

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

УДК 550.8.08

DOI: [10.46698/VNC.2022.70.64.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.64.006)

Оригинальная статья

Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан)

Ш.Г. Идармачев , В.И. Черкашин , И.А. Алиев , И.Ш. Идармачев 

Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75,
e-mail: idarmachev46@mail.ru

Статья поступила: 30.03.2022, доработана: 27.04.2022, принята к публикации: 12.05.2022

Резюме: Актуальность работы. Изучение обвальных геологических процессов на Кавказе является важной проблемой обеспечения безопасности высокогорных населенных пунктов. Для этого применяются различные методы: аэрокосмические, палеогеографические, геоморфологические и др. Отдельным пунктом стоит вопрос геофизического мониторинга неустойчивых массивов в местах расположения населенных пунктов, линий электропередач и других объектов народно-хозяйственного значения. Поэтому **целью работы** является изучение динамики ширины трещины, связанной с неустойчивым состоянием скального массива, представляющего опасность обрушения на населенный пункт Гуниб с координатами 42.40° с.ш., 46.94° в.д. Данный массив представляет собой вертикальный блок размером 20х50х60 м, отделенный от основной части горы. На вершине массива ширина трещины между целиком и оторванным блоком составляет около 2 м. Для геофизического мониторинга был использован новый **метод** инструментального измерения ширины трещины. Разработка состоит из датчика линейного изменения длины с циферблатным регистратором, вольфрамовой проволоки, закрепленной на противоположных торцах трещины отрыва неустойчивого скального массива от цельной части. Преимуществом данного инструмента, по сравнению с электронными устройствами, является отсутствие источника питания, дрейфа нуля, простота конструкции. Данная установка может быть рекомендована для практического применения.

Результаты работы. На основе мониторинга исследована динамика изменения ширины трещины скального массива в течение полутора лет. Установлена зависимость ширины трещины от сезонной годовой температуры атмосферы с отрицательным коэффициентом корреляции 0,78. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины за период 365 сут с 18.08.2020 по 18.08.2021 составила 4570 мкм. Установлено, что атмосферные осадки не оказывают прямого влияния на деформационный процесс скального массива. Однако не исключается возможность их влияния спустя некоторое время, которое необходимо для просачивания дождевой воды в основание исследуемого массива. Увлажнение прослойки глинистых пород, лежащих в основании толщи известняков, может привести к деформации глин, в результате чего возможно оседание массива или подвижка по направлению уклона пласта в сторону обрыва. Обратимый характер изменения ширины трещины за годовой период наблюдений, а также отсутствие тренда в ряде данных измерений за весь период наблюдений позволяет полагать, что скальный массив на данном этапе не испытывает динамику, связанную с наклоном в сторону его предполагаемого падения. Однако на графике в отдельные периоды наблюдаются скачкообразные изменения большой амплитуды 1500–2500 мкм, природу которых предстоит еще выяснить. Это предполагает проведение дальнейших исследований, например, наклонометрических и сейсмометрических.

Ключевые слова: микросейсмы, землетрясения, стоячие океанические волны, волны Лява и Релея, модулированные колебания, струнный датчик, коэффициент температурного расширения, наклонометр.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию ФГБУН Института геологии ДФИЦ РАН, код: FMSW-2022-0026.

Для цитирования: Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Алиев И.А., Идармачев И.Ш. Изучение динамики ширины трещины потенциально обвального скального массива струнным датчиком на горе Гуниб (Дагестан). *Геология и геофизика Юга России*. 2022. 12(2): 78-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

GEOPHYSICAL METHODS

[DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2022.70.64.006)

Original paper

Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan)

Sh.G. Idarmachev^{ID}, V.I. Cherkashin^{ID}, I.A. Aliev^{ID}, I.Sh. Idarmachev^{ID}

Institute of Geology, Dagestan Federal research center, Russian Academy of Sciences, 75 Yaragskogo Str., Makhachkala 367030, Russian Federation, e-mail: idarmachev46@mail.ru

