

УДК 551.3.053 + 551.4.037

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Оригинальная статья

Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов

А.Ф. Габараев¹, Д.А. Мельков¹, А.Л. Кортиев², Е.Н. Козырев¹

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: olgaburdzieva@mail.ru;

²Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 12.09.2023, доработана: 19.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Аннотация. Актуальность. Геоморфология является одним из ключевых факторов развития геологических процессов. В связи со значительной массой смещаемого материала склоновые процессы, обладают огромной разрушительной силой и представляют большую опасность для жилых, транспортных и других объектов экономики. На примере рекреационного комплекса Мамисон исследовано влияние геоморфологических особенностей горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов. **Методы.** В работе использован комплексный подход, включающий математические модели, численные эксперименты, регрессионный анализ натуральных и численных данных и разработку комплексной методики в ГИС технологиях. На основе данных космического зондирования Земли SRTM была создана цифровая модель рельефа (DEM) и выполнены расчеты устойчивости склонов в статической постановке методом Бишопа и при динамических воздействиях. При этом динамические (сейсмические) колебания моделировались методом конечных элементов. **Результаты.** Установлена связь интенсивности колебаний поверхности скального массива с коэффициентом, равным произведению угла наклона рельефа на относительную высоту, и получены формулы для пиковых ускорений и приращений интенсивности. На основе полученных данных было выполнено ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на массив.

Ключевые слова: Мамисон, геоморфология, склоновые процессы, опасные геологические процессы, численное и цифровое моделирование, метод конечных элементов (МКЭ).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект «Разработка инновационных методов диагностирования и прогнозирования лавинно-селевых явлений, деградации горного оледенения и разработка рекомендаций по защите от их негативного воздействия на рекреационные комплексы ВТРК «Мамисон»» № 23-17-20001).

Для цитирования: Габараев А.Ф., Мельков Д.А., Кортиев А.Л., Козырев Е.Н. Влияние геоморфологических условий горного региона на интенсивность проявления опасных геологических процессов. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 10(4): 198-212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Original paper

Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes

A.F. Gabaraev¹, D.A. Melkov¹, A.L. Kortiev², E.N. Kozyrev¹

¹Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: olgaburdzieva@mail.ru;

²North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 12.09.2023, revised: 29.11.2023, accepted: 04.12.2023

Annotation. Relevance. Hemorphology is one of the key factors in the development of geological processes. Due to the significant mass of displaced material, slope processes have enormous destructive power and pose a great danger to accommodation, transport and other economic facilities. In example of the Mamison recreational complex, the influence of the geomorphological features of the mountain region on the intensity of the manifestation of hazardous heological processes was studied. **Methods.** The work uses an integrated approach, including mathematical models, numerical experiments, regression analysis of natural and numerical data and the development of an integrated methodology in GIS technologies. Based on SRTM Earth space sensing data, a digital elevation model (DEM) was created and slope stability calculations were performed in a static setting using the Bishop method and under dynamic loadings. In the latter case, seismic vibrations were modeled by the finite element method. **Results.** A connection has been established between the intensity of vibrations of the surface of a rock massif and a coefficient equal to the product of the angle of inclination of the relief and the relative height, and formulas for peak accelerations and intensity increments have been obtained. Based on the data obtained, the territory was ranked according to the complex influence of static and dynamic loads on the massif.

Keywords: Mamison, hemorphology, slope processes, hazardous geological processes, numerical and digital numerical and digital modeling, finite element method (FEM).

Acknowledgement: *This work was supported by the Russian Science Foundation (Development of innovative methods for diagnosing and predicting avalanche and mudflow phenomena, degradation of mountain glaciation and development of recommendations for protection against their negative impact on the recreational complexes of the ATRC "Mamison", project No. 23-17-20001).*

For citation: Gabaraev A.F., Melkov D.A., Kortiev A.L., Kozyrev E.N. Influence of geomorphological conditions of a mountain region on the intensity of hazardous geological processes. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(4): 198-212. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.50.016

Введение

Территория Северной Осетии подвержена разрушительному воздействию практически всех известных типов опасных геологических процессов, которые могут привести к гибели людей и колоссальным материальным потерям, оказав существенное влияние на социально-экономическую обстановку и безопасность терри-

тории Республики. Тяжесть последствий обуславливается большим разнообразием геолого-морфологических, климатических и, в целом, ландшафтных условий преимущественно горной территории Северной Осетии. Яркими примерами служат: сход ледника Колка в 2002 г., обвал в районе Девдоракского ледника в 2014 г., активизация Мацутинского оползня в 2019 г.

Расположение исследуемой территории в зоне альпийской тектономагматической активизации Большого Кавказа определяет свойственные областям альпийской складчатости сложные инженерно-геологические условия, вызванные разнообразием литологического состава пород, их интенсивной тектонической нарушенностью, активной неотектоникой и сейсмичностью, широким развитием современных экзогенных геологических процессов [Чотчаев и др., 2016, 2017, 2020]. Определяющим фактором методологической основы исследований является геоморфология, влияние которой на интенсивность формирования экзогенных процессов, зависит от способности элементов рельефа разрушаться и условий накопления формами рельефа эрозионного материала.

