УДК 550:34

DOI: [10.46698/VNC.2021.49.57.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.49.57.006)

Оригинальная статья

Сейсмометрический мониторинг неустойчивого скального массива в Гунибском районе Дагестана (Северный Кавказ)

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

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

Статья поступила: 15.04.2021, после рецензирования: 24.05.2021, принята к публикации: 04.06.2021

Резюме: Актуальность работы. Предгорная и горная часть территории Дагестана подвержена опасным геологическим процессам, в том числе и обвалам, что представляет определенную угрозу в местах проживания населения и соответствующей инфраструктуре (дороги, линии электропередач, газопроводы и др.). Вопрос контроля за опасными участками является очень важным и необходимым, поскольку управлять обвалами больших размеров человек не может, а вмешательство в естественный ход его развития представляется весьма проблематичным. Для минимизации ущерба необходим прогноз, с максимально допустимой точностью определяющий состояние предполагаемого обвала и зону возможного поражения. **Цель работы** заключается в разработке новых подходов, используя геофизические наблюдения, направленные на познание исходной генетической сущности обвальных массивов, и на основе изучения полученных результатов выработать надёжные способы прогнозирования катастрофических событий. **Метод исследований.** Сейсмические датчики могут регистрировать колебания не только земной поверхности, но и отслеживать характерные особенности, связанные с состоянием отдельных массивов. На скорость распространения сейсмических волн влияет ряд факторов, таких как температура породы, влажность, механические напряжения и многие другие параметры. По изменениям сейсмических параметров горной породы можно отслеживать неустойчивое состояние скального массива, определить признаки, характерные для ускорения обвального процесса, накопления и снятия упругих напряжений в массиве, указывающих на растрескивание горных пород. Эти данные представляют важную информацию о развитии неустойчивости крутых склонов в сторону катастрофического разрушения. **Результаты работы.** Впервые на Кавказе исследованы кинематические параметры потенциально обвального скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия на крутом склоне, представляющего опасность обрушения на районный центр Гуниб в Дагестане. Определены количественные и качественные характеристики от различных внешних динамических воздействий, микросейсм, вызванных штормовыми циклонами в океане, землетрясениями. В рамках поставленной задачи были определены собственные частоты и амплитуды колебаний скального массива, а также его реакция на колебания удаленного сейсмического события.

Ключевые слова: сейсмометр, микросейсм, землетрясения, магнитуда, эпицентр, стоячие океанические волны, волны Лява и Релея, модулированные колебания.

Для цитирования: 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. 11 (2): 74 – 86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006.

Благодарности: Магомедову Сурхаю Ахмедхановичу за помощь, оказанную им в проведении полевых работ.

Работа выполнена по госзаданию Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКР АААА-А17-117021310201-9.

GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2021.49.57.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.49.57.006)

Original article

Seismometric monitoring of unstable rock mass in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus)

Sh. G. Idarmachev^{ID}, V. I. Cherkashin^{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: idarmachev@eandex.ru

Received: 15.04.2021, revised: 24.04.2021, accepted: 04.06.2021

Abstract: Relevance. The foothill and mountainous part of the territory of Dagestan is subject to dangerous geological processes, including collapses, which poses a certain threat in the places of residence of the population and the corresponding infrastructure (roads, power lines, gas pipelines, etc.). The issue of control over hazardous areas is very important and necessary, since a person cannot manage large landslides, and interference in the natural course of its development seems to be very problematic. To minimize damage, a forecast is required that determines, with maximum permissible accuracy, the state of the expected collapse and the zone of possible damage. **The aim of the work** is to develop new approaches, using geophysical observations aimed at understanding the initial genetic essence of landslides, and, based on the results obtained, to develop reliable methods for predicting catastrophic events. **Methods.** Seismic sensors can register vibrations not only of the earth's surface, but also track the characteristic features associated with the state of individual massifs. The speed of propagation of seismic waves is influenced by a number of factors, such as rock temperature, moisture, mechanical stress and many other parameters. By changes in the seismic parameters of the rock, it is possible to track the unstable state of the rock mass, to determine the signs characteristic of the acceleration of the landslide process, the accumulation and removal of elastic stresses in the mass, indicating rock cracking. These data provide important information about the evolution of steep slope instability towards catastrophic failure. **Results.** For the first time in the Caucasus, the kinematic parameters of a landslide rock mass, which is in unstable equilibrium on a steep slope, posing a danger of collapse on the regional center Gunib in Dagestan, have been investigated. The quantitative and qualitative characteristics of various external dynamic influences, microseisms caused by storm cyclones in the ocean, earthquakes have been determined. Within the framework of the task, the natural frequencies and amplitudes of the rock mass vibration were determined, as well as its response to the fluctuations of a distant seismic event.

