

УДК 550.3

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Оригинальная статья

Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков

Ш.Г. Идармачев 

Институт геологии ДФИЦ РАН, Россия, 367010, г. Махачкала,
ул. Ярагского, 75, e-mail: idarmachev46@mail.ru

Статья поступила: 08.11.2024, доработана: 14.02.2025, принята к публикации: 17.02.2025

Резюме: Актуальность работы. Крупные обвалы скальных склонов играют ключевую роль не только в преобразовании ландшафтов в долгосрочном плане, но и представляют угрозу населенным пунктам и инфраструктуре хозяйственной деятельности человека. Механизмы обвальных процессов изучаются в мире многими геологами и геофизиками, для этого используются различные методы, как дистанционно-зондирования, так и методы, предусматривающие использование датчиков, установленных непосредственно на исследуемом участке. Важным моментом исследований потенциально обвальных массивов является изучение физических процессов, связанных с механизмом образования трещин в горных породах, деформаций, аномальных наклонов, происходящих перед обвалом. Для этого применяются различные методы мониторинга, например, сейсмометрические, деформационные, наклонметрические и др. **Целью** исследований является создание системы для мониторинга, позволяющей осуществить контроль над состоянием неустойчивых горных массивов с помощью высокоточных непрерывных наблюдений за изменением ширины трещин. **Методика исследований.** Особенность разработки – полная автоматизация измерений с помощью персонального компьютера и GSM-модема связи. Для измерения изменения размеров трещин используется резистивный датчик, сопряженный с 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем марки ЛА-50USB и ПК, программа которого производит осреднение данных для каждого часа и раз в сутки отправляет таблицу данных за 24-часовой период автоматически получателю по электронной почте. Точность измерений линейного датчика составляет ± 10 мкм. **Результаты** синхронных измерений ширины трещины на неустойчивом скальном массиве циферблатным и резистивным датчиками перемещения показывают совпадение общего тренда в сторону ее расширения до 2000 мкм. Методом непрерывной регистрации с электронным датчиком получена запись кратковременного аномального изменения ширины трещины, имеющего ступенчатую форму амплитудой 500 мкм. Природа данной аномалии неизвестна. На другом массиве с вертикальными трещинами установлено наличие суточного хода ширины трещины, связанного с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой воздуха. В период нагревания поверхности скального массива солнечной радиацией, начиная от 10 ч до 13 ч, наблюдается резкое увеличение ширины трещины.

Ключевые слова: термические напряжения, резистивный датчик линейного перемещения, солнечная радиация, сейсмодатчики, циферблатный микрометр.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданию Института геологии ДФИЦ РАН (FMSW-2085-0009).

Для цитирования: Идармачев Ш.Г. Система непрерывного мониторинга параметров трещин в горном массиве на основе резистивных датчиков. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 82-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Original paper

The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors

S.G. Idarmachev 

Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences,
75 M. Yaragskogo Str., Makhachkala 367010, Russian Federation,
e-mail: idarmachev46@mail.ru

