

УДК 624.131

Анализ долговременных деформаций предельно напряжённых образцов горных пород

© 2023 г. Ф.Х. Каримов, Н.Г. Саломов

ИГССС НАНТ, г. Душанбе, Таджикистан

Поступила в редакцию 11.10.2022 г.

Аннотация. Приведены результаты лабораторных наблюдений за долговременными пластическими деформациями предельно напряжённого образца горных пород, продолжающимися с сентября 2009 г. по сентябрь 2022 года. К образцу в форме куба со сторонами 7 см, изготовленному в виде цементно-песчаного конгломерата, приложено постоянное одноосное давление 7 МПа. С помощью применения резиновых подвесок-демпферов установка пресса изолирована от влияния микросейсм и других механических колебаний внешних источников. В лаборатории обеспечивалась регулярная температурная стабилизация окружающей среды в пределах 1°C, а также соблюдались герметические условия с минимальным влиянием влажности. Для измерения применялся специальный метод регистрации импульсов скачков деформаций, преобразующихся в электромагнитные сигналы на основе высокочувствительной установки. Выделены трендовые составляющие хода скорости крипа, его годовые периодичности и четыре стадии, отражающие особенности изменений состояния образца. Показано, что величина крупномасштабного положительного тренда за всё время наблюдений по крайней мере на порядок величины превосходит стандартную погрешность. На качественном уровне обнаружена корреляция амплитуд суточных вариаций скорости крипа с выделенными стадиями предельно деформированного состояния. Выполнены оценки для сезонного температурного влияния окружающей лабораторной среды на годовые периодичности крипа в сравнении с влиянием сезонных изменений атмосферного давления.

Ключевые слова: предельно напряжённый образец, крип, кинетическая теория прочности, модель ЛНТ, полиномиальная аппроксимация, термонапряжения.

Для цитирования: Каримов Ф.Х., Саломов Н.Г. Анализ долговременных деформаций предельно напряжённых образцов горных пород // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 1. – С. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.03>. – EDN: CPHONW

Введение

Наблюдения за деформациями предельно напряжённых образцов (ПНО) горных пород проводятся с целью их сопоставления с деформационными сейсмотектоническими процессами и, на этой основе, – уточнения моделей подготовки землетрясений и разработки методов по их прогнозированию [Садовский и др., 1984]. Широко известны такие модели формирования очагов тектонических землетрясений как упругой отдачи [Reid, 1911], лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин и др., 1975; Соболев, 1993], дилатантно-диффузионная [Nur, 1972; Anderson, Whitcomb, 1973; Sholz et al., 1973; Stuart, 1974], критического проскальзывания [Logan, 1977], пластического течения [Уломов, Мавашев, 1967], консолидированного вклю-

чения [Добровольский, 1991] и другие [Ризниченко, 1976; Ребецкий, 2006; Шерман, 2009; Семёнов, 2018]. Поскольку сейсмотектонические процессы сопровождаются механическими напряжениями в широком диапазоне значений, от микроскопических до самых больших, с верхней границей, определяющей относительные смещения крупных массивов горных пород, то для установления закономерностей деформационных процессов горных пород особое значение имеют исследования образцов, находящихся в предельно напряжённом состоянии [Садовский и др., 1987; Виноградов и др., 1975].

Настоящая работа посвящена продолжению лабораторных наблюдений за долговременными пластическими деформациями ПНО, ведущимися с сентября 2009 г. [Каримов, Саломов, 2018; 2020]. В этих наблюдениях к образцу в форме

куба со сторонами 7 см, изготовленному из цементно-песчаного бетона, приложено постоянное одноосное давление 7 МПа. Пластические деформации, происходящие под действием постоянной нагрузки, — есть крип [Ржевский, Новик, 1967; Van Vleck, 1989]. Образец, изготовленный из мелкозернистого бетона, представляет собой модель твёрдой породы типа мелкозернистого конгломерата, характерного для некоторых осадочных горных пород [Криштофович, 1978].

Цель наблюдений заключается в выявлении особенностей вариаций скорости крипа ПНО от начала нагружения до момента его полного разрушения посредством определения скорости деформаций, выделения трендовой составляющей и проведения аналитических оценок для влияния температуры и давления окружающей среды.

