятностных оценок возможных сейсмических воздействий на территории РСО-Алания. // Геология и Геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 87–102. DOI: 10.46698/VNC. 2021.83.10.007.
12. Vanab K.K., Kolaj M., Motazedian D., Sivathayalan S., Hunter J.A., Crow H.L., Pyne M. Seismic Site Response Analysis for Ottawa, Canada: A Comprehensive Study Using Measurements and Numerical Simulations. // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2012. – Vol. 102(5). – pp. 1976-1993. DOI: 10.1785/0120110248
13. Boaga J., Barone I., Deidda G.P., Cassiani G., & Strobbia C. Multi-drive level Vibroseis test to evaluate the non-linear response of soft soils. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

– 2021. – Vol. 149. Article 106861. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106861

14. Bonnet G., Heitz J.F. Non linear seismic response of a soft layer. 10-th European conference on Earthquake Engineering. // Duma(et). 1995 Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. – pp. 361-364.

15. Gicev V., Trifunac M.D., & Todorovska M.I. Reduction of peak ground velocity by nonlinear soil response – III: Excitation by an SV-wave pulse. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2021. – Vol. 145. Article 106535. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106535

16. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. // J. Soil Mech. Found Div. Am. Soc. Civ. Eng. – 1972. – Vol. 98. – pp. 603–24.

17. Negmatullaev S.K., Todorovska M.I., & Trifunac M.D. Simulation of strong earthquake motion by explosions – experiments at the Lyaur testing range in Tajikistan. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1999. – Vol. 18(3). – pp. 189-207. DOI: 10.1016/s0267-7261(98)00044-x

18. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., & Tokimatsu K. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. // Journal of Geotechnical Engineering. – 1986. – Vol. 112(11). – pp. 1016–1032. DOI:10.1061/(asce)0733-9410(1986)112:11(1016)

19. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kuo Chun-Hsiang, Wen Kuo-Liang, Chen Chun-Te Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2020. – Vol. 10(2). – pp. 95-112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.

20. Kuo C.H., Huang J.Y., Lin C.M., Hsu T.Y., Chao S.H., & Wen K.L. Strong Ground Motion and Pulse-Like Velocity Observations in the Near-Fault Region of the 2018 M-w 6.4 Hualien, Taiwan, Earthquake. // Seismological Research Letters. – 2019. – Vol. 90(1). – pp. 40-50. DOI: 10.1785/0220180195

21. Kuo C.H., Huang J.Y., Lin C.M., Chen C.T., & Wen K.L. Near-surface frequency-dependent nonlinear damping ratio observation of ground motions using SMART1. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2021. – Vol. 147, Article 106798. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106798

22. Wen K.L., Beresnev I.A., Yeh Y.T. Non-linear soil amplification inferred from downhole strong seismic motion data. // Geophysical Research Letters. – 1994. – Vol. 21. – pp. 2625-2628.

23. Zaalishvili V.B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10(2). – pp. 1706-1717. DOI:10.21660/2016.20.5310

24. Zaalishvili V., Kanukov A., Melkov D., & Burdzieva O. Transformation of spectral peculiarities of the soil response to dynamic impacts of varying value. // Akustika. – 2019. – Vol. 34. – pp. 188-194.

References

1. Aptikaev F.F. About GSZ maps in acceleration units. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC. 2021.24.94.008(in Russ.)

2. Bathe K., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis. 1976. 319 p.

3. Gvozdev A.A., Kuznetsov V.V. About the phenomenon of partial spalling. Izv. USSR Academy of Sciences, Physics of the Earth. 1977. No.2. pp.21–27. (In Russ.)

4. Grigoryan S.S. On the basic concepts of soil dynamics. PM. 1960. Vol. 24. No. 6. pp.1057–1072. (In Russ.)

5. Erzhanov Zh.S., Zhurbaev I.Zh., Zusman A.M., Pikanovsky V.A., Sinyaev A.Ya., Shatsilov V.N. Study of the mechanical characteristics of soils under dynamic loadings. Seismic microzonation. Moscow. Nauka, 1984. pp. 187–197. (In Russ.)

6. Zaalishvili V.B. Experience of using the instrumental method of seismic microzonation. Seismic microzonation of cities and large construction sites. Tbilisi. Metsniereba, 1987. pp. 65–85. (In Russ.)