Received: 08.11.2024, revised: 14.02.2025, accepted: 17.02.2025

Abstract: Relevance. Large collapses of rocky slopes play a key role not only in the transformation of landscapes in the long term, but also pose a threat to human settlements and the infrastructure of human economic activity. The mechanisms of collapse processes are studied by many geologists and geophysicists in the world, using various methods for this, both remote sensing and sensors installed directly at the site under study. A particularly important point in the research of potentially collapsing massifs is the study of physical processes related to the mechanism of cracks formation in rocks, deformations, and abnormal slopes occurring before the collapse. Various monitoring methods are used for this purpose, for example, seismometric, deformation, tilt, etc. **The aim** of the research is to create a monitoring system that allows monitoring the condition of unstable mountain ranges through high-precision continuous monitoring of changes in the width of cracks. **Methodology.** A special feature of the development is the complete automation of measurements using a personal computer and GSM communication modem. To measure the change in crack size, a resistive sensor is used, coupled with a 16-bit analog-to-digital converter of the LA-50USB brand and a PC, the program of which averages the data for each hour and automatically sends a 24-hour data table to the recipient by e-mail once a day. The measurement accuracy of the linear sensor is ± 10 microns. **The results** of synchronous measurements of the crack width on an unstable rock mass by dial and resistive displacement sensors show a coincidence of the general trend towards its expansion of 2000 microns. By the method of continuous recording with an electronic sensor, a recording of a short-term abnormal change in the crack width, having a stepped shape with an amplitude of 500 microns, was obtained. The nature of this anomaly is unknown. On another massif with vertical cracks, the presence of a diurnal course and crack width associated with thermal stresses in the rock massif caused by solar radiation and atmospheric temperature has been established. During the period of heating of the rock mass surface by solar radiation, from 10 h to 13 h, there is a sharp increase in the crack width.

Keywords: thermal stresses, resistive linear displacement sensor, solar radiation, seismic sensors, dial micrometer.

Acknowledgements: The work was carried out according to the state assignment of the Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences (FMSW-2085-0009).

For citation: Idarmachev Sh.G. The system of continuous monitoring of parameters of cracks in a mountain range on the basis of resistive sensors. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 82-91. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.66.007

Введение

Внезапность времени обрушения делает оползни и обвалы не только опасными, но и труднопредсказуемыми с точки зрения механизмов разрушения пород. Событию предшествует фаза подготовки, во время которой комплекс внутренних

и внешних процессов приводит массив горных пород в состояние неустойчивости, делая его восприимчивым к пусковым механизмам, таким как осадки, сейсмическое сотрясение грунта, колебания силы ветра и циклы замерзания-оттаивания. Краткий обзор триггерных механизмов рассмотрен в работе [Dietze et al., 2021]. В то же время множество других факторов, связанных с физико-механическими свойствами различных пород, влияющих на фазу подготовки процесса их разрушения, вносит свои существенные коррективы [Leith et al., 2014; Kemeny, 2003; Frayssines, Hantz, 2006; D'Amato et al., 2016; Идармачев и др., 2022]. Классическим подходом к изучению процессов разрушения пород является долгосрочный мониторинг, осуществляемый с помощью периодической фиксации изображений, дистанционного зондирования лазерными приборами или точечными измерениями с помощью специальных датчиков на участках с известной или ожидаемой активностью [Collins et al., 2018a; Di Maio et al., 2010; Dixon et al., 2018; Levy et al., 2010; Walter et al., 2020].

Для исследования опасных геологических процессов все чаще применяются сейсмические методы наблюдений. Сейсмические датчики могут регистрировать движение грунта, вызванное процессами, происходящими на поверхности земли или вблизи нее. В целом, сейсмические сети могут обнаруживать активность движения пород, определять координаты, изучать и делать выводы о кинетических характеристиках процесса, исследовать эволюционные процессы неустойчивости склонов [Dietze, 2019; Burtin et al., 2014; Larose et al., 2015; Идармачев и др., 2021], включая отслеживание движения масс в пространстве [Burtin et al., 2016; Cook et al., 2018]. В последние годы начали применять точечные методы наблюдений с применением деформационных датчиков [Walter et al., 2020] и сейсмических датчиков [Dietze et al., 2021], установленных непосредственно на объекте исследований. Однако ни один из этих подходов не может обеспечить детальное зондирование всего объема пород с помощью «точечного измерения». Для более полного понимания данного вопроса необходим геофизический мониторинг с достаточно большим количеством задействованных датчиков, позволяющих представить развитие процесса в большом объеме горных пород в режиме реального времени.