Received: 30.03.2022, revised: 27.04.2022, accepted: 12.05.2022

Summary: Relevance. The study of landslide geological processes in the Caucasus is an important problem of ensuring the safety of high-altitude settlements. Various methods are used for this: aerospace, paleogeographic, geomorphological, etc. A separate point is the issue of geophysical monitoring of unstable massifs in the locations of settlements, power lines and other objects of national economic importance. Therefore, **the aim** of the work is to study the dynamics of the crack width associated with the unstable state of the rock massif, which poses a danger of collapse on the settlement of Gunib with coordinates 42.40° S.W., 46.94° V.D. This massif is a vertical block measuring 20x50x60 m, separated from the main part of the mountain. At the top of the array, the width of the crack between the whole and the detached block is about 2 m. A new **method** of instrumental measurement of the crack width was used for geophysical monitoring. The development consists of a linear length change sensor with a dial recorder, a tungsten wire fixed at opposite ends of a crack in the separation of an unstable rock mass from a solid part. The advantage of this tool, in comparison with electronic devices, is the absence of a power source, zero drift, and simplicity of design. This installation can be recommended for practical use. **Results.** On the basis of monitoring, the dynamics of changes in the width of a crack in a rock massif over a year and a half has been studied. The dependence of the crack width on the seasonal annual atmospheric temperature with a negative correlation coefficient of 0.78 has been established. The maximum amplitude of the crack width change over the seasonal period of 365 days from 08/18/2020 to 08/18/2021 was 4570 microns. It is established that atmospheric precipitation does not have a direct effect on the deformation process of the rock mass. However, the possibility of their influence after some time, which is necessary for rainwater to seep into the base of the studied massif, is not excluded. Moistening of the layer of clay rocks underlying the limestone strata can lead to deformation of clays, resulting in possible subsidence of the massif or movement in the direction of the slope of the formation towards the cliff. The reversible nature of the change in the crack width over the annual observation period, as well as the absence of a trend in a number of measurement data for the entire observation period, suggests that the rock mass at this stage does not experience dynamics associated with a slope towards its expected fall. However, in some periods, the graph shows abrupt changes of a large amplitude of 1500-2500 microns, the nature of which remains to be determined. This implies further research, for example, tilt and seismometric.

Keywords: microseisms, earthquakes, standing ocean waves, Love and Rayleigh waves, modulated oscillations, string sensor, coefficient of thermal expansion, tilt meter.

Acknowledgements: The work was carried out according to the state task of the Institute of Geology of the DFIZ RAS, code: FMSW-2022-0026.

For citation: Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock massif with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2022. 12(2): 78-88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

Введение

Обвальные процессы больших скальных массивов на крутых склонах играют доминирующую роль в долгосрочных процессах формирования ландшафтов и, являясь опасными геологическими процессами, представляют угрозу жизнедеятельности людей и объектам инфраструктуры [Попов и др., 2021; Бондырев и др., 2014]. Классический подход к исследованию обвальных процессов – это изучение их механизмов разрушения [Frayssines, Hantz, 2006], условий окружающей среды до и после события [D’Amato et al., 2016] и долгосрочный геофизический мониторинг с помощью дистанционного зондирования радарными, тахеометрами, точечных измерений смещения щелемерами и другими датчиками [Di Maio et al., 2010; Dixon et al., 2018; Levy et al., 2010; Walter et al., 2020; Заалишвили и др., 2013]. Используются также сейсмические методы исследования [Зайцев, Костюков, 2012; Рагозин, Федотов, 2012; Welch, 1967; Nakamura, 1989; Weber et al., 2018; Идармачев и др., 2021]. В частности, согласно авторам [Dietze, 2019; Dietze et al., 2021] циклическая сейсмическая активность скального массива проявляется для суточных и недельных временных интервалов в основном на низких частотах 1–2 Гц. Авторами [Bottelin et al., 2013] было обнаружено изменение частоты колебаний, связанное с температурным режимом скального массива. С повышением температуры происходит снижение частоты колебаний с временной задержкой в несколько месяцев из-за уменьшения модуля Юнга.