Keywords: seismometer, microseisms, earthquakes, magnitude, epicenter, standing ocean waves, Love and Rayleigh waves, modulated oscillations.

For citation: Idarmachev Sh. G., Cherkashin V. I., Idarmachev I. Sh. Seismometric Monitoring of an Unstable Rock Mass in the Gunib district of Dagestan (North Caucasus). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): 74 – 86. DOI: 10.46698/VNC.2021.49.57.006.

Acknowledgments: Magomedov Surkhay Akhmedkhanovich for the help rendered to them in carrying out field works.

The work was carried out according to the state task of the Institute of Geology of the Russian Academy of Sciences No. R & D AAAA17-117021310201-9.

Введение

Обвалы – чрезвычайно опасные явления природы, требующие специфического подхода к изучению, оценке и прогнозу их проявления и развития. Как известно, причиной обвала является нарушение равновесия между сдвигающей силой тяжести и удерживающими силами. Это чаще всего связано с увеличением крутизны склона в результате подмыва его водой, ослаблением прочности пород при выветривании или переувлажнении осадками и подземными водами, воздействием сейсмических толчков и деятельностью человека.

В настоящее время геофизические методы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, где требуется определение физических параметров приповерхностной части геологической среды и протекающих в ней процессов. Одним из методов является сейсмометрия. При этом используются как активные, так и пассивные методы геофизики, например, для оценки состояния и свойств инженерных конструкций используется инженерная сейсмометрия [Зайцев, Костюков, 2012; Рогозин, Федотов, 2012; Садовский, Киринос, 1955; Карапетян, Айрапетян и др., 2019; Аракелян, Башилов и др., 2019; Мамаев, Дорофеев и др., 2019]. Сейсмодатчики, установленные в различных местах конструкции, при ударе фиксируют время пробега волн, затухание и их спектральные характеристики. По этим данным оценивают состояние и прочность конструкций, устанавливают наличие трещин и зоны предельных упругих напряжений и деформаций. В последние годы появились публикации, связанные с сейсмическим мониторингом неустойчивых скальных пород, оползней. Эти работы получили название – экологическая сейсмология [Burtin et al., 2016; Collins, Stock et. all., 2018]. В этом плане для нас интерес представляет сейсмический мониторинг на вершине горы Хохфгелль высотой 2592 м в южно-германских Альпах с помощью телеметрической сети сейсмических станций [Dietze et al., 2021]. Образование крупных трещин было зарегистрировано в конце XIX века, а с конца 1950-х годов возникло прогрессирующее сползание. В настоящее время ширина трещины на вершине достигла 4-5 м, а длина – 30 м и продолжает расширяться со скоростью нескольких миллиметров в месяц. В итоге на основе проведенных наблюдений в течение нескольких месяцев были выявлены сейсмические циклы, связанные с развитием неустойчивости склона. Накопление или снятие упругих напряжений в массиве горных пород приводит к изменению скорости сейсмических волн, увеличению излучения коротких сейсмических импульсов, указывающих на растрескивание. Эти данные представляют важную информацию о развитии динамических процессов на неустойчивых склонах горных пород в сторону катастрофического обрушения.

Объектом наших исследований является неустойчивый скальный массив над районным центром Гуниб (Дагестан) с населением более 2500 человек и представляющий опасность для вышеуказанного поселения (рис. 1). Опасный участок представляет собой вертикальный блок размером 20×50×60 м, оторванный от основного массива известняковой толщи, основание которого лежит на слое из алевролитистой глины мощностью до 1 метра. Данный блок вместе с глинистой подложкой наклонен под углом 40° в сторону обрыва. На вершине массива ширина трещины между целиком и неустойчивым блоком составляет около 2 м. Учитывая, что прочность на сжатие и сдвиг глины ниже, чем у известняков, деформация твердой части толщи горных пород будет происходить в сторону уклона по глинистой прослойке. В результате чего в вышележащем слое образуются вертикальные трещины отрыва.

