

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.394

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006)

Оригинальная статья

## Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений

Д. А. Мельков , А. Ф. Габараев , М. И. Фидарова ,  
Т. И. Мерзликин , З. В. Персаева 

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

Статья поступила: 02.11.2022, доработана: 05.12.2022, одобрена в печать: 13.12.2022

**Резюме: Актуальность работы.** Традиционно сейсмические воздействия в практике сейсмостойкого строительства оцениваются величиной пикового горизонтального ускорения грунта. При анализе последствий сильных и разрушительных землетрясений необходимо учитывать многофакторность влияния процесса землетрясения на застройку. Известно, что нелинейные свойства среды оказывают влияние на спектральный состав и амплитуду колебаний на поверхности толщи, что обуславливает зависимость сейсмического эффекта от уровня воздействия. **Целью** работы является установление связи инструментальной сейсмической интенсивности с нелинейными свойствами среды в сложных инженерно-геологических и геоморфологических условиях. **Методы работы.** Моделирование колебаний грунтовой толщи выполнялось методом конечных элементов. Основные механические свойства среды были дополнены параметром, характеризующим нелинейную зависимость «напряжение-деформация». **Результаты работы.** Выполнено моделирование сейсмических колебаний грунтовой толщи с различным значением параметра крутизны нелинейной зависимости «напряжение-деформация». В результате установлены различия в спектральном составе и пространственном распределении энергии колебаний. В нелинейных спектрах происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику, тем сильнее, чем сильнее крутизна кривой «напряжение-деформация». Установлено, что в целом различные инструментальные меры интенсивности имеют одинаковый характер изменения вдоль профиля, исключение составляет кумулятивная абсолютная скорость, распределение которой сильно меняется для разных значений крутизны кривой «напряжение-деформация». Степень проявления нелинейных свойств грунтов также может характеризоваться величиной площади нормированного спектра, увеличение которой связано с увеличением ширины спектра, обусловленной перераспределением энергии в более высокочастотную область.

**Ключевые слова:** макросейсмическая интенсивность, параметры движения грунта, спектральный состав, инструментальная сейсмическая интенсивность

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность научному руководителю д. ф.-м. н., профессору В. Б. Заалишвили.

**Длцитирования:** Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Фидарова М. И., Мерзликин Т. И., Персаева З. В. Влияние нелинейных свойств среды на сейсмический эффект сильных землетрясений. *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12 (4): 72-84. DOI: [10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006).

## GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2022.75.68.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.75.68.006)

Original paper

## Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes

D. A. Melkov<sup>ID</sup>, A. F. Gabaraev<sup>ID</sup>, M. I. Fidarova<sup>ID</sup>,  
T. I. Merzlikin<sup>ID</sup>, Z. V. Persaeva<sup>ID</sup>

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz362002, Russian Federation, e-mail: [cgi\\_ras@mail.ru](mailto:cgi_ras@mail.ru)

Received: 02.11.2022, revised: 05.12.2022, accepted: 13.12.2022

**Abstract. Relevance.** Traditionally, seismic impacts in the practice of earthquake-resistant construction are estimated by peak horizontal ground acceleration. Consequences of strong and destructive earthquakes show multifactorial impact of the earthquake process on buildings. It is known that the nonlinear properties of the medium affect the spectral contents and the amplitude of vibrations on the surface of the stratum, which causes the dependence of the seismic effect on the level of impact. **The aim** of the work is to establish a relationship between instrumental seismic intensity and nonlinear properties of the medium in complex engineering-geological and geomorphological conditions. **Methods.** Modeling of oscillations of the soil stratum was carried out by the finite element method. The main mechanical properties of the medium were supplemented by a parameter characterizing the nonlinear stress-strain relationship. **Results.** The simulation of the propagation of seismic waves in a medium with a different degree of nonlinear properties, specified by the steepness of nonlinear stress-strain curve, is performed. As a result, differences in the spectral composition and spatial distribution of vibration energy were established. In nonlinear spectra, the energy is redistributed to a higher frequency region, a multiple of the main peak, the stronger, the steeper the stress-strain curve. It has been established that, in general, various instrumental intensity measures have the same pattern of change along the profile, with the exception of the cumulative absolute velocity, the distribution of which varies greatly for different steepness values of the stress-strain curve. The degree of manifestation of the nonlinear properties of soils can also be characterized by the area of the normalized spectrum, the increase in which is associated with an increase in the width of the spectrum due to the redistribution of energy to a higher frequency region.

**Keywords:** macroseismic intensity, ground motion parameters, spectral composition, instrumental seismic intensity.

**Acknowledgments:** *The authors express their gratitude to the scientific adviser Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor V. B. Zaalishvili.*

**For citation:** Melkov D. A., Gabaraev A. F., Fidarova M. I., Merzlikin T. I., Persaeva Z. V. Influence of nonlinear properties of the medium on the seismic effect of strong earthquakes. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12 (4): 72-84. DOI: 10.46698/VNC.2022.75.68.006.