К сожалению, ни один из этих подходов не может обеспечить достоверное представление о процессах разрушения горных пород с высоким временным разрешением, за которым следует неминуемый обвал. Трудности при определении критического состояния обвального процесса представляют также триггерные процессы воздействия сильных землетрясений, колебания, вызванные силой ветра. Оказывают свое влияние изменение сезонной температуры, осадки, периоды переходов от заморозков к таянию снежного покрова и др. [Stock et al., 2013]. Кроме этого, внешними факторами триггерного воздействия могут служить сильные землетрясения, произошедшие на удалении более 1000 км [Sobolev, Zakrzhevskaya, 2013; Nikolaev A.V., Nikolaev V.A., 1993], способствующие возникновению поверхностных волн Релея и Лява с периодами колебаний от нескольких секунд до нескольких десятков секунд [Дубянский и др., 2005]. Поверхностные волны вызывают раскачку высотных зданий амплитудой до 0,5 м, а также провоцируют оползни, обвалы на горных склонах, возникновение трещин в грунтах, обрывы телефонных и электрических линий и нарушения инфраструктуры.

Объектом исследований является неустойчивый скальный массив, расположенный над населенным пунктом Гуниб (Дагестан) (координаты: 42.40° с.ш.; 46.94° в.д.), представляющий опасность для жителей поселения (рис. 1). Этот участок представляет собой вертикальный блок размером 20'50'60 м, отделенный от основной части массива, лежащий на слое алевролитистой глины мощностью до 1 м. Скальный массив вместе с глинистой подложкой наклонен под углом 40° в сторону обрыва. На вершине массива ширина трещины между целиком и оторванным

блоком составляет около 2 м. Учитывая, что прочность на сжатие и сдвиг у глин ниже, чем у известняков, перемещение твердой части толщи горных пород должно происходить в сторону уклона по глинистой прослойке. В результате чего в вышележащем слое образуются вертикальные трещины отрыва, что предопределяет возможность обрушения.

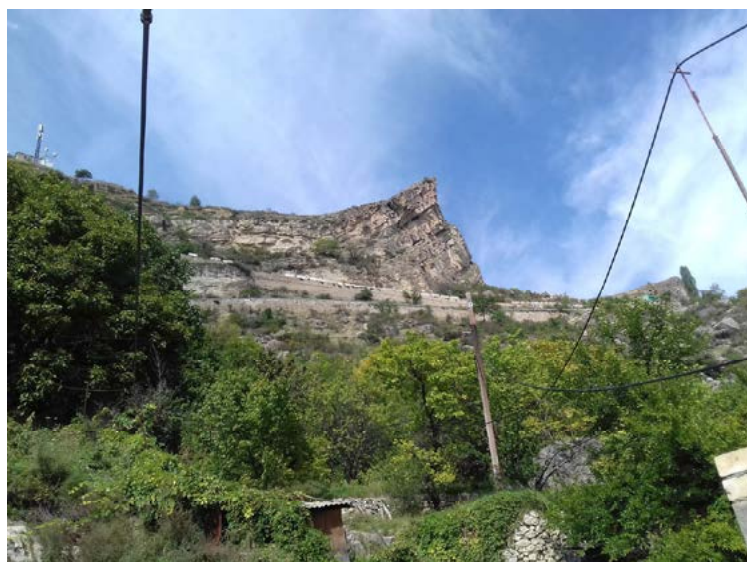


Рис. 1. Фото потенциально обвального массива над Гунибом /

Fig. 1. Photo of a potentially collapsing massif over Gunib

По просьбе администрации поселения в 2020 г. на скальном массиве проводились сейсмометрические наблюдения для регистрации подвижек и колебаний с помощью цифровой установки, состоящей из сейсмометра, операционного усилителя, встроенного в его корпус, и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопряженного с ноутбуком [Идармачев и др., 2021]. Были изучены кинематические параметры скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия, от различного рода внешних воздействий. Было установлено, что микросейсмы штормовых циклонов в океане с периодом 14-15 с вызывают возникновение модулированных собственных колебаний массива с периодом 0,87 с максимальной амплитудой 0,8 мкм.

Кроме этого, за небольшой период сейсмометрических наблюдений было зарегистрировано несколько землетрясений магнитудами $M=3,0-3,6$, произошедших на Главном Кавказском хребте. Эпицентры землетрясений находились от Гуниба на расстояниях 35–45 км. Запись одного из них, произошедшего 15.09.2020 г. с координатами эпицентра: 42.39° с.ш., 46.49° в.д., приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения 15.09.2020 г. /

Fig. 2. Seismogram of the earthquake of 15.09.2020

На сейсмограмме выделяются две волны, вначале проявляется продольная V_p продолжительностью 12 с с максимальной амплитудой 12,6 мкм и затем – поперечная V_s с большей амплитудой 57 мкм и продолжительностью 20 с. Периоды колебаний обеих волн находятся в пределах $T=1,8-2,2$ с. Сравнение периодов колебаний землетрясения и собственных колебаний скалы ($T=0,87$ с) показывает, что они не совпадают по фазе. Поэтому на записи землетрясения нет аномальных резонансных колебаний, связанных с частотой собственных колебаний.