В настоящей работе приведены результаты, полученные с помощью электронного датчика для измерения относительного изменения длины, например, ширины трещины, сопряженного с персональным компьютером с дистанционным доступом к данным измерений. Для апробации аппаратной части проекта был выбран горный массив над населенным пунктом Гуниб (Дагестан), на котором Институт геологии ДФИЦ РАН проводит режимные наблюдения. Измерения проводятся на скальном массиве, отделенном от основной части скалы вертикальной трещиной. Ширина трещины в различных местах меняется от 1,5 м до 2,5 м. Ширина ее на месте, где установлены датчики, составляет 1,987 м. Датчиком линейного перемещения служит механический циферблатный микрометр, закрепленный на основной части скалы. Для связи микрометра с подвижной частью скального массива используется перекинутая через трещину вольфрамовая проволока, связанная жестко с микрометром [Идармачев и др., 2022]. При повторных измерениях отсчет изменения ширины трещины проводится относительно первого значения измерений. Погрешность измерений не превышает ± 10 мкм. Результаты измерений за период 2020–2024 гг.

показали увеличение ширины трещины на 12000 мкм. Вариации годового периода коррелируют с температурой воздуха.

Метод исследований

В качестве электронного микрометра используется резистивный датчик линейного перемещения китайского производства марки KTR 50, закрепленный рядом с циферблатным датчиком. Процесс измерения происходит следующим образом, на крайние контакты потенциометра подключается источник постоянного тока, а с одного крайнего контакта и со среднего подвижного контакта измеряется падение напряжения на резисторе, которое пропорционально линейному смещению штока датчика. Полное электрическое сопротивление датчика равно 4,78 кОм. Заявленная в характеристике датчика точность измерений при использовании источника питания 24 В составляет ± 10 мкм. Калибровка датчика производилась следующим образом. Мультиметром измеряется изменение напряжения при перемещении штока на 10000 мкм, при этом подвижная часть резистора располагается в среднем положении. Коэффициент пропорциональности между электрическим напряжением U (В) и смещением L (мкм) определяется по реальным измеренным значениям из графика, приведенного на рисунке 1. На нем приведены результаты синхронных измерений циферблатным и электронным датчиками за период 08.09.2024–27.10.2024. На графиках видно удовлетворительное сходство между ними, а также наличие тренда. За этот период по данным циферблатного датчика изменение ширины трещины составило 2000 мкм, а по резистивному – 0,19 В.

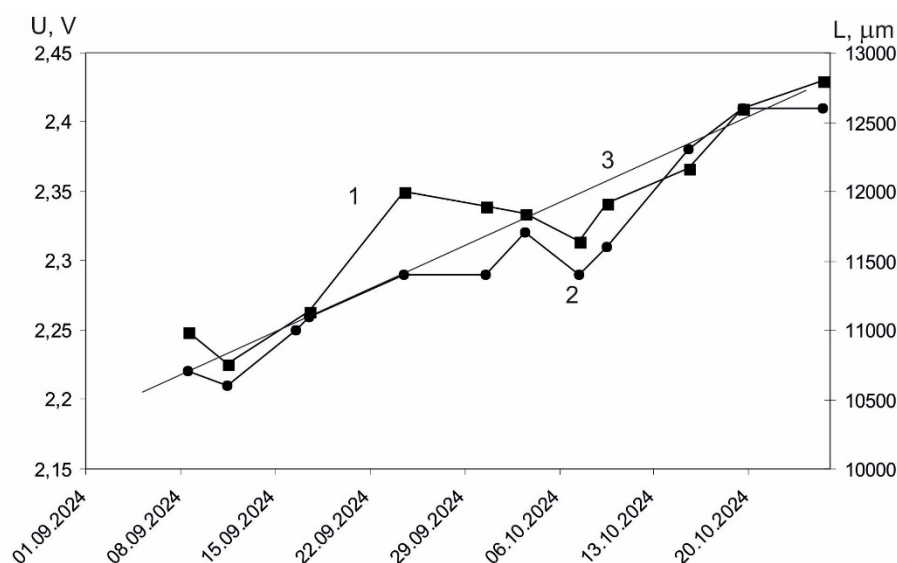


Рис. 1. Графики линейных датчиков циферблатного (1) и электронного (2) на массиве Верхний Гуниб; линия тренда (3) /
Fig. 1. Graphs of linear dial (1) and electronic (2) sensors on the Upper Gunib massif; trend line (3)