### Введение

О проявлении нелинейных свойств в грунтах известно уже достаточно давно. По инструментальным данным [Гвоздев, Кузнецов, 1977; Николаев, 1987; Заалишвили, 1983; Заалишвили и др., 2021, 2022а; Zaalishvili, 2016] и данным математического моделирования [Полтавцев и др., 1998; Bonnet, Heitz, 1995] известно, что при интенсивных сейсмических нагрузках происходит перераспределение энергии колебаний, образование сейсмических волн с частотой равной сумме и разности частот взаимодействующих волн, волн с частотами кратными частоте возмущающей силы. Это определяет возможность возникновения резонансов на частотах, кото-

рые невозможно прогнозировать в рамках линейных моделей и инструментальных методов, основанных на слабых воздействиях (регистрация микросейсм и слабых землетрясений).

Первой работой, которая была посвящена вопросам непосредственной оценки нелинейности в грунтах является теоретическая работа А. В. Николаева [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 [Заалишвили, 2009]. При трансформации линейно-упругих деформаций в нелинейно-упругие энергия «перекачивается» в ВЧ диапазон спектра, оставаясь постоянной, и площадь реального спектра колебаний не меняется. Проявление нелинейных свойств грунтов в высокочастотной области спектра инструментально было установлено В. Б. Заалишвили в 1987 г. в г. Гори [Заалишвили, 1987].

В методическом плане экспериментальные исследования необходимо проводить на участках с известной проявленной интенсивностью землетрясения, что предполагает сопоставление параметров нелинейности соответствующих грунтов. С другой стороны, из существующих приемов оценки нелинейности необходимо выбрать наиболее оптимальные, дающие возможность получения указанных параметров в виде, который мог быть непосредственно использован в последующем при решении практических задач сейсмического микрорайонирования. С помощью математического моделирования могут быть рассмотрены различные типы кривых «напряжение-деформация», что позволит вычислить различные параметры нелинейности, согласовать их с экспериментальными данными и получить соответствующие оценки в условиях естественного залегания.

#### Моделирование сейсмических колебаний геологических объектов методом конечных элементов

Моделирование методом конечных элементов позволяет строить двухмерные и трехмерные модели и подходит для моделирования геологических объектов [Заалишвили и др., 2001, 2008].

Основная идея МКЭ заключается в том, что исследуемый объект представляется в виде совокупности отдельных элементов конечных размеров, связанных между собой в узлах. В качестве элементов используются тела различных конфигураций: призмы – в трехмерных задачах; стержни – в разных конструкциях; треугольники, четырехугольники и другие плоские фигуры – в двумерных задачах [Бате, Вилсон, 1982]. Выбор треугольных элементов имеет ряд преимуществ, т.к. сетка из треугольных элементов позволяет достаточно точно описать любую форму рельефа и слоистой структуры грунтового массива со своими физико-механическими свойствами, изменяющимися во времени в зависимости от интенсивности воздействия. В качестве воздействия используется акселерограмма землетрясения, как правило горизонтального направления, приложенная к основанию грунтового массива. Грунт находится в условиях плоской деформации и рассматривается как ортотропная среда. Оси ортотропии совпадают с направлениями главных напряжений.

Моделирование нелинейных колебаний грунтового массива осуществляется путем последовательного определения напряженно-деформированного состояния

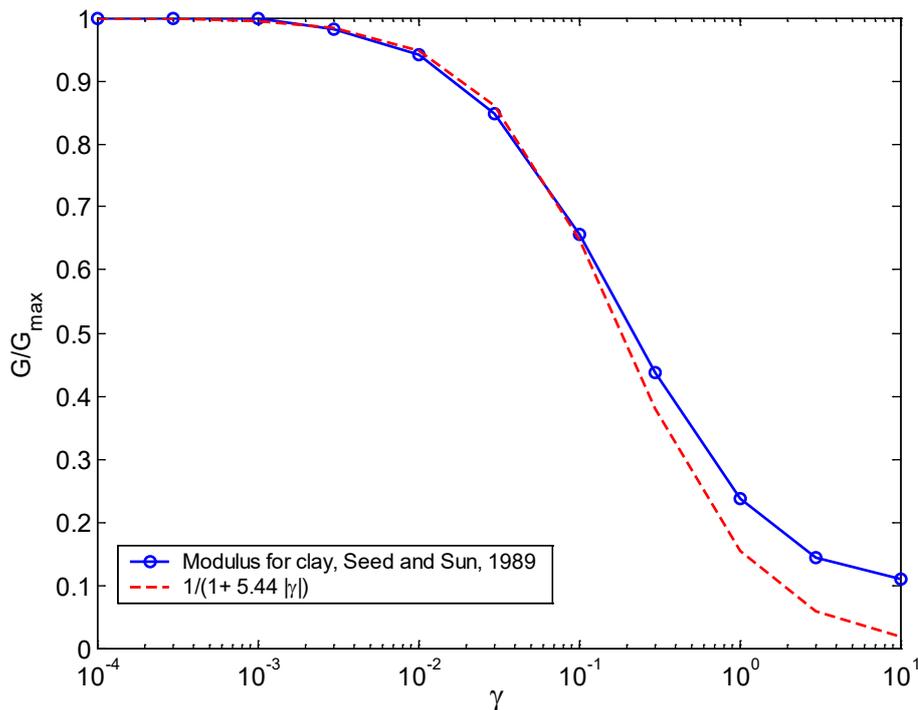


Рис. 1. Зависимость нормированного модуля упругости от деформации сдвига /  
Fig. 1. Dependence of the normalized modulus of elasticity on shear strain

системы в каждый момент времени (дискретизации акселерограммы), учитывая состояние системы на предыдущем шаге. На каждом шаге система считается линейно-упругой.