Из экзогенных геологических процессов на территории распространены: выветривание, эрозионные, селевые и гравитационные (оползневые, обвальные), лавинные, солифлюкция, суффозия и др. В связи с развитием туризма актуальным является исследование района комплекса «Мамисон». Данный район характеризуется детальной изученностью, позволяющей выполнить сопоставление данных моделирования с проявлением склоновых процессов различной природы. Комплексное исследование выполнено в работах [Чотчаев и др., 2021], где территория делилась на геотаксоны и определялось воздействие целого ряда факторов на формирование опасных геологических процессов в виде экспертных оценок. Установлена устойчивая приуроченность экзогенных процессов к тектоническим нарушениям, зонам сейсмической и неотектонической активности, повсеместно отмечаемой на всей территории, интерпретируемая как результат причинно-следственной связи эндогенных и экзогенных геодинамических процессов. В настоящем исследовании с большей детальностью рассматривается геоморфологическая составляющая развития процессов при статических и динамических нагрузках на основе математического моделирования.

Методы

В работе использован комплексный подход, включающий использование математических моделей, для оценки устойчивости склонов при статических и динамических нагрузках, проведение численных экспериментов, регрессионный анализ натурных и численных данных и разработку комплексной методики на основе ГИС технологий.

В основу методологического обоснования проводимых исследований положены современные теоретические и эмпирические представления о геодинамических процессах, и экспериментально полученные данные исследований ряда динамически опасных объектов региона и районов Центрального Кавказа [Кюль и др., 2019; Svalova et al., 2019], классификационное представительство геодинамических процессов на территории, структурно-тектонические и литологические особенности геологической среды, комплекс физико-механических, геофизических и геохимических характеристик пород, наконец, их собственные физические поля [Фоменко,

2016; Заалишвили, Чотчаев, 2016; Чотчаев и др., 2016], а их отклик на воздействие искусственными полями может служить своеобразным показателем текущего состояния объекта. Определяющим фактором методологической основы исследований является также геоморфология, влияние которой на интенсивность формирования экзогенных процессов, зависит от способности элементов рельефа разрушаться и условий накопления формами рельефа эрозионного материала. Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние, влияющее на физические параметры объекта, петрофизические свойства пород и уровень подземных вод.

Устойчивость склонов оценивалась на основе цифровой модели рельефа с помощью программы Scoops3D [Заалишвили, Кануков, 2019; Zaalishvili et al., 2020a; Zaalishvili et al., 2020b]. Подход был первоначально описан в [Reid et al., 2000]. Результаты анализа Scoops3D определяют минимальный коэффициент безопасности (показатель устойчивости) для потенциальных поверхностей скольжения, влияющих на каждую ячейку матрицы высот по всему ландшафту, а также для объемов или площадей, связанных с этими потенциальными повреждениями склонов.

Методика позволяет рассчитывать относительную стабильность склонов по всему ландшафту, и тем самым выполнять региональные оценки подверженности оползням в качестве инструмента скрининга для выявления участков ландшафта с низкой стабильностью, что предполагает более детальный анализ устойчивости. Scoops3D позволяет пользователю выбирать между двумя хорошо известными методами геотехнического равновесия моментов для расчета устойчивости вращающейся поверхности: обычный метод Феллениуса и упрощенный метод Бишопы [Duncan, Wright, 2005].

Упрощенный метод Бишопы обеспечивает значения коэффициента безопасности, аналогичные значениям, полученным с помощью более строгих методов обеспечения устойчивости (таких как методы Спенсера или Morgenштерна-Прайса) как в 2D [Duncan, Wright, 1980], так и 3D [Reid et al., 2015]. Упрощенный метод Бишопы требует итеративного метода решения для вычисления коэффициента безопасности F , и итерационный процесс иногда не может сходиться к решению или сходится к ложному (то есть, неправильному) решению, особенно если пробная поверхность включает очень крутые участки скольжения или подвержена влиянию высокого давления поровой воды, которое пользователем отфильтровывается.

В 1984 году В.Б. Заалишвили на основе полевых наблюдений было установлено, что наклон рельефа и высота расположения участка, фактически, определяют амплитудный уровень волновых полей мощных невзрывных импульсных и вибрационных источников.

Позже, С.А. Гогмачадзе и В.Б. Заалишвили ввели понятие, т.н. коэффициента «рельефности», представляющего произведение угла наклона рельефа (α , град) и высоты расположения участка (h , м) (Отчет ИСМИС АН ГССР, 1989). Указанный параметр $K=\alpha h$ (град, м) характеризует увеличение интенсивности землетрясений в зависимости от грунтовых условий до одного-двух баллов [Габеева, Бурдзиева, 2008; Заалишвили, 2009].

Модификация динамических (сейсмических) движений грунта особенностями поверхности земли, такими как холмы, хребты, скалы и каньоны, известная как топографические эффекты, хорошо известна по данным инструментальных наблю-

дений и макросейсмического обследования сильных землетрясений [Assimaki et al., 2005; Bard, 1982; Jeong et al., 2019; Shiyamalagowri et al., 2020; Пучков, Гарагозов, 1973; Заалишвили, 2009].

В качестве примеров с большим усилением исходного сигнала влиянием рельефа, можно привести: запись движения грунта с пиковым значением ускорения 1,82 g на вершине холма Тарзана во время землетрясения в Нортридже в 1994 году [Bouchon, Barker, 1996], запись на плотине Пакойма (1,12 g) во время землетрясения в Сан-Фернандо 1971 года [Boore, 1972] и движение грунта (2,74 g), зарегистрированное японской сейсмической сетью K-Net (station MYG004) во время землетрясения Тохоку 2011 [Nagashima et al., 2012] и др.