Внешними факторами триггерного воздействия могут служить колебания не только от сильных близких землетрясений, но и удаленных магнитудами $M=9$, которые могут спровоцировать обвальные процессы в массивах горных пород, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

Методы исследования линейной деформации массива

К сожалению, проводить длительные наблюдения с помощью электронных систем не представляется возможным из-за воздействия на аппаратуру различного рода климатических явлений (дождь, гроза и др.). Ярким примером является работа серии телеметрических станций в 2020 г., установленных на горе Хохфогель в австрийских Альпах. Аппаратура вышла из строя в результате грозовой молнии через 44 дня. Установленный нами электронный двухкоординатный наклономер на горе Гуниб, также вышел из строя от грозовой молнии. Учитывая сложившуюся ситуацию, нами был разработан струнный механический датчик собственной конструкции, позволяющий вести измерения ширины трещины с высокой точностью.

Струнный датчик состоит из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм, закрепленной на обеих сторонах трещины. В исследуемом месте ширина трещины составляет 197,8 см. Один конец проволоки закреплен на подвижной части измерительного устройства с циферблатом линейного перемещения марки NEUTER (рис. 3). Натяжение проволоки обеспечивается пружиной. Точность измерения длины составляет 0,01 мм или 10 мкм. Измерительное устройство имеет кожух для защиты от воздействия солнца и дождя. Одновременно измеряется температура атмосферного воздуха градусником, с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. На рисунке 4 приведены совмещенные графики изменения замеров, полученных струнным датчиком, и температуры воздуха за период наблюдений 18.07.2020 г.–16.01.2022 г.



Рис. 3. Фото струнного измерителя ширины трещины /

Fig. 3. Photo of a string crack width meter

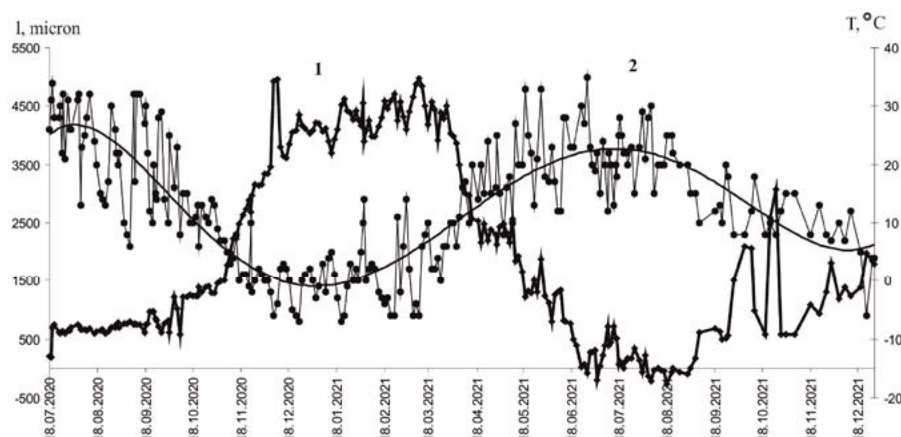


Рис. 4. Графики изменения ширины трещины скального массива над Гунибом струнным датчиком (1) и температуры атмосферы (2) /

Fig. 4. Graphs of changes in the crack width of the rock mass above the Gunib string sensor (1) and atmospheric temperature (2)

Результаты работы и их обсуждение

Анализ графика (1) показывает, что он имеет сезонный ход обратный по фазе относительно графика температуры атмосферного воздуха (2). Коэффициент корреляции между ними для всего периода наблюдений равен $K=-0,78$. С понижением температуры, начиная с октября 2020 г. по март 2021 г., наблюдается расширение трещины, а с повышением температуры с марта по июнь 2021 г. происходит ее сжатие. На относительно коротких интервалах 12–15 суток в июле-августе 2020 г. изменение температуры не оказывает особого влияния. Короткие вариации температуры в пределах 15–25°C вызывают изменение ширины трещины величиной не более 4% от максимального сезонного значения (4570 мкм). Из чего следует, что на ширину трещины оказывает влияние сезонный ход температуры атмосферного воздуха. Некоторая временная задержка экстремальных значений ширины трещины от температуры атмосферы, примерно на 2 месяца, указывает на физически обоснованную связь между ними, то есть, для прогрева и остывания скального массива требуется определенное время.