Для описания нелинейных свойств грунтовой среды воспользуемся аналитической функцией, предложенной в работе [Bonnet, Heitz, 1995], связывающей деформации сдвига  $\gamma(z, t)$  и касательные напряжения  $\tau(z, t)$ :

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

где  $\tau_{\max}$  – максимальное значение касательного напряжения;  $t$  – время.  
Иначе:

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + \alpha|\gamma|}, \quad (2)$$

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

В расчетах использовалась зависимость  $G/G_0$  для глинистых грунтов по данным работ [Hardin, Drnevich, 1972; Seed, Idriss, 1970; Seed et al., 1986; Seed, Sun, 1989; Ganapathy et al., 2020]. Соответствующая параметризованная кривая представлена на рисунке 1.

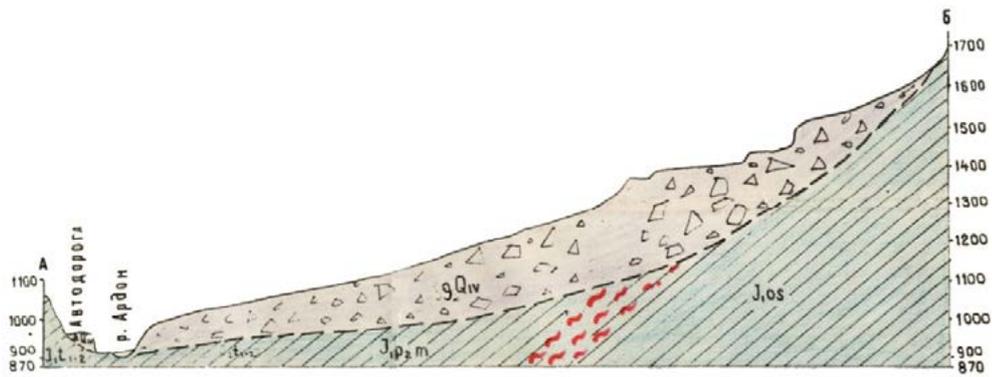


Рис. 2. Схематический продольный разрез Луарского оползня /  
Fig. 2. Schematic longitudinal section of the Luar landslide

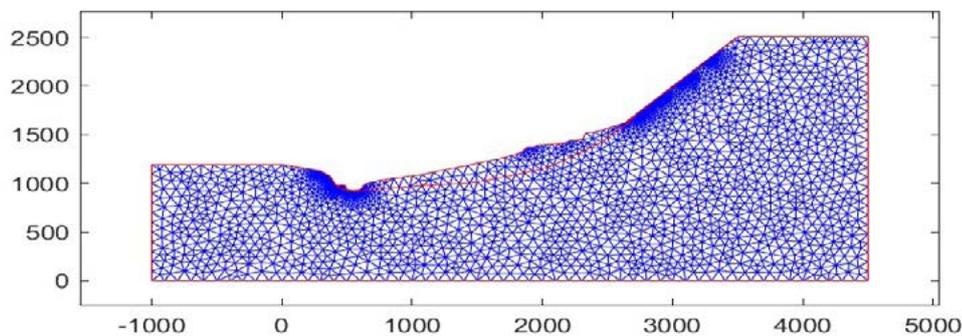


Рис. 3. Расчетная область, представленная с помощью конечных элементов /  
Fig. 3. Computational region represented by finite elements

## Результаты работы и их обсуждение

Практический интерес при использовании метода конечных элементов представляет исследование оползневых объектов и моделирование поведения грунтов при интенсивных сейсмических колебаниях. В качестве примера был рассмотрен Луарский оползень, расположенный на правом склоне долины р. Ардон, в 1,0 км западнее селения Унал (РСО-Алания, Алагирский район), и являющийся одним из наиболее крупных в Северной Осетии. В плане этот оползень имеет вытянутую форму и достигает в длину 2,3 км при средней ширине 650-700 м. Рыхлые отложения, слагающие тело оползня, состоят из светло-коричневого суглинка и серой супеси, включающих отдельные крупные глыбы, обломки и щебень коренных пород. Тело оползня подстилают аргиллиты, алевролиты, песчаники Мизурской свиты ( $J_{1p2m}$ ), падающие к реке Ардон под углами 40-45°. Видимая мощность рыхлых оползневых отложений 50-60 м. Схематический разрез Луарского оползня представлен на рисунке 2.

Представим исследуемую область в виде двух подобластей – основания из коренных пород, подстилающее тело оползня (подобласть 1), и тела оползня (подобласть 2). Произведем разбиение всей области на треугольные конечные элементы. Разбиение на треугольные элементы обусловлено простотой и гибкостью описания конструкций сколько угодно сложной формы (рис. 3).