Непрерывная регистрация электронным датчиком осуществляется 16 разрядным аналого-цифровым преобразователем ЛА–50USB производства ОАО «Руднев-Шиляев», сопряженного с ПК. Процесс измерений и обработка данных осуществляется разработанной нами программой. Измерения осуществляются непре-

рывно с частотой 100 Гц, затем вычисляется среднее значение за 1 час и записывается на жесткий диск. Осреднение числа измеренных 36×10^4 значений для каждого часа позволяет увеличить точность измерений на порядок по сравнению с мультиметром. Среднее квадратическое отклонение часовых измерений не превышает ± 10 мкм. Таблица данных за суточный период в 12 часов по московскому времени автоматически отправляется по электронной почте получателю. В режиме реального времени можно получить доступ к текущим данным измерений по удаленному доступу ПК. Система позволяет осуществлять сбор данных от 16 различных датчиков. На рисунке 2 показан фрагмент аномального изменения ширины трещины, полученный в течение 3 суток в октябре 2023 г. Изменение произошло в течение 3 часов. Амплитуда смещения составила 500 мкм. Природа данной аномалии неизвестна.

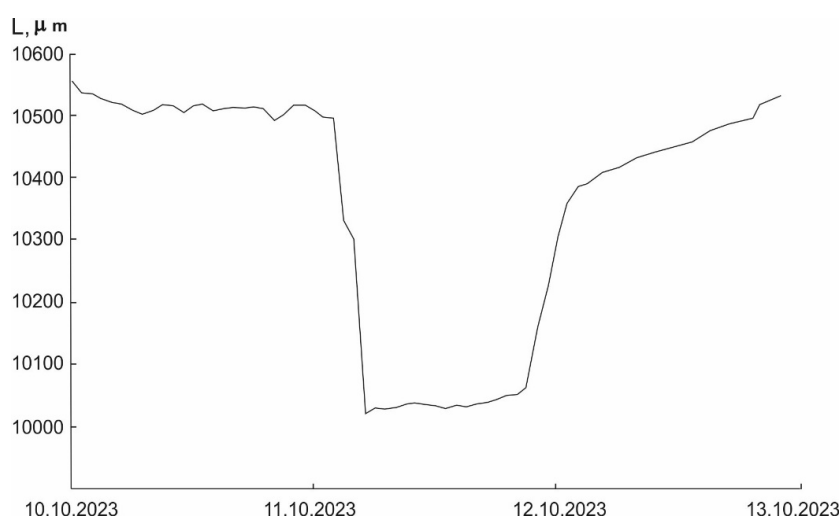


Рис. 2. Фрагмент аномального изменения ширины трещины /

Fig. 2. Fragment of anomalous crack width variation

Результаты работы

С помощью электронного датчика в том же районе на другом массиве, представляющего опасность обрушения, было исследовано суточное изменение ширины вертикальной трещины (рис. 3). Высота массива равна 12 м. Покрытая трещинами поверхность скального массива представлена пластами, которые отделяются от основной части скалы вертикальными трещинами. Механизм отслаивания пород связан не только с метеофакторами, но и с циклическими суточными изменениями температуры поверхности скалы от радиационного нагрева солнца. В высокогорных районах суточный перепад температуры воздуха может достигать $20\text{--}30^\circ\text{C}$, и тем самым создавать термические напряжения в породе, которые приводят к деформациям пластов и отслаиванию их от скалы. Процессы развития температурных напряжений в породе, предшествующие ее разрушению, изучаются в различных странах многими авторами [Aldred et al., 2016; Bakun-Mazor et al., 2020, 2013; Collins et al., 2018b; Collins et al., 2019; Gunzburger et al., 2005; Hall, Thorn, 2014]. На данном историческом этапе природа фазы подготовки непосредственно перед разрушением породы остается пока не до конца изученной.