В частности, при Рачинском землетрясении (Грузия, 1991) в Амбролаурском и Онском районах много зданий сельского типа, расположенных у оснований холмов, получило незначительные повреждения (0–1-й степени) (Гогмачадзе, Заалишвили и др., 1991-Отчет ИСМИС АН ГССР). В то же время здания, расположенные на склонах, превышающих 20°, были повреждены значительно сильнее (2–3-я степень). При расположении обширных территорий на высокогорных плато сейсмический эффект часто предопределяется исключительно влиянием рельефа, но на это редко обращали внимание. При этом из-за близости к эпицентру могут преобладать частичные и полные обрушения застройки. Например, в с. Боква при Рачинском землетрясении 1991 г. преобладали повреждения 4–5-й степени, т.е. частичные и полные обрушения зданий и сооружений [Папалашвили и др., 1997]. Здесь при анализе причин формирования сейсмического эффекта, влияние рельефа в виде параметра αh , не учитывалось, хотя на основе дальнейшего анализа, в основном, отчетливо проявлялось [Заалишвили, 2009].

Топографические эффекты изучаются с использованием таких методов, как аналитические решения в замкнутой форме, конечные разности, конечные элементы и граничные элементы [Bard, 1982; Assimaki, 2005; Заалишвили и др., 2000, 2008 и др.].

Моделирование методом конечных элементов позволяет строить двухмерные и трехмерные модели и подходит для моделирования геологических объектов [Заалишвили и др., 2000, 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, Вильсон, 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, приложенного к основанию грунтового массива. Грунт находится в условиях плоской деформации и рассматривается как ортотропная среда. Оси ортотропии совпадают с направлениями главных напряжений. Решение системы выполнялось методом Вильсона, по существу являющимся развитием метода линейного ускорения.

Геоинформационное моделирование реализовано в среде QGIS, статистическая

обработка данных, регрессионный анализ выполнялись средствами библиотеки sklearn [Pedregosa et al., 2011].

Результаты и обсуждение

Расчеты выполнялись на цифровой модели рельефа (рис. 1), построенной по данным SRTM [Farr et al., 2007]. Программа Scoops3D использует трехмерный «метод столбцов» анализа предельного равновесия для расчета устойчивости потенциальных разрушений откосов (оползней) со сферической потенциальной поверхностью скольжения. Результаты анализа (рис. 2) показывают минимальный коэффициент безопасности (показатель устойчивости) для потенциальных поверхностей скольжения, влияющих на каждую ячейку матрицы высот по всему ландшафту, а также для объемов или площадей, связанных с этими потенциальными повреждениями склонов. Для высот более 3500 м расчеты не выполнялись. Следует отметить, что по данным расчетов, выполненных ранее, в целом, для территории Северной Осетии [Мельков, Ревазов, 2021], участки, характеризующиеся наибольшей опасностью (минимальные значения коэффициента безопасности F) расположены в районах Цей, Унал-Садон и Бурон. Исследуемый район в отличие от них характеризуется более высокими значениями индекса безопасности и вполне обоснованно подходит для создания рекреационной зоны. Детальное изучение свойств горных пород и топосъемка опасных участков позволят произвести более точную оценку их устойчивости.

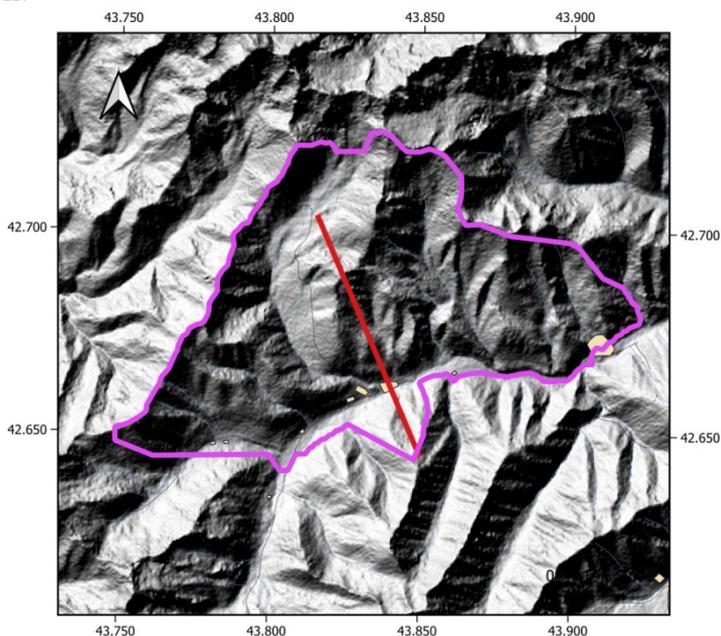


Рис. 1. Цифровая модель рельефа, исследуемый район и профиль для которого построена расчетная конечноэлементная модель (секущая прямая) /

Fig. 1. Digital elevation model, the area under study and the profile for which a computational finite element model (secant line) was built

Для установления параметров влияния рельефа на усиление сейсмических колебаний была построена двумерная конечно-элементная модель разреза, включающего основные объекты, один из горнолыжных склонов и проявление опасных геологических процессов (рис. 3). Слева и справа от склона для минимизации влияния отражений от границ, на них заданы демпфирующие элементы (тип узла 4). Свой-

ства горного массива заданы для средних значений физико-механических свойств слабо выветрелых коренных пород: плотность 2600 кг/м^3 , модуль Юнга $E = 15 \cdot 10^9 \text{ Па}$ и коэффициент Пуассона – 0.1.