Рис. 1. Вид скалы сверху (место установки сейсмометра С-5-С отмечен звездочкой) /
Fig. 1. View of the rock from above (the location of the C-5-C seismometer is marked with an asterisk)

Проникновение дождевой воды в трещины вызывает размокание глинистого слоя, на котором лежит трещина отрыва и тем самым активизирует деформацию массива. Измерения ширины трещины струнным датчиком погрешностью ± 10 мкм показали, что за период 7 месяцев трещина расширилась на 4450 мкм, или 4.45 мм.

Методы исследования

Для регистрации подвижек массива использовалась цифровая установка, состоящая из сейсмометра С – 5 – С, встроенного усилителя, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопряженного с ноутбуком. Конструктивно сейсмометр С – 5 – С представляет собой электродинамический преобразователь тока с чувствительностью рабочей катушки $C_1 = 64$ В/ (м/с), периодом собственных колебаний $T=5$ с, декрементом затухания маятника $D=3$. Диапазон амплитудно-частотной характеристики составляет 0.1-100 Гц [Гармский геофизический полигон, 1990].

Для повышения чувствительности в корпус сейсмометра встроен операционный усилитель на базе микросхемы серии КР140УД20. Диапазон измерительного канала усилителя составляет $f=0-50$ кГц, коэффициент усиления равен – 400. Чувствительность сейсмометра после подключения к усилителю составляет $C_2=25600$ В/ (м/с) или 25.6 мВ/ (мкм/с). Сейсмометр был закреплен на скале так, чтобы колебания маятника совершались поперек направления трещины, при этом допускалось, что собственные колебания скального массива будут происходить перпендикулярно трещине.

На первом этапе исследований регистрирующая аппаратура была установлена в помещении, расположенном на расстоянии 150 м от сейсмометра и подключена с помощью кабеля, натянутого над землей. Опытные измерения показали наличие больших помех в ночное время, наводимых на сигнальный провод воздушного

кабеля. Причиной наводок является возникновение разности потенциалов между поверхностью земли и проводом-антенной. Характерным свойством такого рода помех является однополярность сигнала, т. е. поверхность земли заряжена положительным потенциалом, а провод-антенна – отрицательным. В отдельных случаях амплитуда сигнала достигает 0.6-0.7 В. Земные токи возникают от разрядов молний, трения земной поверхности с атмосферой, заряженных облаков, магнитосферных и других процессов. Поэтому для удаления помех пришлось отказаться от длительных наблюдений на скальном массиве и перейти к дискретным измерениям установкой регистрирующей аппаратуры рядом с сейсмометром.

Результаты работы и их обсуждение

Для получения достоверной и необходимой информации о состоянии скального блока, а также влиянии внешних сил на его устойчивость, были использованы записи сейсмограмм, генерируемых штормовыми волнами, колебаний, вызванных механическим воздействием груза массой более 5 кг, а также под воздействием сейсмических событий.

1. Обсуждение результатов воздействия штормовых волн

После обработки данных и устранения помех была получена сейсмограмма микросейсм генерируемая гигантскими штормовыми океаническими волнами (рис. 2). Как известно, в центре циклона часто формируются гигантские стоячие волны. Область стоячих водяных волн (СВВ) генерирует периодически изменяющееся давление на дно океана, не затухающее с глубиной [Longuet Higgins, 1950; Табулевич и др., 2001]. Под влиянием этого давления в земной коре возникают слабые колебания – так называемые штормовые микросейсмы. Область стоячих водяных волн, располагающаяся в тыловой части циклона (тайфуна), составляет сотни квадратных километров. Такие колебания могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы в атмосфере, вниз – микросейсмы на дне океана. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны (синфазны). Регистрируемые на поверхности земли упругие волны имеют форму синусоидальных колебаний [Потапов и др., 1997]. Микросейсмы, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира. Например, микросейсмы от атлан-