1. Методы наблюдений

Для изоляции прессы от микросейсм и других колебаний от внешних источников применены специальные резиновые подвески-демпферы. В лаборатории, расположенной в изолированном подвальном помещении, обеспечивалась температурная стабилизация окружающей среды в пределах порядка 1°C в течение года, а также соблюдались стабильные условия с минимальной влажностью. Для измерения деформаций применялся специальный метод регистрации импульсов скачков деформаций, преобразующихся в электромагнитные сигналы на основе высокочувствительной установки [Мирзоев и др., 2009]. Обработка результатов измерений производилась с помощью программы Excel.

Об обнаружении вариаций скорости относительных деформаций, равных по порядку величины 10^{-9} c^{-1} при одноосном нагружении ПНО, сообщалось в работах [Виноградов и др., 1975; Каримов, Саломов, 2018]. На примерах за отдельные годы наблюдений было показано, что скорости этих деформаций изменяются с течением времени [Каримов, Саломов, 2018; 2020]. В скоростях деформаций обнаруживается крупномасштабный тренд, на фоне которого явно проявляются годовые вариации. Сезонный ход рассматриваемого крипа коррелируется с сезонным ходом атмосферного давления и температуры. Изменения фоновых скоростей деформаций ПНО выявлены в линейных приближениях, а также в полиномиальных представлениях временных рядов. При этом выделяются сезонные годовые вариации скорости крипа: в летнее время эти скорости понижаются, в зимнее — возрастают.

2. Результаты наблюдений

Ход скорости деформаций ПНО за всё время наблюдений представлен на рис. 1. По оси ординат показаны скорости деформаций $\dot{\epsilon}$ в относительных единицах, отображающих нормированное отношение числа импульсов скачков пластических деформаций к их максимальному уровню ϵ_0 , по оси абсцисс указано время. Стандартная погрешность измерений относительных суточных изменений скорости крипа составляет около 0.3. Пунктирной линией показан положительный долговременный крупномасштабный тренд монотонного возрастания скорости крипа за время наблюдений с сентября 2009 г. по сентябрь 2022 г., который достиг 1.5 единиц, существенно превышая стандартную погрешность.

На первом этапе (I), в начале нагружения, в течение нескольких месяцев произошло относительно быстрое ускорение до некоторой установившейся средней фоновой скорости — начальный этап упругого деформирования и наступление пластического к 2010 году. На втором этапе (II), с 2010 по 2014 г., устанавливается деформирование с некоторой постоянной фоновой средней скоростью — происходят пластические деформации крипа. На третьем этапе (III), с 2015 по 2017 г., фоновая скорость пластических деформаций сначала растёт, достигая максимума в 2017–2018 гг., и затем снижается до средних значений второго этапа. На четвёртом этапе (IV), с 2021 г. до сентября 2022 г., фоновая скорость продолжает явно снижаться.

Соответственно четырём этапам изменений фоновой скорости изменяется характер годовых вариаций. На начальных этапах амплитуды годовых вариаций самые большие, на третьем — наименьшие, на четвёртом — промежуточные по величине (рис. 1).

3. Интерпретация

Обнаруженные здесь особенности до некоторой степени согласуются с общими представлениями о крипах образцов горных пород [Регель и др., 1974; Ржевский, Новик, 1967; Van Vleck, 1989]. На начальном этапе, после мгновенного нагружения, упругие напряжения в образце резко возрастают и постепенно переходят в упругопластические — участок (A) (рис. 2). Наступает второй этап, на котором деформации происходят с почти постоянной скоростью (B). На третьем этапе (CD) скорость возрастает вплоть до разрушения образца в некоторой точке D.