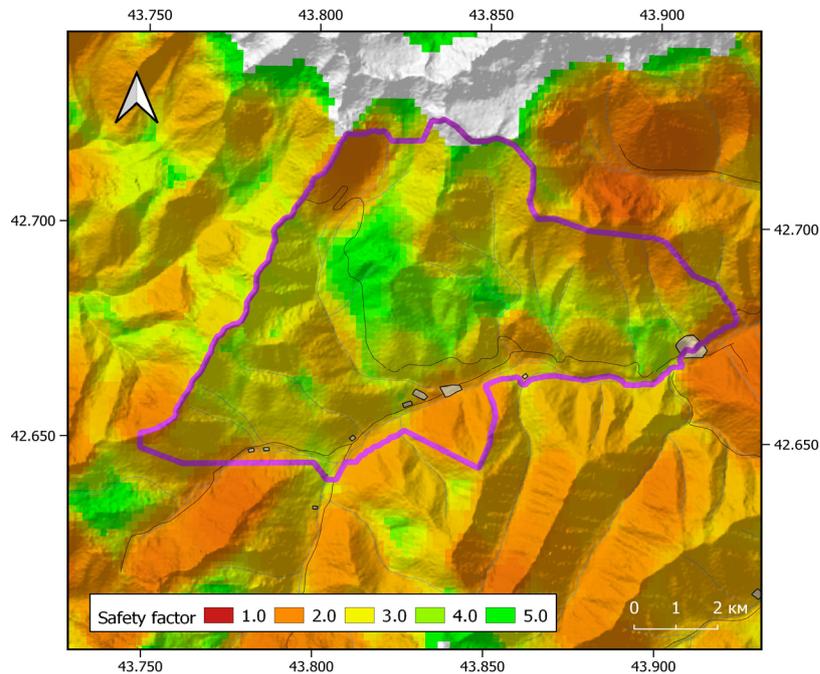


Рис. 2. Результаты оценки устойчивости склонов в виде фактора безопасности F /
Fig. 2. Results of slope stability assessment in the form of safety factor F

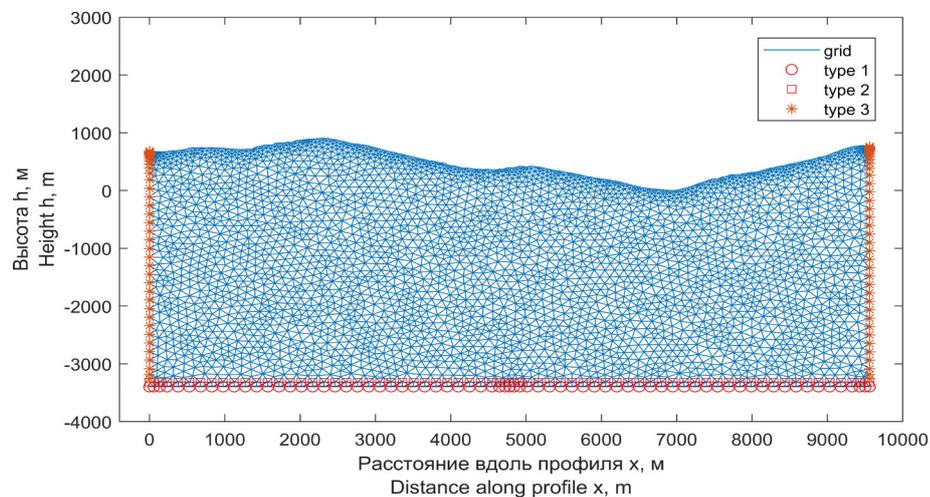


Рис. 3. Двумерная модель разреза для расчета колебаний массива
методом конечных элементов (МКЭ) /

Fig. 3. Two-dimensional model of the section for calculating rock mass vibrations
using the finite element method (FEM)

Пространственная неоднородность сейсмических колебаний поверхности также может быть обусловлена и другими факторами, такими как направление прихода сейсмической волны и является важной характеристикой для расчета протяженных линейных объектов [Заалишвили и др., 2022]. В данном случае воздействия задавались в основание модели в горизонтальном направлении, моделируя вертикально

распространяющуюся SH-волну. Воздействие задавалось на нижнем втором слое узлов модели, нижние узлы закреплены в обоих направлениях, в соответствии с [Jeremić, 2006], в узлах на вертикальных границах модели задавалось демпфирование колебаний (предполагалось демпфирование по Рэлею). Внешнее воздействие задавалось в виде инструментальной акселерограммы Loma Prieta.

Далее приведены результаты расчетов в виде пиковых ускорений поверхности PGA вдоль расчетного профиля (рис. 4 в). Видна связь с высотой и углом наклона рельефа (рис. 4 а, б). Далее были построены соответствующие регрессионные выражения.