Будем считать каждую подобласть однородной с параметрами, характерными для алевролитов и песчаников в подобласти 1, и суглинков в подобласти 2. Сейс-

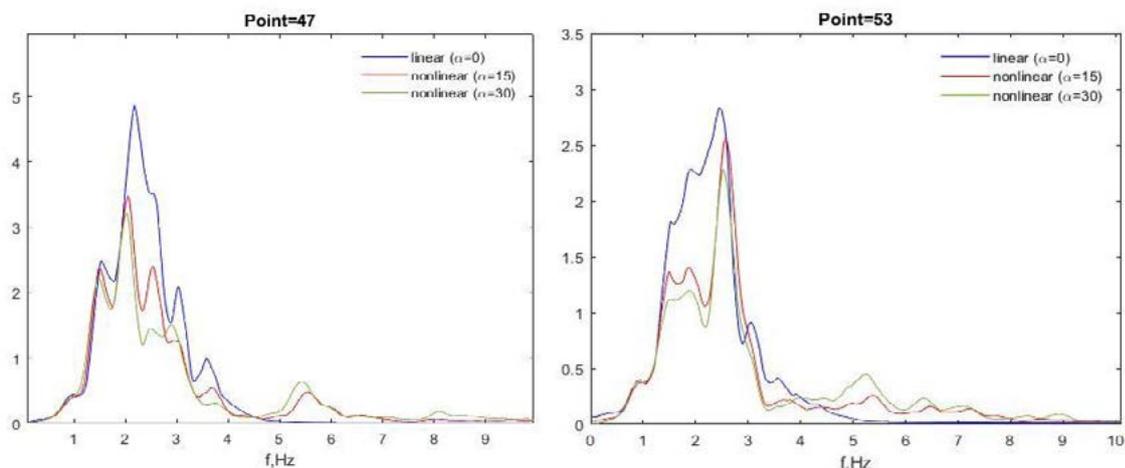


Рис. 4. Спектры колебаний на поверхности при различном значении параметра нелинейности /  
 Fig. 4. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter

мические свойства оползневого тела определялись по данным сейморазведочных работ [Zaalishvili et al., 2020a].

Подобласть 1: плотность грунта  $\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$ , скорость поперечных волн  $v = 1200 \text{ м/с}$  и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,2$ .

Подобласть 2: плотность грунта  $\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$ , скорость поперечных волн  $v = 700 \text{ м/с}$  и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ .

Будем считать, что основание рассматриваемой области (нулевой слой), а также левый и правый края – жестко закреплены, а прилагаемые силы воздействуют на первый слой. В качестве внешней нагрузки  $R$  будем использовать реальный сейсмический сигнал Лома-Приета продолжительностью 40 секунд при частоте дискретизации  $dt=0,02 \text{ с}$ .

Расчеты выполнялись для различных параметров нелинейности  $\alpha$ : 0 (линейный расчет), 15, 30. Построим спектры сигнала в некоторых узлах, расположенных на поверхности рассматриваемой области – рисунок 4. В нелинейном случае проявляется составляющая на частоте 5,4-5,5 Гц. Представляет интерес рассмотреть пространственное распределение частоты колебаний вдоль оползневого тела (рис. 5-6).

В результате, перераспределение энергии колебаний происходит не только в частотном диапазоне, но и характеризуется определенными пространственными закономерностями. В частности, в нелинейном случае высокочастотная составляющая на частоте 6,5-8 Гц наблюдается на координате 2000 м, 5 Гц – в интервалах от 0 до 800 м и 2200-2300 м (рис. 6б, в). При этом составляющая на частоте 2,5 Гц пропорционально уменьшается по сравнению с линейным расчетом. Указанные интервалы приурочены к неоднородностям рельефа и, соответственно, увеличению амплитуд колебаний и, как следствие, большему проявлению нелинейных свойств. Пространственная неоднородность полей ускорений дневной поверхности также выделялась инструментально и ранее [Заалишвили и др., 2022б].

При интенсивных воздействиях в рыхлых грунтах наблюдается увеличение сейсмического эффекта. В то же время, при сильных воздействиях сейсмический эффект из-за нелинейности грунтов может иногда значительно уменьшаться. Это подтверждается как записями сильных землетрясений, так и экспериментальными данными (запись г. Гори). Поэтому нелинейные явления важны при определении инструментальной меры сейсмической интенсивности.

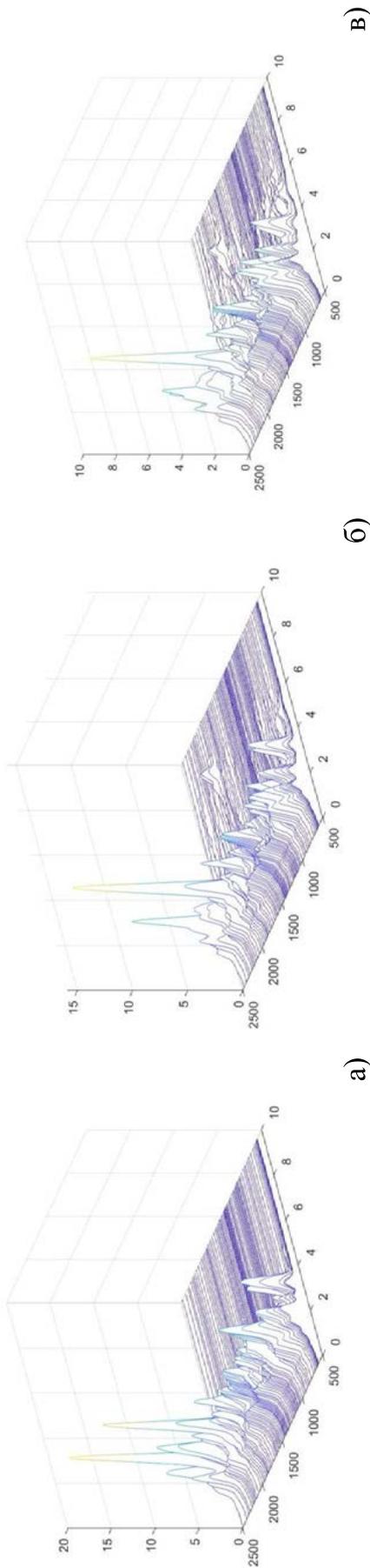


Рис. 5. Спектры колебаний вдоль оползневого тела при различных значениях параметра нелинейности: а)  $\alpha = 0$ ; б)  $\alpha = 15$ ; в)  $\alpha = 30$  /  
 Fig. 5. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter