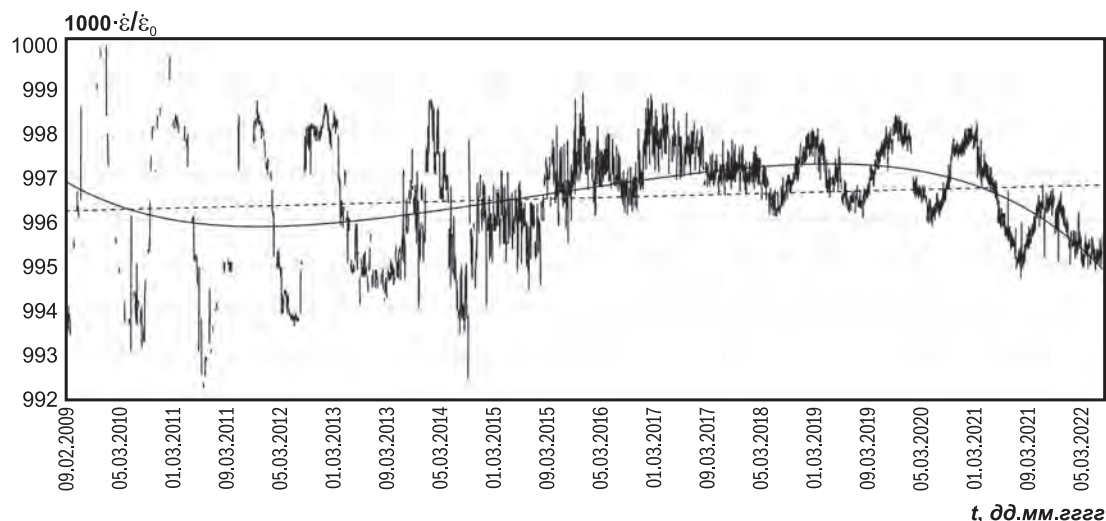


Рис. 1. Временной ход скорости пластических деформаций ПНО

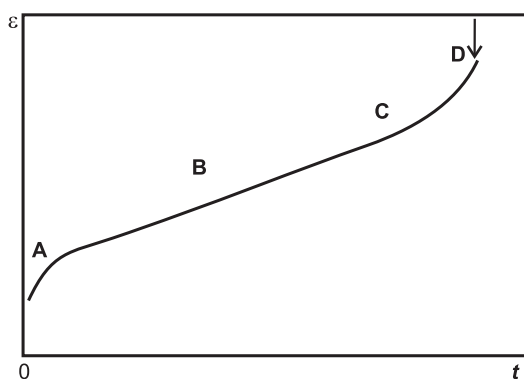


Рис. 2. Стадии крипа образца горной породы

На самом начальном этапе нагружения происходит уплотнение материала, которое реализуется путём его упругой и пластической деформации, закрытия пор, капилляров, микротрещин, а также переориентации и относительного перемещения зёрен — кристаллитов (А). При этом напряжения, действующие внутри микрозёрен, относительно невелики для того, чтобы играли роль диффузионная и дислокационная ползучести, как это происходит в сплошных телах [Захаров, Смирнов, 2021].

Поскольку напряжение сжатия очень велико, то после достаточно большого уплотнения образца наступает стадия пластического течения, на которой образуются сдвиговые микротрещины (В). Исследования акустических импульсов, которые сопровождают процесс деформирования образцов, показывают, что на этом этапе растёт концентрация микротрещин, происходит их стационарное накопление, однородное по объёму [Журков и др., 1981; Куксенко, 1984]. Размеры образующихся трещин примерно одинаковы. Далее, по мере роста концентрации микро-

трещин, наступает стадия объединения смежных из них в более крупные. Происходит ускоренное лавинообразное накопление микротрещин в некоторой плоскости, по которой впоследствии происходит магистральный разрыв образца, как в модели ЛНТ [Мячкин, 1978].

В настоящем эксперименте проявляются и некоторые особенности деформирования ПНО. В стандартном представлении крипа после стадии равномерной деформации (В) крип ускоряется вплоть до разрушения образца [Регель и др., 1974; Ржевский, Новик, 1967; Захаров, Смирнов, 2021] (рис. 2). В настоящей работе обнаружено, что на этапе CD после роста скорости деформации образца происходит её понижение. Быстрый же рост ожидается далее, непосредственно на выходе состояния образца к разделению его на части.