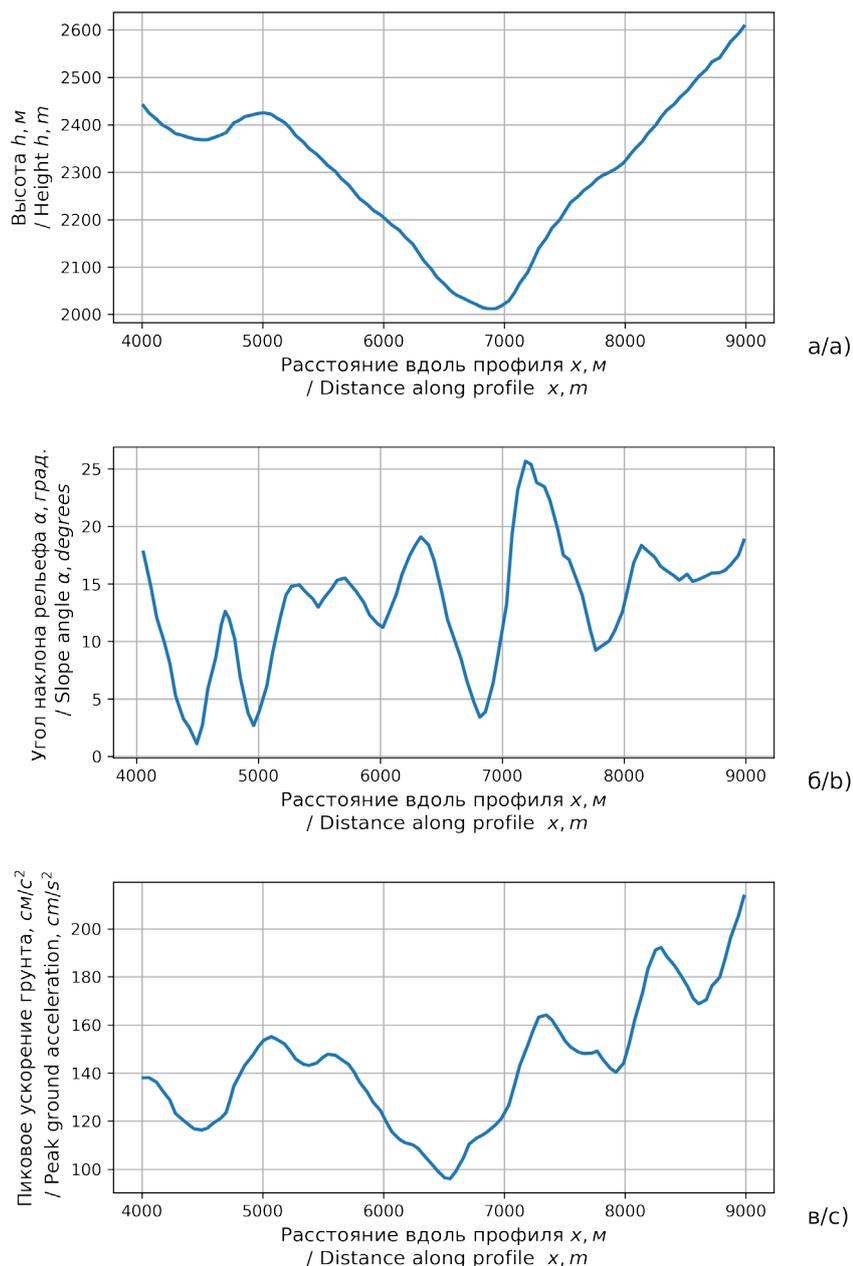


Рис. 4. Значения высот и углов наклона рельефа вдоль исследуемого профиля и соответствующие максимальные ускорения /

Fig. 4. Heights and angles of inclination of the relief along the profile under study and the corresponding peak ground accelerations

В результате получены следующие выражения (1) и (2) с соответствующими метриками (рис. 5):

$$\text{PGA} = 7.62 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha (h-h_0) + 113.71 \quad (1)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.69$

Среднее отклонение MAE = 11.83

Среднеквадратическое отклонение RMSE = 14.61

Критерий Фишера f-test = 209.67

p-уровень значимости p-value = $1.46 \cdot 10^{-25}$

$$\Delta I = 8.79 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha (h-h_0) - 0.028 \quad (2)$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0.66$

MAE = 0.12

RMSE = 0.15

Критерий Фишера f-test = 180.62

p-уровень значимости p-value = $1.63 \cdot 10^{-23}$

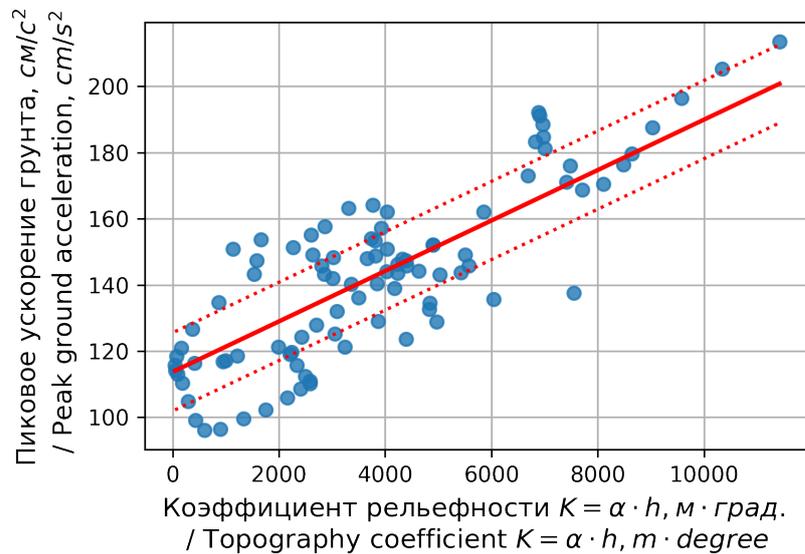


Рис. 5. Зависимость пикового ускорения от параметра $K=ah$ /

Fig. 5. Variation of peak acceleration with $K=ah$ parameter

Наибольшее значение коэффициента детерминации установлено для модели содержащей произведение относительной высоты и угла наклона рельефа, при значении параметра $h_0 = 2000$ м. Расчеты выполнялись для пиковых ускорений и приращений сейсмической интенсивности, предполагая увеличение амплитуды ускорений в два раза, соответствующим приращению на один балл.