Рис. 2. Запись штормовых микросейсм/
Fig. 2. Recording of storm microseisms

тических циклонов фиксируют не только станции, расположенные на европейском континенте, но и азиатские (в Ташкенте и Ашхабаде), сибирские (в Иркутске и Новосибирске) и многие другие. Период колебаний микросейсм может лежать в пределах 10-14 с. Чем большую площадь охватывает циклон, тем больше амплитуда и период колебаний. Микросейсм от морских штормовых волн имеют меньший период колебаний – 2-5 с и регистрируются на небольших расстояниях. Например, периоды штормовых микросейсм озера Байкал составляют $T=2-3$ с, амплитуды, записанные сетью сейсмических станций, достигают 5-10 мкм [Табулевич, 1970].

На записи, зарегистрированной на скале микросейсм, видны синусоидальные колебания с периодом $T_1=14-15$ с, вызванные штормовыми океаническими волнами, модулированные более короткопериодными колебаниями $T_2=0.87$ с, с максимальной амплитудой 0.8 мкм. Природа короткопериодных колебаний может быть связана с частотой собственных колебаний скального массива, который находится в условиях неустойчивого равновесия. В данном случае микросейсм могут служить в роли возмущающей силы, вызывающей гармонические колебания. Тогда отношение доминантной частоты к частоте возмущающей силы должно быть четное число. Для полученных по записи частот $f_2/f_1=16.0189$ практически является четным числом. Такие эффекты возбуждения собственных колебаний от возмущающей внешней силы возникают не только в геофизической среде, но и других случаях, например, при проведении диагностических исследований на металлической трубе высотой 100 м сейсмометрические наблюдения показали возникновение доминантных частот 0.01-0.5 Гц от вынуждающих переменных сил ветра [Овчаренко и др., 2012].

2. Результаты механического воздействия

На исследуемом массиве также были проведены эксперименты по возбуждению колебаний путем броска камня весом 5 кг в трещину и удара ногой об скалу. Осциллограммы записей показаны на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 видны затухающие колебания с уменьшающейся частотой. Например, в первой половине записи частота колебаний равна 68-70 Гц, а во второй половине – 46-47 Гц. Максимальная амплитуда равна 32 мкм. Также видно медленное отклонение записи от начального положения на 8 мкм. Продолжительность отклонения равна 0.8 с. Данное отклонение записи не может быть связано с периодом собственных колебаний маятника сейсмометра $C-5-C$ ($T=5$ с). По величине период отклонения записи $T=0.8$ с сравним с периодом собственных колебаний скалы $T=0.87$ с, вызванных штормовыми микросейсмами. Эти данные подтверждают возможность возбуждения собственных колебаний скалы при слабом внешнем воздействии на нее ударом камня весом 5-6 кг, брошенного с высоты 9 м.

По характеру записи колебаний на рисунке 3 можно сделать вывод об уменьшении частоты по мере удаления волны от сейсмометра – эффект Доплера. На записи при ударе ногой по скале (рис. 4) зарегистрированы колебания частотой 93-100 Гц. Более высокая частота колебаний от удара ногой об скалу связана с более близким расположением источника колебаний, чем в случае броска камня в трещину. Однако в этом случае нет медленного отклонения на записи сигнала как на рисунке 3. Амплитуда колебаний от удара ногой по скале составляет 4.4 мкм, т.е. меньше амплитуды колебаний от удара броска камня в 7.3 раз. Эти записи показывают высокую чувствительность измерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать колебания горных пород, в данном случае крепких известняков, имеющих кристал-

Рис. 3. Запись колебаний сейсмометра после броска камня в трещину глубиной 9 м /
Fig. 3. Recording of the seismometer vibrations after throwing a stone into a crack 9 m deep

Рис. 4. Запись колебаний сейсмометра от удара ногой об скалу на расстоянии 3 м от сейсмометра /
Fig. 4. Recording of the seismometer vibrations from a kick on a rock at a distance of 3 m from the
seismometer

лическую структуру, а форма колебаний имеет резонансный характер – подобно звучанию колокола.