Можно предположить, что фазы ускорения деформаций и их циклические этапы могут быть связаны с осадками в Гунибском районе. Для сравнения в таблице показано месячное количество осадков в 2020 и 2021 гг. по данным местной метеостанции.

Таблица 1 / Table 1

**Количество осадков в месяц в Гунибе за 2020 и 2021 гг. /
Monthly precipitation in Guniba for 2020 and 2021**

2020 г.							2021 г.	
Июнь / June	Июль / July	Август / August	Сентябрь / September	Октябрь / October	Ноябрь / November	Декабрь / December	Январь / January	Февраль 1–14 / February 1-14
41 мм	103 мм	120 мм	48 мм	6 мм	21 мм	8 мм	23 мм	12 мм

Максимальное количество осадков выпало в июле, августе 2020 г., а ускорение деформации скального массива наблюдается в ноябре и декабре 2020 г., при этом количество осадков выпало в разы меньше, чем в июле-августе. Из этого следует, что атмосферные осадки не оказывают прямого влияния на деформационный процесс скального массива. Однако не исключается возможность их влияния спустя некоторое время, которое необходимо для просачивания дождевой воды в основание массива с глинистой прослойкой. Увлажнение глинистых пород может привести к деформации прослойки, оседанию массива или подвижке по направлению уклона пласта. В этом случае график ширины трещины должен испытывать тренд, указывающий на процесс необратимой деформации, связанный с оседанием или наклоном. Расчет уравнения регрессии для данных всего ряда ширины трещины ($y = -1,37x$) показывает ее уменьшение. Однако уравнение с отрицательным знаком может быть ошибочным из-за небольшого периода наблюдений, менее чем полтора года. В случае оседания или расширения трещины знак уравнения должен быть положительным. Из данного анализа следует, что основным фактором, оказывающим влияние на динамику ширины трещины, является деформация скальных массивов, как цельного, так и отделенного от него, в зависимости от сезонной температуры атмосферы.

Температура атмосферы может также влиять на физические характеристики самого струнного датчика. При этом следует учесть, что температура струны будет меняться практически синхронно с температурой атмосферы. Для этого оценим изменение длины струны датчика за короткий период наблюдений с 27.08.2020 по 08.09.2020, при котором амплитуда изменения температуры атмосферы составила 24°C . Для расчета использовалась формула теплового расширения металлов [Кухлинг, 1985]:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (1)$$

где Δl – линейное расширение металла;

α – температурный коэффициент;

ΔT – разность температур тела.

Подставляя численные значения $\alpha = 4,3 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ для вольфрама, $\Delta T = 24^{\circ}\text{C}$ и длины струны $l = 198 \times 10^4$ мкм в (1) получаем $\Delta l = 204$ мкм. По данным полевых измерений «увеличение» ширины трещины за этот период в результате понижения температуры составило $\Delta l = 100$ мкм. Данное расчетное тепловое изменение длины струны составляет менее 4% от максимальной амплитуды измеренного расширения трещины за весь период наблюдений.

Также по формуле (1) были сделаны численные оценки температурного расширения скалы. Для этого были взяты следующие численные значения: $\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент известняка [Петрунин, Попов, 2011]; $l = 20 \times 10^6$ мкм – поперечная ширина скального массива; $\Delta T = 45^{\circ}\text{C}$ – максимальная амплитуда сезонной температуры. Подставляя их в (1), имеем $\Delta l = 7200$ мкм. Если иметь в виду, что скальный массив расширяется в обе стороны равномерно, то изменение ширины трещины составит только половину Δl , то есть – 3200 мкм. Из этих оценок следует, что тепловое расширение массива может существенно исказить данные измерения ширины трещины, связанные с наклоном скалы.