Приращения сейсмической интенсивности, обусловленные влиянием рельефа, рассчитывались по формуле (2). Для оценки интегрального влияния обоих факторов рассмотрено произведение приращений сейсмической интенсивности и величины, обратной фактору безопасности (рис. 6). Даже без учета информационного слоя, содержащего геологическую информацию, выявилось маркирование оползневых и обвально-осыпных источников (рис. 6).

Сопоставление с базой данных по произошедшим на территории региона проявлениям опасных склоновых процессов позволит уточнить полученные закономерности и построить соответствующие регрессионные модели прогноза.

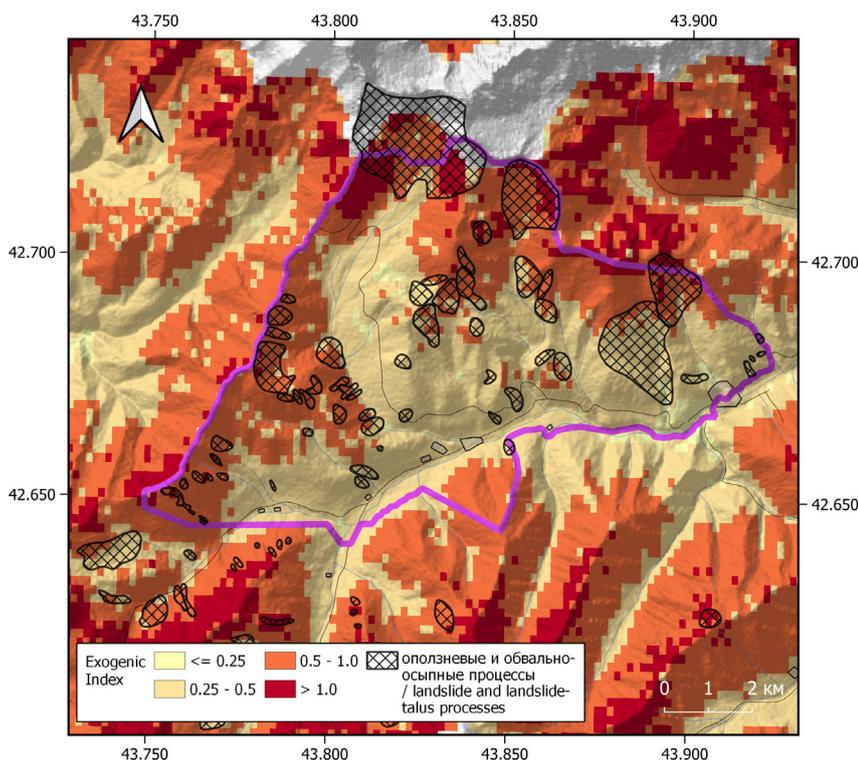


Рис. 6. Ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на горный массив и развитие оползневых и обвально-осыпных процессов (обозначены штриховкой) /

Fig. 6. Ranking of the territory according to the complex influence of static and dynamic loads on the mountain range and the development of landslide and landslide-talus processes (indicated by shading)

Выводы

1. В связи со значительной массой смещаемого материала, склоновые процессы обладают огромной разрушительной силой и представляют большую опасность для транспортных и других объектов экономики. На примере рекреационного комплекса Мамисон исследовано влияние геоморфологических особенностей горного региона на интенсивность проявления опасных процессов.

2. Для оценки устойчивости склонов при статических и динамических нагрузках использован комплексный подход, включающий использование следующих подходов: математическое моделирование, численные эксперименты, регрессионный анализ натуральных и численных данных и разработка комплексной методики на основе ГИС технологий.

3. На основе данных космического зондирования Земли SRTM была создана цифровая модель рельефа (DEM) и выполнены расчеты устойчивости склонов методом Бишопа в программе Scoops3D, позволившие выявить участки ландшафта с низкой стабильностью, которые в дальнейшем должны быть исследованы более детально.

4. Выполнено моделирование колебаний скального массива методом конечных элементов (МКЭ) и установлена связь интенсивности колебаний поверхности скального массива с коэффициентом рельефности, равным произведению угла наклона рельефа на относительную высоту, и получены формулы для пиковых ускорений и приращений интенсивности.

5. Произведено ранжирование территории по комплексному влиянию статических и динамических нагрузок на массив и сопоставление с развитием оползневых и обвально-осыпных процессов.

6. Дальнейшее направление работ заключается в верификации выделенных участков, уточнении регрессионных соотношений и разработке вероятных сценариев, таких как эффекты различных режимов потока грунтовых вод и пространственные вариации свойств грунтовых материалов, перекрывающих скальный массив.

Литература

1. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: Пер. с англ. М.: Стройиздат. – 1982. – 448 с.

2. Габеева И.Л., Бурдзиева О.Г. Механизмы формирования интенсивности землетрясений в горных районах. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 53–56.