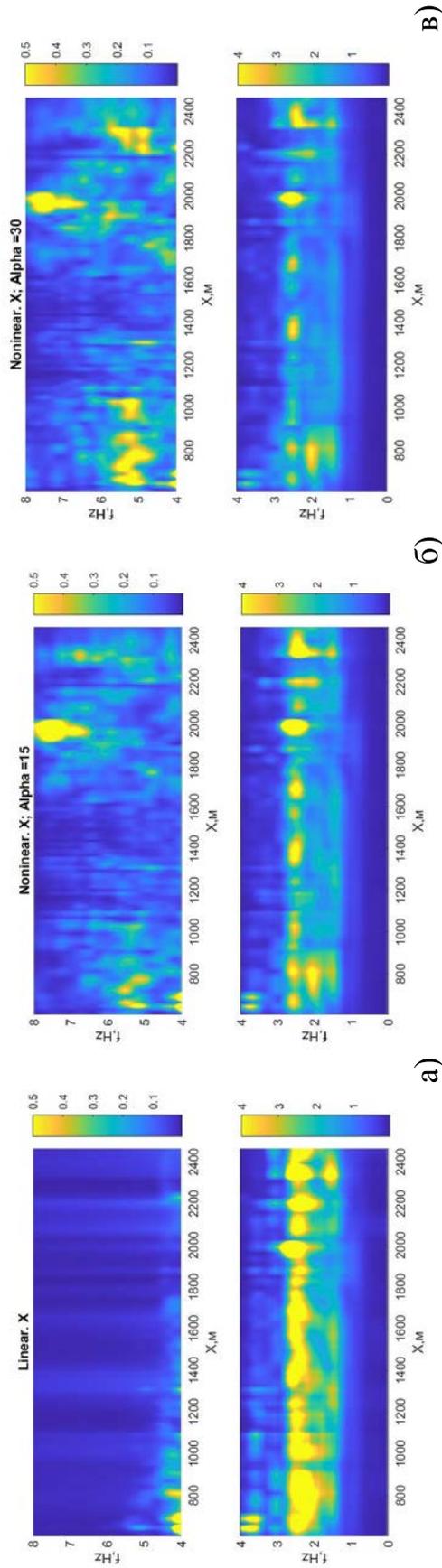


Рис. 6. Спектры колебаний вдоль оползневого тела при различных значениях параметра нелинейности: а)  $\alpha = 0$ ; б)  $\alpha = 15$ ; в)  $\alpha = 30$  /  
 Fig. 6. Vibrations spectra on the surface for different values of the nonlinearity parameter: а)  $\alpha = 0$ ; б)  $\alpha = 15$ ; в)  $\alpha = 30$

Макросейсмическая интенсивность представляет собой локальную меру сотрясения грунта при землетрясении, соответствующую реакции различных объектов в виде повреждений различной степени зданий и сооружений. Оценка сейсмической интенсивности является мерой эффекта воздействия сейсмических колебаний, которые приводят впоследствии к разрушениям различных объектов, в первую очередь, зданий и сооружений, а также соответствующим ущербам. В связи с чем макросейсмическая интенсивность является параметром, напрямую оценивающим сейсмические риски (как статистические распределения степени и количества повреждений зданий различного типа) [Gutenberg; Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975; Wald et al., 1999; Musson et al., 2009; Caprio et al., 2015; Zaalishvili et al., 2020b].

Поскольку величина PGA является основополагающим в сейсмическом зонировании параметром движения грунта и сейсмическом проектировании зданий и сооружений, в первую очередь, именно связь между PGA и интенсивностью была проанализирована и установлена [Gutenberg; Richter, 1956; Trifunac, Brady, 1975]. Параметр PGV (пиковая скорость) более показателен для повреждений от землетрясения в более гибких конструкциях, и модели линейной регрессии генерируются на основе PGV. Wald et al. [1999] установили, что значения интенсивности, рассчитанные с помощью PGV, были надежнее, чем значения, основанные на PGA, если фактическая сейсмическая интенсивность была не ниже VII баллов. Akansel et al. [2014] заявили, что связь сейсмической шкалы MMI с PGA или PGV зависит от прочности грунтов. Bilal и Askan [2014] пришли к выводу, что MMI имеет лучшую линейную корреляцию с PGA для жесткой структуры и PGV – для пластичной структуры. С инженерной точки зрения PGV позволяет непосредственно учитывать воздействующую и поглощаемую исследуемым объектом энергии. Помимо PGA и PGV, для установления взаимосвязей также используются другие параметры движения грунта.