3. Результаты воздействия землетрясений

Довольно часто при землетрясениях на крутых склонах гор активизируются обвалы, оползни. Некоторые из них приводят к человеческим жертвам. Грандиозный обвал на Памире в результате землетрясения 1911 г. перегородил долину реки Муграб, образовав плотину шириной 5 км и высотой 600 м, вследствие чего возникло Сорезское озеро площадью более 80 тыс. км² и глубиной 500 м. Во время Хаитского землетрясения в Таджикистане 1949 г. произошли крупные обвалы и осыпи, а селение Хаит оказалось полностью погребенным под оползнем. Сильное землетрясение в Дагестане в мае 1970 г. магнитудой $M=6,6$ [Арефьев, 2003] привело к большому количеству обвалов в каньоне р. Сулак [Акаев и др., 1998]. В одном из них произошел обвал скального массива над селением Зубутли с человеческими жертвами. Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 25 км от населенного пункта. Интенсивность сотрясений земной поверхности в эпицентре составляла 9 баллов по шкале MSK – 64, что заставило пересмотреть карту сейсмического районирования территории Дагестана. Интенсивность колебаний земли в с. Гуниб, находящегося на расстоянии 77 км от эпицентра землетрясения,

Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений в интервале магнитуд 3,0-5,4, зарегистрированных в радиусе 150 км от с. Гуниб [www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#].

Гуниб расположен в центре квадрата /

Fig. 5. Map of earthquake epicenters in the range of magnitude 3.0-5.4 registered within a radius of 150 km from the village of Gunib [www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#]. Gunib is located in the center of the square

составила 6 баллов [Арефьев, 2003], но крупных обвалов в данном районе не было зарегистрировано.

Сильное землетрясение – достаточно редкое явление даже для такого весьма активного региона как Кавказ [Шебалин, 1997]. На рисунке 5 показана карта эпицентров землетрясений за небольшой период 2015-2020 гг., зарегистрированных в радиусе 150 км от с. Гуниб.

В прошлом веке в густонаселенном районе Дагестана произошло три землетрясения – Дагестанское, Буйнакское и Кизилюртовское, приведших к разрушениям в населенных пунктах. Землетрясения произошли в предгорном районе на пересечении нескольких глубинных разломов. Относительно сильные землетрясения происходят также на протяжении горной цепи Главного Кавказского хребта. Центральная часть Дагестана характеризуется слабой сейсмичностью, ограниченной магнитудой $M \leq 5,0-5,4$. В эту зону попадает и Гунибский район. Однако в 2017 г. здесь произошло землетрясение $M=5,4$ на эпицентральной расстоянии 20 км от Гуниба и глубиной очага 15 км. Из этого следует, что здесь может произойти и сильное землетрясение, которое будет сопровождаться обвальными процессами.

Рис. 6. Сейсмограмма землетрясения 15.09.2020 г. /

Fig. 6. Seismogram of the earthquake of 15.09.2020

По карте сейсмического районирования ОСР – 97 (С) весь район Дагестана относится к 10 балльной зоне. Это означает, что в любом месте может произойти землетрясение силой 10 баллов за период в 5 тыс. лет, которое будет сопровождаться обвальными и другими негативными процессами. Например, обрушение исследуемого массива, нависающего над Гунибом, приведет к катастрофическим процессам с человеческими жертвами.

За последние 3 года в Гунибском районе в зоне каньона р. Кара-Койсу произошло два крупных обвала на крутых склонах гор. Природа механизма этих обвалов пока мало изучена. Обвальный процесс принадлежит к динамическим явлениям, протекающим в нелинейных диссипативных системах. Из широкого круга исследований диссипативных систем известно, что на стадии неустойчивого равновесия усиливается влияние триггерных эффектов, приводящих к динамической неустойчивости [Hill, 2008; Ott, 2002; Gomborg, Davis, 1996; Nikolaev et al., 1993; Sholz, 1990; Sobolev et al., 1993]. Вопрос о пороге внешнего воздействия достаточного для ускорения процесса неустойчивого равновесия остается открытым.