7. Zaalishvili V.B., Dzhavrishvili I.A., Otinashvili M.G. Calculation of nonlinear vibrations of soil strata using the numerical method of FEM of seismic microzonation. Theory of structures and seismic stability. No. 1. ISMIS after K.S. Zavriev. Tbilisi, 2001. pp. 67–73. (In Russ.)
8. Nikolaev A.V. Seismic properties of a soft medium. Physics of the Earth. No.2. 1967. pp. 23–31. (In Russ.)
9. Nikolaev A.V. Problems of nonlinear seismics. Problems of nonlinear seismics. Moscow. Nauka, 1987. pp. 5–2. (In Russ.)
10. Sneddon I.N., Berry D.S. The classical theory of elasticity. Moscow. Phys.-Mat. GIZ, 1961. 219 p. (In Russ.)
11. Chernov Yu. K. The experience of detailed probabilistic assessments of possible seismic effects on the territory of North Ossetia-Alania. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 87–102. DOI: 10.46698/VNC.2021.83.10.007(in Russ.)
12. Banab K.K., Kolaj M., Motazedian D., Sivathayalan S., Hunter J.A., Crow H.L., Pyne M. Seismic Site Response Analysis for Ottawa, Canada: A Comprehensive Study Using Measurements and Numerical Simulations. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012. Vol. 102. No.5. pp. 1976–1993. DOI: 10.1785/0120110248
13. Boaga J., Barone I., Deidda G.P., Cassiani G., Strobbia C. Multi-drive level Vibroseis test to evaluate the non-linear response of soft soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021. 149. Article 106861. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106861
14. Bonnet G., Heitz J.F. Nonlinear seismic response of a soft layer. 10-th European conference on Earthquake Engineering. Duma(et). 1995. Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. pp. 361–364.
15. Gicev, V., Trifunac, M. D., & Todorovska, M. I. Reduction of peak ground velocity by nonlinear soil response – III: Excitation by an SV-wave pulse. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021. Vol. 145. Article 106535. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106535
16. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects. J. Soil Mech. Found Div. Am. Soc. Civ. Eng. 1972. Vol. 98. pp. 603–24.
17. Negmatullaev S.K., Todorovska M.I., Trifunac, M.D. Simulation of strong earthquake motion by explosions – experiments at the Lyaur testing range in Tajikistan. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999. Vol. 18. No. 3. pp. 189–207. DOI: 10.1016/s0267-7261(98)00044-x
18. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu K. Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, 1986. Vol. 112. No. 11. pp. 1016–1032. DOI:10.1061/(asce)0733-9410(1986)112:11(1016)
19. Huang Jyun-Yan, Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Kuo Chun-Hsiang, Wen Kuo-Liang, Chen Chun-Te Progress of Soil Nonlinearity Researches of Recent Years in Russia and Taiwan. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 95–112. DOI: 10.46698/VNC.2020.28.93.007.
20. Kuo C.H., Huang J.Y., Lin C.M., Hsu T.Y., Chao S.H., Wen K.L. Strong Ground Motion and Pulse-Like Velocity Observations in the Near-Fault Region of the 2018 M-w 6.4 Hualien, Taiwan, Earthquake. Seismological Research Letters, 2019. Vol. 90. No. 1. pp. 40–50. DOI: 10.1785/0220180195
21. Kuo C. H., Huang J. Y., Lin C. M., Chen C. T., & Wen K. L. (2021). Near-surface frequency-dependent nonlinear damping ratio observation of ground motions using SMART1. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021. Vol. 147. Article 106798. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106798
22. Wen K. L., Beresnev I.A., Yeh Y.T. Non-linear soil amplification inferred from downhole strong seismic motion data. Geophysical Research Letters. 1994. Vol. 21. pp. 2625–2628.
23. Zaalishvili V.B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions. International Journal of GEOMATE, 2016. Vol. 10(2). pp. 1706–1717. DOI:10.21660/2016.20.5310
24. Zaalishvili V., Kanukov A., Melkov D., Burdzieva O. Transformation of spectral peculiarities of the soil response to dynamic impacts of varying value. Akustika, 2019. Vol. 34. pp 188–194.