Основные параметры воздействия можно разделить на амплитудные: максимальные скорости (PHD), смещения (PHV и ускорения (PHA), среднеквадратическое ускорение (RMS), спектральные параметры – средневзвешенная частота ( $f_{aw}$ ), энергетические параметры, такие как площадь спектра (Sr), кумулятивная абсолютная скорость (CAV), кумулятивный квадрат ускорений (интенсивность Ариаса), индекс полной входной энергии (Er), продолжительность колебаний (Duration, которая также может определяться различными способами) и производные от данных параметров – например мера Фаджфара (Fajfar), площадь нормированного спектра (Sr) а также параметры спектра реакции – интенсивность Хаузнера (Hausner intensity). Описание всех признаков и соответствующие формулы приведены в работе [Зээлишвили и др., 2022б].

На рисунке 7 приведены различные меры сейсмической интенсивности вдоль профиля. Большинство параметров имеют схожий характер изменений. Исключение составляют пиковое значение скорости PGV, площадь реального спектра Sr и кумулятивная абсолютная скорость CAV. Значения пиковой скорости совпадают с аналогичными для ускорений и смещений, но увеличение параметра  $\alpha$  приводит к увеличению PGV (рис. 7б). Поскольку проявление нелинейных свойств проявляется в увеличении ширины спектра, площадь нормированного спектра Sn увеличивается (рис. 7з). Качественные различия от нелинейного параметра  $\alpha$  наиболее существенны для кумулятивной скорости CAV (рис. 7д).

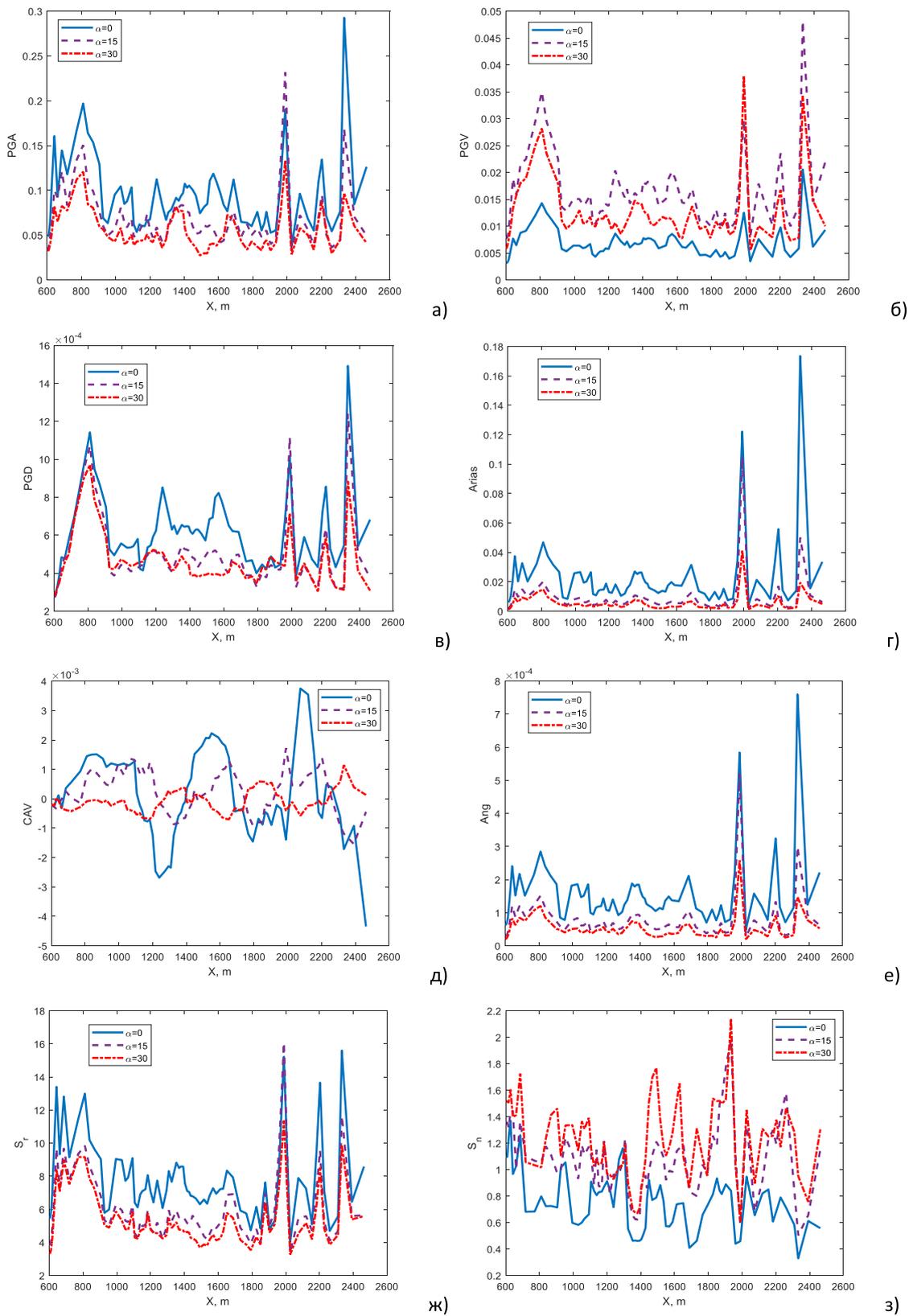


Рис. 7. Вариация инструментальной меры интенсивности вдоль профиля при различном значении крутизны кривой «напряжение-деформация» /  
 Fig. 7. Variation of the instrumental measure of intensity along the profile at different values of the steepness of the “stress-strain” curve

## Выводы

1. Разработаны модели распространения сейсмических волн в среде с различной степенью проявления нелинейных свойств, задаваемых параметром крутизны нелинейной зависимости «напряжение-деформация».