3. Заалишвили В.Б., Отинадшвили М.Г., Тимченко И. Анализ сильных движений толщи грунта с использованием численных методов. // Теория сооружений и сейсмостойкость. – 2000. – № 1. – С. 67–71.

4. Заалишвили В.Б. Мельков Д.А., Отинадшвили М.Г. Использование метода конечных элементов при оценке сейсмической опасности горных территорий. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 49–52.

5. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. – М.: Наука. – 2009. – 350 с.

6. Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О. Комплексный анализ геологических данных и скоростной модели ММЗ на разрезах Центрального Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №4. – С. 52–67.

7. Заалишвили В.Б., Кануков А.С. Геоинформационные системы в геофизике. Практическая реализация геоинформационной системы с поддержкой моделирования последствий опасных природно-техногенных процессов. // В сборнике: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. – 2019. – С. 374–383.

8. 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. – 2022. Т. 12. № 1. – С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.

9. Кюль Е.В., Корчагина Е.А., Джаппуев Д.Р. Пространственные закономерности образования опасных экзогенных процессов. / Тематический том – Нальчик: КБНЦ РАН. 2019. 170 с.

10. Мельков Д.А., Ревазов М.О. Оценка потенциальной оползневой опасности территории РСО-Алания по геоморфологическим и геологическим данным. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2021. – № 2(85). – С. 48–54. DOI: 10.33580/2541-9684-2021-85-2-48-54.

11. Папалашвили В.Г., Варазанашвили О.Ш., Гогмачадзе С.А., Заалишвили В.Б., Кипиани Д.Г., Махатадзе Л.Н., Мухадзе Т.И., Чачава Т.Н., Айвазишвили И.В. Рача-Джавское землетрясение 29 апреля 1991 г. // Землетрясения в СССР в 1991 г. ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН. – М., 1997. – С. 18–25.

12. Пучков С. В., Гарагозов Д. Исследование влияния холмистого рельефа местности на интенсивность сейсмических колебаний при землетрясениях. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1973. – Выпуск 15. – С. 90–93.

13. Фоменко Н.Е. Комплексование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях. / Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та. 2016. – 291 с.

14. Чотчаев Х.О., Заалишвили В.Б., Невский Л.Н., Шемпелев А.Г. Геоморфология как

признак наследственности структурных особенностей земной коры. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – №1. – С.141–158. DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20720.

15. Чотчаев Х.О., Оганесян С.М., Гончаренко О.А. Опасные геологические процессы на территориях экономического освоения в горной части Республики Северная Осетия – Алания. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2017. – Т. 9. № 3(33). – С. 195–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210.

16. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Влияние геодинамических процессов на геологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

17. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007.

18. Assimaki D., Kausel E., Gazetas G. Soil-dependent topographic effects: A case study from the 1999. // Athens earthquake, Earthq Spectra. – 2005. – Vol. 21. No. 4. – pp. 929–966.

19. Bard P.-Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. // Geophysical Journal International. – 1982. – Vol. 72. Issue 3. – pp. 731–760.

20. Boore D.M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. // Bulletin of the seismological Society of America. – 1972. – Vol. 62. No. 1. – pp. 275–284.

21. Bouchon M., Barker. J. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California. // Bulletin of the seismological Society of America. – 1996. – Vol. 86. – pp. 66–72.

22. Duncan J.M., Wright S.G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. // Environmental Geology. – 1980. Vol. 16. – pp. 5–17.

23. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. / New York, John Wiley & Sons. – 2005. – 312 p.

24. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R. et al., The Shuttle Radar Topography Mission. // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45. Issue 2. DOI: 10.1029/2005RG000183.

25. Jeong S., Asimaki D., Dafni J., Wartman J. How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 116. – pp. 654–667. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.10.028.

26. Jeremić B. HPC for NEES: Plastic Domain Decomposition Method. NEES Annual Meeting, Washington, District of Columbia, June 21-23, 2006.

27. Nagashima F., Kawase H., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J., Hayakawa T., Satoh T., Oshima M. Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku region, Japan to delineate soil nonlinearity. // In: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon. – 2012. P. 10.

28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. // Journal of Machine Learning Research. – 2011. – Vol. 12. – pp. 2825–2830.

29. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices. // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – pp. 6043–6056.

30. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Henderson S.T. Scoops3D-software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape. Menlo Park: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. – 2015. – book 14. chap. A1. – 218 p. DOI: 10.3133/TM14A1

31. Shiyamalagowri G., Ganapathy P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Partitioning around medoids approach application for computation of regional flood and landslide quantiles. // E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019). – 2020. – 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702001.

32. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // Geology and Geophysics of Russian South. – 2019. – Vol. 9. No. 2. – pp 109–127. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31981.

33. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020a. – Vol. 913. – 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

34. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Gabaraev A.F., Dzobelova L.V. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: luar case study. // E3S Web of Conferences. – 2020b. – Vol. 164. – 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.

References

1. Bathe K., Wilson E. Numerical methods of analysis and the finite element method: Transl. from English. Moscow. Stroyizdat. 1982. 448 p. (in Russ.)

2. Gabeeva I.L., Burdzieva O.G. Mechanisms of formation of earthquake intensity in mountainous areas. Earthquake-resistant construction. Safety of structures. 2008. No. 3. pp. 53–56. (in Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Otinashvili M.G., Timchenko I. Analysis of strong movements of soil thickness using numerical methods. Theory of structures and seismic resistance. 2000. No. 1. pp. 67–71. (in Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Otinashvili M.G. Using the finite element method in assessing the seismic hazard of mountain areas. Seismic Construction. Safety of structures. 2008. No. 3. pp. 49–52. (in Russ.)