Рис. 3. Фото неустойчивого массива с вертикальными отрывными трещинами /

Fig. 3. Photo of unstable massif with vertical breakaway cracks

На территории Гуниба минимальная температура воздуха в январе составляет -7°C , а максимальная достигает в июле 25 и более градусов. Данные температуры воздуха взяты на метеостанции «Гуниб».

На самом широком месте раскрытия трещины был установлен резистивный датчик для проведения суточных измерений. Относительные значения ширины трещины и суточный ход температуры воздуха, полученные в сентябре 2024 г., приведены на рисунке 4. Суточные колебания температуры воздуха составляют 10°C . Минимальное значение температуры воздуха наблюдается рано утром в 4–6 ч по московскому времени, а максимум – в 13 ч.

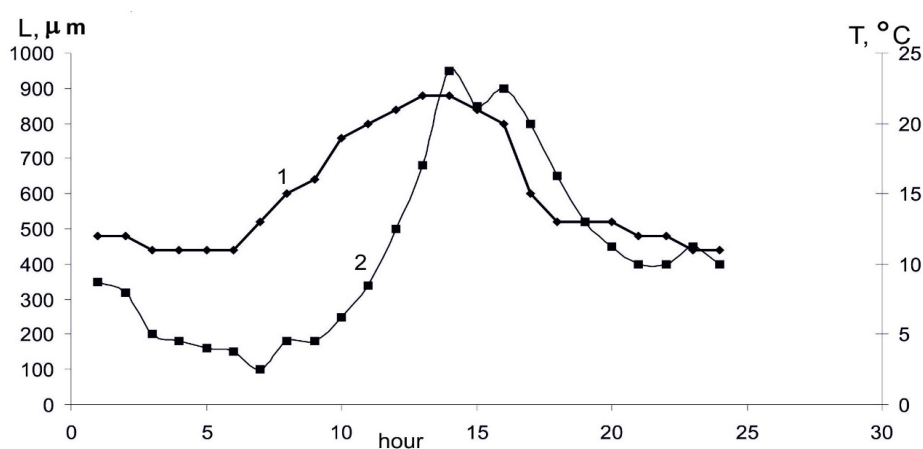


Рис. 4. Суточные графики изменения температуры воздуха (1) и ширины трещины скального массива (2) в сентябре 2024 г. /

Fig. 4. Daily plots of atmospheric temperature in September 2024 (1) and changes in the width of the rock massif crack (2)

Изменение ширины трещины коррелирует с температурой воздуха с некоторым отставанием по фазе на 1–2 ч. Это связано с тем, что для нагрева скалы требуется некоторое время. Максимальная амплитуда изменения ширины трещины составляет 850 мкм. В данном случае такое сравнение не совсем корректно, так как температура нагрева поверхности скалы от солнечной радиации будет выше температуры воздуха даже в ночное время. Такую разницу в ходах кривых можно видеть на рисунке 4 после 10 ч; с повышением интенсивности солнечной радиации происходит стремительный рост ширины трещины. В природе наблюдаются случаи взрывного отрыва поверхности скальных массивов при сильном нагреве от солнечной радиации [Walter et al., 2020]. Таким образом, солнечная радиация усиливает процесс нагревания горных пород, приводит к термическим напряжениям: увеличение температуры приводит к их расширению, а остывание – к сжатию. Образование в породе трещин различного ранга в конечном итоге приводит к разрушению породы.