2. Реализован алгоритм моделирования колебаний грунтовой толщи методом конечных элементов на основе экспериментальных зависимостей «напряжение-деформация».

3. Установлены различия в спектральном составе и пространственном распределении энергии колебаний. В нелинейном случае происходит перераспределение энергии в более высокочастотную область, кратную основному пику тем сильнее, чем больше параметр нелинейности (при равной амплитуде воздействия).

4. Проявление сейсмической интенсивности может значительно меняться под влиянием сложных инженерно-геологических и геоморфологических условий. Неоднородности рельефа приводят к увеличению амплитуд колебаний и, соответственно, к большему проявлению нелинейных эффектов – перераспределению энергии в высокочастотную область с одновременным уменьшением амплитуды колебаний.

5. Большинство параметров инструментальной сейсмической интенсивности имеет схожий характер изменений. Исключение составляют пиковое значение скорости PGV, площадь реального спектра Sr и кумулятивная абсолютная скорость SAV. Наибольшее влияние параметр нелинейности оказывает на кумулятивную абсолютную скорость SAV.

6. Степень проявления нелинейных свойств грунтов характеризуется величиной площади нормированного спектра, увеличение которой связано с увеличением ширины спектра, обусловленной перераспределением энергии в более высокочастотную область.

## Литература

1. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
2. Гвоздев А. А., Кузнецов В. В. О явлении частичного откола. // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1977. – № 2. – С. 21-27.
3. Заалишвили В. Б. Применение мощного газодинамического источника для исследования колебаний грунтовой толщи. // Сообщения Академии наук Грузинской ССР. – 1983. – Т. 109. № 2. – С. 345.
4. Заалишвили В. Б. Опыт применения инструментального метода сейсмического микрорайонирования. // Сейсмическое микрорайонирование территорий городов и крупных строек. – Тбилиси: Мецниереба, 1987. – С. 65-85.
5. Заалишвили В. Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука, 2009. – 350 с.
6. 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.
7. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Отинашвили М. Г. Использование метода конечных элементов при оценке сейсмической опасности горных территорий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 49-52.

8. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Габараев А. Ф., Мерзликини Т. И. Нелинейные колебания грунтовой толщи по инструментальным и численным данным. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11 (4). – С. 70-82. DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006
9. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Никонова Н. В., Смирнова Л. Н., Уздин А. М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022а. – Т. 12 (1). – С. 75-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006
10. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Фидарова М. И. Взаимосвязь величины макросейсмической интенсивности с показателями инструментальных записей Губанского землетрясения 2000 г. и Тбилисских землетрясений 2002 г. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2022б. – Т. 12 (1). – С. 89-108. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007
11. Николаев А. В. Сейсмические свойства рыхлой среды. // *Физика Земли*. – 1967. – № 2. – 1967. – С. 23-31.
12. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. Проблемы нелинейной сейсмологии. – М.: Наука, 1987. – С. 2-5.
13. Полтавцев С. И., Айзенберг Я. М., Уломов В. И. и др. Сейсмическое районирование и сейсмостойкое строительство (Методы, практика, перспективы). – М: ГУП ЦПП, 1998. – 259 с.
14. Akansel V., Ameri G., Askan A., Caner A., Erdil B., Kale Ö., Okuyucu D. The 23 October 2011 Mw7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake: Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. // *Earthq. Spectra*. – 2014. – Vol. 30. – pp. 657-682.
15. Bilal M., Askan A. Relationships between felt intensity and recorded ground-motion parameters for Turkey. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2014. – Vol. 104. – pp. 484-496.
16. Bonnet G., Heitz J.F. Non-linear seismic response of a soft layer. // 10-th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. – 1995. – pp. 361-364.
17. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICEs): A global relationship and evaluation of regional dependency. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 2015. – Vol. 105. – pp. 1476-1490.
18. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov D.A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia. // *Sustainable Development of Mountain Territories*. – 2020. – Vol. 12. No. 4 (46). – pp. 572-581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. – EDN NMMAEJ.
19. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1956. – Vol. 46. – pp. 105-145.
20. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear Modulus and Damping in Soils: II. Design Equations and Curves. // *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*. – 1972. – Vol. 98. No. 7. – pp. 667-691.
21. Musson R.M. W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. // *J. Seismol.* – 2009. – No. 14. – pp. 413-428.
22. Seed H.B., Idriss I.M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. // Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December. – 1970. – 48p.
23. Seed H.B., Sun J.H. Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. // Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. – 1989.
24. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M. and Tokimatsu K. Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. // *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. – 1986. – Vol. 11 (2). No. GTI 1, November. – pp. 1016-1032.