5. Zaalishvili V.B. Seismic microzoning of the territories of cities, settlements and large construction sites. Moscow. Nauka. 2009. 350 p. (in Russ.)

6. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O. Complex analysis of geological data and MMS velocity model on sections of the Central Caucasus. Geology and geophysics of Russian South. 2016. No. 4. pp.52–67. (in Russ.)

7. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S. Geographic information systems in geophysics. Practical implementation of a geographic information system with support for modeling the consequences of hazardous natural and man-made processes. In: Hazardous natural and man-made processes in mountain regions: models, systems, technologies. 2019. pp. 374–383. (in Russ.)

8. 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. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (in Russ.)

9. Kühl E.V., Korchagina E.A., Dzhappuev D.R. Spatial patterns of formation of dangerous exogenous processes. Thematic volume – Nalchik. Publishing house KBSC RAS. 2019. pp.14–17. (in Russ.)

10. Melkov D.A., Revazov M.O. Assessment of the potential landslide hazard of the territory of North Ossetia-Alania based on geomorphological and geological data. Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021. No. 2(85). pp. 48–54. DOI: 10.33580/2541-9684-2021-85-2-48-54. (in Russ.)

11. Papalashvili V.G., Varazanashvili O.Sh., Gogmachadze S.A., Zaalishvili V.B., Kipiani D.G., Makhataдзе L.N., Mukhadze T.I., Chachava T.N., Aivazishvili I.V. Racha-Java earthquake of April 29. 1991. Earthquakes in the USSR in 1991. O.Yu. Schmidt RAS. Moscow. 1997. pp. 18–25.

12. Puchkov S.V., Garagozov D. Study of the influence of hilly terrain on the intensity of seismic vibrations during earthquakes. Questions of engineering seismology. 1973. Issue 15. pp. 90–93. (in Russ.)

13. Fomenko N.E. Integration of geophysical methods in engineering and environmental surveys. Textbook. Rostov-on-Don. Publishing house of the Southern Federal University. 2016. 291 p. (in Russ.)

14. Chotchaev Kh.O., Zaalishvili V.B., Nevsky L.N., Shempelev A.G. Geomorphology as a

sign of heredity of structural features of the earth's crust. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2016. No. 1. pp. 141–158. DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20720. (in Russ.)

15. Chotchaev Kh.O., Oganessian S.M., Goncharenko O.A. Hazardous geological processes in the territories of economic development in the mountainous part of the Republic of North Ossetia – Alania. *Sustainable development of mountain territories*. 2017. Vol. 9 No. 3(33). pp. 195–210. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210. (in Russ.)

16. Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No 4. pp. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (in Russ.)

17. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No 1. pp. 81–94. DOI: 10.46698/VNC.2021.15.66.007. (in Russ.)

18. Assimaki D., Kausel E., Gazetas G. Soil-dependent topographic effects: A case study from the 1999. Athens earthquake, *Earthq Spectra*. 2005. Vol. 21. No. 4. pp. 929–966.

19. Bard P.-Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophysical Journal International*. 1982. Vol. 72. Issue 3. pp. 731–760.

20. Boore D.M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1972. Vol. 62. No. 1. pp. 275–284.

21. Bouchon M., Barker. J. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California. *Bulletin of the seismological Society of America*. 1996. Vol. 86. pp. 66–72.

22. Duncan J.M., Wright S.G. The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. *Environmental Geology*. 1980. Vol. 16. pp. 5–17.

23. Duncan J.M., Wright S.G. *Soil Strength and Slope Stability*. New York, John Wiley & Sons. 2005. 312 p.

24. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R. et al., The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. 2007. Vol. 45. Issue 2. DOI: 10.1029/2005RG000183.

25. Jeong S., Assimaki D., Dafni J., Wartman J. How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 116. pp. 654–667. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.10.028.

26. Jeremić B. HPC for NEES: Plastic Domain Decomposition Method. NEES Annual Meeting, Washington, District of Columbia, June 21-23, 2006.

27. Nagashima F., Kawase H., Matsushima S., Sanchez-Sesma F.J., Hayakawa T., Satoh T., Oshima M. Application of the H/V spectral ratios for earthquake ground motions and microtremors at K-NET sites in Tohoku region, Japan to delineate soil nonlinearity. In: *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon. 2012. P. 10.

28. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. pp. 2825–2830.

29. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Gravitational stability of three-dimensional stratovolcano edifices. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. pp. 6043–6056.

30. Reid M.E., Christian S.B., Brien D.L., Henderson S.T. Scoops3D-software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape. Menlo Park: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 2015. book 14. chap. A1. 218 p. DOI: 10.3133/TM14A1

31. Shiyamalagowri G., Ganapathy P., Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Partitioning around medoids approach application for computation of regional flood and landslide quantiles. *E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019)*. 2020. 02001. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702001.

32. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 2. pp 109–127. DOI:10.23671/VNC.2019.2.31981.

33. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020a. Vol. 913. 052050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052050.

34. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Melkov D.A., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Arkhireeva I.G., Gabaraev A.F., Dzobelova L.V. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: luar case study. E3S Web of Conferences. 2020b. Vol. 164. 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202016401014.