Внешними факторами триггерного воздействия могут служить климатические аномалии – проливные дожди, колебания от умеренных близких или удаленных сильных землетрясений. Известно, что сильные землетрясения магнитудой $M=9$ вызывают возникновение медленных волн Релея и Лява, способных несколько раз обогать вокруг земного шара [Рихтер, 1963]. Волны Релея вызывают смещение частиц земной поверхности по вертикали, а Лява – по горизонтали. Периоды колеблются от нескольких секунд до нескольких десятков секунд [Дубянский и др., 2005]. Амплитуды смещения могут достигать 1 см. Поверхностные волны вызывают покачивание высотных зданий амплитудой до 0,5 м; оползни, обвалы на горных склонах – возникновение трещин в грунтах, обрывы телефонных и электрических линий. Исследования авторов [Соболев, Закржевская, 2013] показывают, что поверхностные волны от сильных землетрясений на земном шаре способны влиять на сейсмический режим Камчатского региона. Наблюдалось увеличение сейсмической активности, как отклик на сильное землетрясение магнитудой $M \geq 7,5$. Из этих данных следует, что землетрясения с максимально возможной магнитудой $M \geq 8,5-9,0$ и выше, произошедшие на расстоянии 1000 км и более, могут вызвать обвальные процессы в массивах горных пород, находящихся в условиях неустойчивого равновесия.

За небольшой период сейсмометрических наблюдений на скале были зарегистрированы колебания от землетрясения, произошедшего 15.09.2020 г. на Главном Кавказском хребте магнитудой $M=3,6$ координатами эпицентра: 42.39° с. ш., 46.49°

в. д. Эпицентр землетрясения находился от Гуниба на расстоянии 43 км. Глубина очага – 15 км (www.gsras.ru/new/ssd_news.htm#). Запись данного землетрясения приведена на рисунке 6.

На сейсмограмме выделяются две волны, вначале продольная V_p продолжительностью 12 с, с максимальной амплитудой 12.6 мкм и поперечная V_s с большей амплитудой (57 мкм) и продолжительностью 20 с. Периоды колебаний обоих 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.

По многочисленным записям период колебаний афтершоков Дагестанского землетрясения лежит в пределах 0,33-1,25 с [Шебалин, 1997]. Из этого видно, что периоды колебаний, зарегистрированного нами землетрясения, выходят за рамки эпицентральных записей. Однако отдельные периоды эпицентральных записей совпадают с периодом собственных колебаний исследуемого массива горных пород и могут вызвать резонансный эффект.

В итоге следует отметить, что проведенные эпизодические наблюдения на скальном массиве не позволяют определить его спектральные временные характеристики, связанные с динамикой неустойчивого состояния, под воздействием внешних факторов. Для этого необходимо продолжить работы в направлении, как улучшения аппаратного обеспечения, так и в области методологии.

Выводы

1. Изучены кинематические параметры скального массива, находящегося в условиях неустойчивого равновесия. Установлено, что микросейсмы штормовых циклонов в океане периодом 14-15 с вызывают возникновение модулированных собственных колебаний массива периодом 0,87 с максимальной амплитудой 0,8 мкм.

2. При возбуждении упругих колебаний броском камня весом 5 кг в трещину, отделяющую исследуемый скальный массив от основного массива, состоящего из крепких известняковых пород, зарегистрированы затухающие колебания частотой 68-79 Гц максимальной амплитудой 28 мкм. Наблюдается также медленное отклонение записи от первоначального положения на 8 мкм периодом 0,8 с не связанного с периодом собственных колебаний сейсмометра ($T=5$ с). По величине период отклонения записи 0,8 с сравним с периодом собственных колебаний скалы 0,87 с, вызванных штормовыми микросейсмами в океане.

3. На карте сейсмического районирования ОСР – 97 (С) потенциально обвальный скальный массив над населенным пунктом Гуниб (Дагестан) расположен в 10 балльной зоне. Это означает, что сильное землетрясение может оказать триггерное воздействие на неустойчивый скальный массив, которое приведет к его обрушению. Существует также опасность возникновения резонансных эффектов от воздействия колебаний поверхностных волн Релея и Лява, распространяемых от мегаземлетрясений с магнитудами 8,5-9,0 по всему земному шару.