Относительно данного массива следует отметить, что он представляет реальную угрозу обрушения, не только от влияния природных процессов, но и вследствие того, что он расположен на дороге «Махачкала - Верхний Гуниб». Под ним находится автомобильная дорога «висячей» конструкции, которая состоит из закрепленных в скале горизонтальных рельсов. Интенсивное автомобильное движение, в том числе грузовиков Камаз весом до 20 т, вызывает вибрацию массива, тем самым создавая дополнительные условия для снижения его устойчивости. Поэтому проводимые нами исследования по созданию системы непрерывного контроля за устойчивостью горных пород имеют не только научное, но и практическое значение по обеспечению безопасности населенного пункта Гуниб.

Выводы

1. Разработана система для мониторинга опасных геологических природных процессов с целью изучения пусковых механизмов неустойчивых массивов горных пород, приводящих к обвалам. Одна такая система позволяет подключать до 16 электрических датчиков линейного перемещения, установленных на трещинах различной ширины. Полевые испытания показали высокие метрологические характеристики резистивного датчика линейного перемещения. Погрешность измерений не превышает ± 10 мкм. Программная реализация измерений позволяет отправлять таблицу среднечасовых данных раз в сутки по электронной почте, а также получать удаленный доступ к данным в режиме реального времени.

2. Результаты измерений ширины трещины на неустойчивом скальном массиве циферблатным и электронным датчиками перемещения показывают наличие их синхронного хода. Методом непрерывной регистрации с электронным датчиком получена кратковременная запись аномального изменения ширины трещины неизвестной природы, имеющего ступенчатую форму.

3. Экспериментальными измерениями установлен суточный ход изменения ширины трещины, связанный с термическими напряжениями в скальном массиве, вызванными солнечной радиацией и температурой воздуха.

Литература

1. Идармачев Ш.Г., Черкашин В.И., Идармачев И.Ш. Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кав-

каз). // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. № 2. – С. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006.

2. 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. – Т. 12. № 2. – С. 78–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.70.64.006.

3. Aldred J., Eppes M.C., Aquino K., Deal R. et al. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2016. – Vol. 41. Issue 5. – pp. 603–614.

4. Bakun-Mazor D., Keissar Y., Feldheim A., Detournay C., Hatzor Y.H. Thermally-induced wedging–ratcheting failure mechanism in rock slopes. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2020. – Vol. 53. – pp. 2521–2538.

5. Bakun-Mazor D., Hatzor Y.H., Glaser S.D., Carlos Santamarina J. Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2013. – Vol. 61. – pp. 196–211.

6. Burtin A., Hovius N., McArdeall B.W., Turowski J.M., Vergne J. Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. // *Earth Surface Dynamics*. – 2014. – Vol. 2. – pp. 21–33. DOI: 10.5194/esurf-2-21-2014.

7. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. // *Earth Surface Dynamics*. – 2016. – Vol. 4. – pp. 285–307. DOI: 10.5194/esurf-4-285-2016.

8. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. // *Nature communications*. – 2018a. – Vol. 10. No. 762. – pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-017-02728.1.

9. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C. Relaxation response of critically stressed macroscale surficial rock sheets. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – Vol. 52. – pp. 5013–5023.

10. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C., Lewis S.W., Corbett S.C., Smith J.B. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. // *Nature Communications*. – 2018b. – Vol. 9. Art. No. 762.

11. Cook K.L., Andermann C., Gimbert F., Adhikari B.R., Hovius N. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. // *Science*. – 2018. – Vol. 362. Issue 6410. – pp. 53–57. DOI: 10.1126/science.aat4981.

12. 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.

13. 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.

14. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. // *Quaternary Science Journal*. – 2019. – Vol. 68. Issue 1. – pp. 29–46.

15. 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.

16. 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*. – 2018. – Vol. 15. – pp. 1631–1644.

17. 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.

18. Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope

(France). // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2005. – Vol. 42. – pp. 331–349.

19. Hall K., Thorn C.E. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products. // *Geomorphology*. – 2014. – Vol. 2006. – pp. 1–13.

20. Kemeny J. The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2003. – Vol. 36. – pp. 27–38. DOI: 10.1007/s00603-002-0032-2.