Выводы

1. Проведено испытание механического струнного датчика линейного перемещения для измерения динамики ширины трещины потенциального обвального скального массива на горе Гуниб. Погрешность измерений не превышает 10 мкм или 10^{-5} м. Преимуществом данного инструмента является отсутствие источника питания, дрейфа нуля, простота конструкции по сравнению с электронными устройствами. Данная установка может быть использована для практического применения. При необходимости в устройстве может быть предусмотрена возможность установки звуковой, световой сигнализации, а также передачи сигнала тревоги по сотовой связи.

2. На основе мониторинга ширины отрывной трещины скального массива исследована ее динамика в течение полутора лет. Установлена зависимость ширины трещины от сезонной годовой температуры атмосферы с отрицательным коэффициентом корреляции 0,78. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины за период 365 сут с 18.08.2020 по 18.08.2021 составила 4570 мкм.

3. Обратимый характер изменения ширины трещины за годовой период наблюдений, а также отсутствие тренда в ряде данных измерений за весь период наблюдений позволяет полагать, что скальный массив на данном этапе не испытывает динамику, связанную с наклоном в сторону его предполагаемого падения. Однако на графике в отдельные периоды наблюдаются скачкообразные изменения большой амплитуды 1500–2500 мкм, природу которых предстоит еще выяснить. Это предполагает проведение дальнейших исследований, например, наклонметрических и сейсмометрических.

Литература

1. Бондырев И.В., Церетели З.Д., Али Узун, Заалишвили В.Б. Оползни Южного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2014. – №4. – С. 105–123.
2. Дубянский А.И., Зайцев С.В., Силкин К.Ю. Поверхностные волны сейсмических событий в условиях Воронежского кристаллического массива. // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геофизика. – 2005. – №1. – С. 221–225.
3. Заалишвили В.Б., Невский Н.И., Невский Л.Н., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Кануков А.С., Шепелев В.Д. Мониторинг опасных и техногенных процессов РСО-Алания. // Геология и геофизика Юга России. – 2013. – №1. – С. 17–27.
4. Зайцев А.С., Костюков Е.А. Инженерная сейсморазведка и сейсмометрия конструкций зданий и сооружений. // Инженерные изыскания. – 2012. – №11. – С. 16–19. ISSN1997-8650
5. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Идармачев И.Ш. Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 250 с.
7. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Теплофизические свойства вещества Земли. // Учебное пособие МГУ. – 2011. – 67 с.
8. Попов М.Г., Попова О.Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №2. – С. 152–166. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006
9. Рагозин Н.А., Федотов А.С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 29–34. ISSN1997-8650

10. Bottelin P., Levi C., Baillet L., Jongmans D., Gueguen P. Modal and thermal analysis of les arches unstable rock column (vercors massif, french alps). // *Geophysical Journal International*. – 2013. – Vol. 194. – pp. 849–858. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt046>
11. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the package emmango. // *Quaternary Science Journal*. – 2019. – Vol. 68(1). – pp. 29-46.
12. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2021. – Vol. 46. No.2. – pp. 417–429. DOI:10.1002/esp.5034
13. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. // *Landslides* 15. – 2018. – pp. 1631-1644.
14. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. // *Engineering Geology*. – 2010. – Vol. 116(3). – pp. 311-322.
15. D'Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. // *Natural Hazards and earth system Sciences*. – 2016. – Vol. 16(3). – pp. 719-735. DOI:10.5194/nhes-16-719-2016
16. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the subalpine ranges (French alps). // *Engineering Geology*. – 2006. – Vol. 86. – pp. 256-270. DOI:10.1016/j.enggeo.2006.05.009
17. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (western alps, france). // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2010. – Vol. 115(F4). – pp. 40-43. DOI:10.1029/2009/JF001606
18. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimations subsurface using microtremors on the ground surface. // *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. – 1989. – Vol. 30. – pp. 25-33.
19. Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. // *Seismological Press. Beijing*. – 1993. – pp. 319–327.
20. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A. On the question of influence of remote earthquakes on seismicity. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2013. – Vol. 49. No.4. – pp. 474–487.
21. Stock G.M., Collins B.D., Santaniello D.J., Zimmer V.L., Wiczorek G.F., Snyder J.B. Historical rock falls in Yosemite national park. // *U.S. Geophysical Survey Data Series*. – 2013. – Vol. 746. – p. 17.
22. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., de Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonaomi Y. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. // *Geomorphology*. – 2020. – Vol. 351. – pp. 106933.
23. Weber S., Fah D., Beutel J., Faillettaz J., Gruber S., Vieli A. Ambient seismic vibrations in steep bedrock permafrost used to infer variations of ice-fill in fractures. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2020. – Vol. 501. – pp. 119–127.
24. Welch P.D. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. – 1967.