4. Учитывая высокую опасность данных процессов для прогнозирования возможного обрушения скального массива на стадии развития геологических и метеорологических факторов, необходимо расширить изучение динамических характеристик современными методами геофизического и геодезического мониторинга в непрерывном режиме.

Литература

1. Акаев Б. А., Атаев З. В., Гаджиев Б. С. и др. Физическая география Дагестана. – М.: «Школа». – 1998. – 380 с.
2. Аракелян Ф. О., Башилов И. Л., Зубков Ю. Н., Николаев А. В., Левченко Д. Г. Оползневой риск горных районов. Сейсмическая защита АЭС, проблемы и перспективы // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 119-138.
3. Арефьев С. С. Эпицентральные сейсмологические исследования. – М.: Академкнига, 2003. – 376 с.
4. Гармский геофизический полигон. – М.: Наука, ИФЗ РАН, 1990. – 239 с.
5. 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.
6. Зайцев А. С., Костюков Е. А. Инженерная сейсморазведка и сейсмометрия конструкций зданий и сооружений // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 16-19. ISSN 1997-8650
7. Карапетян Д. К., Айрапетян О. Ю., Мхитарян Д. А. Анализ динамических характеристик здания комплексной конструкции с помощью Мобильной сейсмостанции нового поколения // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 111-125.
8. Мамаев С. А., Дорофеев В. Ш., Мамаев А. С. Определение динамических параметров моделей зданий и сооружений на основе инженерно-сейсмометрической информации // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. – № 1. – С. 110-121.
9. Овчаренко А. В., Беликов В. Т., Баландин Д. В. и др. Комплексный GNSS-мониторинг деформаций высотных сооружений башенного типа. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 7. – С. 38-45.
10. Потапов В. А., Табулевич В. Н., Черных Е. Н. Влияние штормовых микросейсмических колебаний на сейсмичность в районе Курильских островов Тихого океана и на озере Байкал. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. № 8. – С. 1411-1419.
11. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963. – 670 с.
12. Рогозин Н. А., Федотов А. С. Возможности обработки многоканальных сейсморазведочных данных. // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 29-34.
13. Садовский Е. Ф., Киринос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. – М.: Изд-во техн.-теор. лит-ры, 1955. – 544 с.
14. Соболев Г. А., Закржевская Н. А. К вопросу влияния удаленных землетрясений на сейсмичность. // Физика Земли. – 2013. – № 4. – С. 29-42.
15. Табулевич В. Н. Микросейсмические колебания в анизотропной среде. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1970. – № 9. – С. 72-75.
16. Шебалин Н. В. Сильные землетрясения. – М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. – 338 с.
17. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. // Earth surface Dynamics. – 2016. – Т. 4. – pp. 285-307. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-285-2016>
18. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation // Nature communications. – 2018. – Т. 10. – No 762. – pp. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02728.1>
19. 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. <https://doi.org/10.1002/esp.5034>
20. Gombert J., Davis S. Stress/strain changes and triggered seismicity following the M_w 7.3 Landers, California, earthquake. // J. Geophys. Res. – 1996. – Vol. 101. – pp. 751-764.

21. Hill D. P. Dynamic Stress, Coulomb failure, and remote triggering. // *B Seismol. Soc. Am.* – 2008. – Vol. 98 (1). – pp. 66-91.
22. Nikolaev A. V., Nikolaev V. A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. // *Seismological Press. Beijing.* – 1993. – pp. 319-327.
23. Ott E. Chaos in Dynamic System. // *Cambridge University Press.* – 2002. – 478 p.
24. Sobolev G., Spetzler H., Kozlov A., Chelidze T. An experimental study of triggered stick-slip. // *PAGEOPH.* – 1993. – Vol. 140. No. 1. – pp. 79-94.
25. Sohlz C. H. The mechanics of earthquakes and faulting. // *Cambridge University Press.* – 1990. – pp. 439.