25. Trifunac M. D., Brady A. G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1975. – Vol. 65. – pp. 139-162.
26. Wald D. J., Quitoriano V., Heaton T. H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. // *Earthq. Spectra.* – 1999. – Vol. 15. – pp. 557-564.
27. 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
28. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O., Melkov D. A. et al. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. // *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE, Moscow, 20-22 Nov. 2019.* – Vol. 164. – Moscow: EDP Sciences, 2020a. – p. 01014. DOI 10.1051/e3sconf/202016401014. – EDN IJJZPB.
29. Zaalishvili V. B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O. G., Melkov D. A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South.* – 2020b. – Vol. 10 (3). – pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006

## References

1. Bate K., Wilson E. Numerical methods of analysis and finite element method. Moscow. Stroyizdat. 1982. 448 p. (In Russ.)
2. Gvozdev A. A., Kuznetsov V. V. On the phenomenon of partial spalling. *Izvestia AS of the USSR, Physics of the Earth.* 1977. No. 2. pp. 21-27. (In Russ.)
3. Zaalishvili V. B. The use of a powerful gas-dynamic source for the study of vibrations in the soil stratum. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Georgian SSR.* 1983. Vol. 109. No. 2. pp. 345. (In Russ.)
4. Zaalishvili V. B. Experience in the application of the instrumental method of seismic microzonation. *Seismic microzonation of cities and large construction sites.* Tbilisi. Metsniereba. 1987. pp. 65-85. (In Russ.)
5. Zaalishvili V. B. Seismic microzonation of urban territories, settlements and large building sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (In Russ.)
6. 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.)
7. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Otinashvili M. G. Using the finite element method in the seismic hazard assessment of mountain areas. *Earthquake engineering. Constructions safety.* 2008. No. 3. pp. 49-52. (In Russ.)
8. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Gabaraev A. F., Merzlikin T. I. Nonlinear vibrations of soil strata according to instrumental and numerical data. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2021. Vol. 11 (4). pp. 70-82. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.77.59.006.
9. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Nikonova N. V., Smirnova L. N., Uzdin A. M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2022. Vol. 12 (1). pp. 75-88. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
10. Zaalishvili V. B., Melkov D. A., Fidarova M. I. Correlation between the value of macroseismic intensity and the indicators of instrumental records of the Gouban earthquake of 2000 and the Tbilisi earthquake of 2002. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2022. Vol. 12 (1). pp. 89-108. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.74.23.007.
11. Nikolaev A. V. Seismic properties of a loose medium. *Physics of the Earth.* 1967. No. 2. 1967. pp. 23-31. (in Russ.)
12. Nikolaev A. V. Problems of nonlinear seismicity. Moscow. Nauka. 1987. pp. 2-5. (in Russ.)

13. Poltavtsev S.I., Aizenberg Ya.M., Ulomov V.I. et al. Seismic zoning and earthquake engineering (Methods, practice, prospects). Moscow. GUP TsPP. 1998. 259 p. (in Russ.)
14. Akansel V., Ameri G., Askan A., Caner A., Erdil B., Kale Ö., Okuyucu D. The 23 October 2011 Mw7.0 Van (Eastern Turkey) earthquake: Interpretations of recorded strong ground motions and post-earthquake conditions of nearby structures. *Earthq. Spectra*. 2014. Vol. 30. pp. 657-682.
15. Bilal M., Askan A. Relationships between felt intensity and recorded ground-motion parameters for Turkey. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2014. Vol. 104. pp. 484-496.
16. Bonnet G., Heitz J.F. Non-linear seismic response of a soft layer. In: 10-th European conference on Earthquake Engineering. Duma (et). Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105283. 1995. pp. 361-364.
17. Caprio M., Tarigan B., Worden C.B., Wiemer S., Wald D.J. Ground motion to intensity conversion equations (GMICES): A global relationship and evaluation of regional dependency. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. pp. 1476-1490.
18. Ganapathy G.P., Zaalishvili V.B., Chandrasekaran S.S., Melkov D.A. Integrated monitoring of slope processes in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020. Vol. 12. No. 4. pp. 572-581. DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581. EDN NMMAEJ.
19. Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1956. Vol. 46. pp. 105-145.
20. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear Modulus and Damping in Soils: II. Design Equations and Curves. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*. 1972. Vol. 98. No. 7. pp. 667-691.
21. Musson R.M. W., Grünthal G., Stucchi M. The comparison of macroseismic intensity scales. *J. Seismol.* 2009. No. 14. pp. 413-428.
22. Seed H.B., Idriss I.M. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December. 1970. 48 p.
23. Seed H.B., Sun J.H. Implication of site effects in the Mexico City earthquake of September 19, 1985 for Earthquake-Resistant Design Criteria in the San Francisco Bay Area of California. Report No. UCB/EERC-89/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. 1989.
24. Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M. and Tokimatsu K. Moduli and Damping factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. 1986. Vol. 11. No. GTI 1, November. pp. 1016-1032.
25. Trifunac M.D., Brady A.G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1975. Vol. 65. pp. 139-162.
26. Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. *Earthq. Spectra*. 1999. Vol. 15. pp. 557-564.
27. Zaalishvili V.B. Spectral characteristics of seismic waves at strong ground motions. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. pp. 1706-1717. DOI:10.21660/2016.20.5310.
28. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A. et al. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. *E3S Web of Conferences: Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE, Moscow, 20-22 Nov2019*. Vol. 164. Moscow: EDP Sciences, 2020a. p. 01014. DOI 10.1051/e3sconf/202016401014. EDN IJJZPB.
29. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020b. Vol. 10 (3). pp. 94-113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.