References

1. Bondyrev I.V., Tsereteli E.D., Uzun Ali, Zaalishvili V.B. Landslides of the Southern Caucasus. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2014. No.4. pp. 105–123. (In Russ.)
2. Dubyansky A.I., Zaitsev S.V., Silkin K.Yu. Surface waves of seismic events in the conditions of the Voronezh crystalline massif. In: *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2005. No.1. pp. 221–225. (In Russ.)

3. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Nevsky L.N., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Kanukov A.S., Shepelev V.D. Monitoring of hazardous natural and technogenic processes on the territory of RNO-Alania. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2013. No.1. pp. 17–27. (In Russ.)
4. Zaitsev A.S., Kostyukov E.A. Engineering seismics and seismometry of constructions of buildings and structures. *Engineering survey*. 2012. No. 11. pp. 16–19. (In Russ.)
5. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Idarmachev I.Sh. Seismometric monitoring of an unstable rock mass in the Gunib region of Dagestan (Northern Caucasus). *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006. (In Russ.)
6. Kuhlning H. Reference-book on physics. Moscow. Mir, 1985. 250 p. (In Russ.)
7. Petrulin G.I., Popov V.G. Thermophysical properties of the matter of the Earth. Reference-book of Moscow State University. 2011. 67 p. (In Russ.)
8. Popov M.G., Popova O.V. The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021. Vol. 11. No.2. pp. 152–166. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006 (In Russ.)
9. Ragozin N.A., Fedotov A.S. Possibilities of multichannel seismic prospecting data processing. *Engineering survey*. 2012. No. 11. pp. 29–34. (In Russ.)
10. Bottelin P., Levi C., Baillet L., Jongmans D., Gueguen P. Modal and thermal analysis of les arches unstable rock column (vercors massif, french alps). *Geophysical Journal International*. 2013. Vol. 194. pp. 849–858. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt046>
11. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the package emmangeo. *Quaternary Science Journal*. 2019. Vol. 68. Issue 1. pp. 29–46.
12. Dietze M., Krautblatter N., Illien L., Hovius N. Seismic constraints on rock damaging related to a failing mountain peak: the Hochvogel, Allgau. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2021. Vol. 46. No.2. pp. 417–429. DOI: 10.1002/esp.5034.
13. Dixon N., Smith A., Flint J.A., Kyanna R., Clark B., Andjelkovich M. An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. *Landslides* 15. 2018. pp. 1631–1644.
14. Di Maio C., Vassallo R., Pascale S., Sdao F. Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian southern Apennines. *Engineering Geology*. 2010. Vol. 116. Issue 3. pp. 311–322.
15. D'Amato J., Hantz D., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and earth system Sciences*. 2016. Vol. 16. Issue 3. pp. 719–735. DOI: 10.5194/nhes-16-719-2016.
16. Frayssines M., Hantz D. Failure mechanisms and triggering in calcareous cliffs of the sub-alpine ranges (French Alps). *Engineering Geology*. 2006. Vol. 86. pp. 256–270. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.05.009.
17. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2010. Vol. 115. Issue F4. pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.
18. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimations subsurface using micro-tremors on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*. 1989. Vol. 30. pp. 25–33.
19. Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. *Seismological Press. Beijing*. 1993. pp. 319–327.
20. Sobolev G.A., Zakrzhevskaya N.A. On the question of influence of remote earthquakes on seismicity. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2013. Vol. 49. No 4. pp. 474–487.
21. Stock G.M., Collins B.D., Santaniello D.J., Zimmer V.L., Wiczorek G.F., Snyder J.B. Historical rock falls in Yosemite national park. *U.S. Geophysical Survey Data Series*. 2013. Vol. 746. p. 17.

22. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., de Preux A., Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T., Bonaomi Y. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*. 2020. Vol. 351. pp. 106933.

23. Weber S., Fah D., Beutel J., Faillettaz J., Gruber S., Vieli A. Ambient seismic vibrations in steep bedrock permafrost used to infer variations of ice-fill in fractures. *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 501. pp. 119–127.

24. Welch P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967.