References

1. Akaev B. A., Ataev Z. V., Gadzhiev B. S., et al. Physical geography of Dagestan. Moscow. School, 1998. 380 pp. (in Russ.)
2. Arakelyan F. O., Bashilov I. P., Zubko Yu. N., Nikolaev A. V., Levchenko D. G. Seismic protection of nuclear power plants, problems and prospects. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 119-138. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36476 (in Russ.)
3. Arefyev, S. S. Epicentral seismological studies. Moscow. ICC “Akademkniga”, 2003. 374 pp. (in Russ.)
4. Garm geophysical test site. Moscow. Nauka, IFZ RAS, 1990. 239 pp. (in Russ.)
5. Dubyansky A. I., Zaitsev S. V., Silkin K. Yu. Surface waves of seismic events in the conditions of the Voronezh crystal massif. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2005. No. 1. pp. 221-225. (in Russ.)
6. Zaitsev A. S., Kostyukov E. A. Engineering seismic survey and seismometry of structures of buildings and structures. *Engineering surveys*, 2012. No. 11. pp. 16-19. ISSN 1997-8650 (in Russ.)
7. Karapetyan D. K., Hayrapetyan O. Yu., Mkhitarian D. A. Analysis of the dynamic characteristics of a complex structure building using a new generation mobile seismic station. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26792 (in Russ.)
8. Mamaev S. A., Dorofeev V. M., Mamaev A. S. Determination of dynamic parameters of models of buildings and structures based on engineering seismometric information. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 110-121. DOI: 10.23671/VNC.2019.4.44493 (in Russ.)
9. Ovcharenko A. V., Belikov V. T., Balandin D. V., et al. Integrated GNSS-monitoring of deformations of high-rise tower-type structures. *Engineering surveys*, 2012. No. 7. pp. 38-45. (in Russ.)
10. Potapov V. A., Tabulevich V. N., Chernykh E. N. Influence of storm microseismic oscillations on seismicity in the region of the Kuril Islands of the Pacific Ocean and on Lake Baikal *Geology and Geophysics*, 1997. Vol. 38. No. 8. pp. 1411-1419. (in Russ.)
11. Richter Ch. Elementary seismology. Moscow. Foreign Literature Publishing House, 1963. 670 p. (in Russ.)
12. Rogozin N. A., Fedotov A. S. Possibilities of processing multichannel seismic data. *Engineering surveys*, 2012. No. 11. pp. 29-34. ISSN 1997-8650 (in Russ.)
13. Sadovsky E. F., Kirnos D. P. Elements of seismology and seismometry. Publishing house of technical and theoretical literature, 1995. 544 p. (in Russ.)
14. Sobolev G. A., Zakrzhevskaya N. A. On the question of the influence of remote earthquakes on seismicity. *Physics of the Earth*, 2013. No. 4. pp. 29-42. (in Russ.)
15. Tabulevich V. N. Microseismic oscillations in an anisotropic medium. *Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Series Physics of the Earth*, 1970. No. 9. pp. 72-75. (in Russ.)
16. Shebalin N. V. Strong earthquakes. Moscow: Publishing House of the Academy of Mining Sciences, 1997. 338 p. (in Russ.)

17. Burtin A., Hovius N., Turowski J.M. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. *Earth surface Dynamics*, 2016. Vol. 4. pp. 285-307. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-285-2016>
18. Collins B., Stock G.M., Eppes M.E. et al. Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. *Nature communications*, 2018. Vol. 10. No. 762. pp. 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02728.1>
19. 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. <https://doi.org/10.1002/esp.5034>
20. Gomberg J., Davis S. Stress/strain changes and triggered seismicity following the Mw 7.3 Landers, California, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 1996. Vol. 101. pp. 751-764.
21. Hill D.P. Dynamic Stress, Coulomb failure, and remote triggering. *Seismol. Soc. Am.*, 2008. Vol. 98 (1). pp. 66-91.
22. Nikolaev A.V., Nikolaev V.A. Earth tides triggering of Continental Earthquakes. *Seismological Press*, 1993. pp. 319-327.
23. Ott E. *Chaos in Dynamic System*. Cambridge University Press, 2002. pp. 478.
24. Sobolev G., Spetzler H., Kozlov A., Chelidze T. An experimental study of triggered stick-slip. *PAGEOPH*, 1993. Vol. 140. No. 1. pp. 79-94.
25. Sohlz C.H. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge University Press, 1990. pp. 439.