21. Larose E., Carriere S., Voisin C., Bottelin P., Baillet L. et al. Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – Vol. 116. – pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.

22. Leith K., Moore J.R., Amann F., Loew S. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – Vol. 119. – pp. 594–615. DOI: 10.1002/2012JB009801.

23. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (Western Alps, France). // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2010. – Vol. 115(F4). – pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.

24. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., De Preux A. et al. 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.

References

1. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Idarmachev I.Sh. Seismometric monitoring of an unstable rock massif in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 74–86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006. (In Russ.)

2. Idarmachev Sh.G., Cherkashin V.I., Aliyev I.A., Idarmachev I.Sh. Studying the dynamics of the crack width of a potentially collapsing rock mass with a string sensor on Mount Gunib (Dagestan). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 78–88. DOI:10.46698/VNC.2022.70.64.006. (In Russ.)

3. Aldred J., Eppes M.C., Aquino K., Deal R. et al. The influence of solar-induced thermal stresses on the mechanical weathering of rocks in humid mid-latitudes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2016. Vol. 41. Issue 5. pp. 603–614.

4. Bakun-Mazor D., Keissar Y., Feldheim A., Detournay C., Hatzor Y.H. Thermally-induced wedging–ratcheting failure mechanism in rock slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. Vol. 53. pp. 2521–2538.

5. Bakun-Mazor, D., Hatzor Y.H., Glaser S.D., Carlos Santamarina J. Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 61. pp. 196–211.

6. Burtin A., Hovius N., McArdeall B.W., Turowski J.M., Vergne J. Seismic constraints on dynamic links between geomorphic processes and routing of sediment in a steep mountain catchment. *Earth Surface Dynamics*. 2014. Vol. 2. pp. 21–33. DOI: 10.5194/esurf-2-21-2014.

7. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. *Earth Surface Dynamics*. 2016. Vol. 4. pp. 285–307. DOI: 10.5194/esurf-4-285-2016.

8. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature communications*. 2018a. Vol. 10. No. 762. pp. 1–12. DOI: 10.1038/s41467-017-02728.1.

9. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C. Relaxation response of critically stressed macroscale surficial rock sheets. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. Vol. 52. pp. 5013–5023.

10. Collins B.D., Stock G.M., Eppes M.C., Lewis S.W., Corbett S.C., Smith J.B. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature Communications*. 2018b. Vol. 9. Art. No. 762.

11. Cook K.L., Andermann C., Gimbert F., Adhikari B.R., Hovius N. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. *Science*. 2018. Vol. 362. Issue 6410. pp. 53–57. DOI: 10.1126/science.aat4981.
12. 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.
13. 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.
14. Dietze M. Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. *Quaternary Science Journal*. 2019. Vol. 68. Issue 1. pp. 29–46.
15. 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.
16. 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*. 2018. Vol. 15. pp. 1631–1644.
17. 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.
18. Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2005. Vol. 42. pp. 331–349.
19. Hall K., Thorn C.E. Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: an attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*. 2014. Vol. 2006. pp. 1–13.
20. Kemeny J. The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2003. Vol. 36. pp. 27–38. DOI: 10.1007/s00603-002-0032-2.
21. Larose E., Carriere S., Voisin C., Bottelin P., Baillet L. et al. Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? *Journal of Applied Geophysics*. 2015. Vol. 116. pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.
22. Leith K., Moore J.R., Amann F., Loew S. In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2014. Vol. 119. pp. 594–615. DOI: 10.1002/2012JB009801.
23. Levy C., Baillet L., Jongmans D., Mourot P., Hantz D. Dynamic response of the chamousset rock column (Western Alps, France). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2010. Vol. 115(F4). pp. 40–43. DOI: 10.1029/2009/JF001606.
24. Walter F., Amann S., Kos A., Kenner R., Phillips M., De Preux A. et al. 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.