На рис. 3 приведена схема временного хода скорости пластических деформаций, которая составлена на основании выделенных этапов I—IV для иллюстрации и интерпретации характерных вариаций крипа. Для объяснения снижения скорости и роста к моменту ожидаемого полного разрушения образца на четвертом этапе вводятся скорости $\dot{\epsilon}_a$ и $\dot{\epsilon}_b$, чтобы воспользоваться представлениями о двух параллельно протекающих процессах в образце на заключительном этапе IV. Соответственно, в зоне формирования магистральной трещины скорость крипа характеризуется с помощью графика $\dot{\epsilon}_a$, а в остальном его объёме, где микротрещины смыкаются и скорость деформаций из-за уплотнения падает, — $\dot{\epsilon}_b$ [Регель и др., 1974; Журков и др., 1981; Куксенко, 1984]. Момент ожидаемого полного разрушения показан стрелкой.

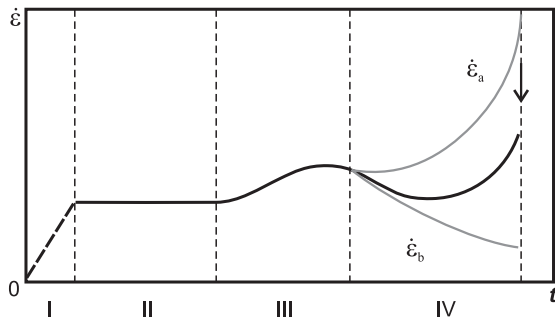


Рис. 3. Схема стадийности крипа ПНО

Снижение скорости крипа на стадии IV можно объяснить в рамках концентрационного критерия для наступления фазы активного разрушения образца кинетической теории прочности [Регель и др., 1974; Журков и др., 1981; Куксенко, 1984] и модели ЛНТ [Мячкин и др., 1975; Садовский и др., 1984; Завьялов, 2006; Смирнов, Пономарёв, 2020], а также тем, что по мере деформирования образца, по-видимому, происходит некоторая разгрузка пружин пресса. При достижении критической концентрации микротрещин начинается их объединение и концентрирование в окрестности некоторой плоскости, в которой оказывается группа из наиболее крупных из них – будущая магистральная трещина. В результате возникает одна или несколько относительно узких зон концентрирования микротрещин и области вокруг них аналогично возникновению узкой «шейки» при растяжении металлических стержней. Полная накопленная энергия деформации в образце перераспределяется между этими двумя областями: из-за концентрирования и роста микротрещин в некоторой узкой зоне

энергия деформаций в ней растёт, и за счёт этого энергия деформаций вокруг неё из-за разгрузки напряжений и частичного закрытия микротрещин уменьшается. На рис. 3 такое разделение хода деформаций показано для скоростей $\dot{\epsilon}_a$ и $\dot{\epsilon}_b$ соответственно. Вначале, когда микротрещин в узкой зоне ещё мало, общая скорость крипа образца продолжает снижаться, образец упрочняется за счёт уплотнения среды в объёме вне этой зоны. Однако по мере продолжения деформирования из-за лавинного роста узкой области скорость деформаций в ней, как можно ожидать, начнёт превалировать над скоростью в остальном объёме – вплоть до разделения образца на части в момент, показанный на рис. 3 стрелкой.

В ряде работ на примерах отдельных лет наблюдений обнаружена годовая периодичность крипа ПНО [Каримов, Саломов, 2018; 2020]. Поскольку ходы атмосферного давления и температуры воздуха, как правило, направлены противофазно, то корреляции между скоростями крипа и температуры могут быть достаточно значимыми. В качестве примера представлены временные ряды для скорости крипа ПНО (рис. 4), атмосферного давления (рис. 5) и температуры окружающей среды (рис. 6) за период с 01.01.2021 г. по 30.09.2022 года.

В летние месяцы каждого года за период наблюдений 2009–2022 гг. скорость крипа наименьшая, в зимние – наибольшая. В весенние и осенние периоды, соответственно, скорости имеют промежуточные значения (рис. 1, 4). Долговременные наблюдения в течение этих 13 лет дали возможность подтвердить проявление такой регулярно повторяющейся периодичности.

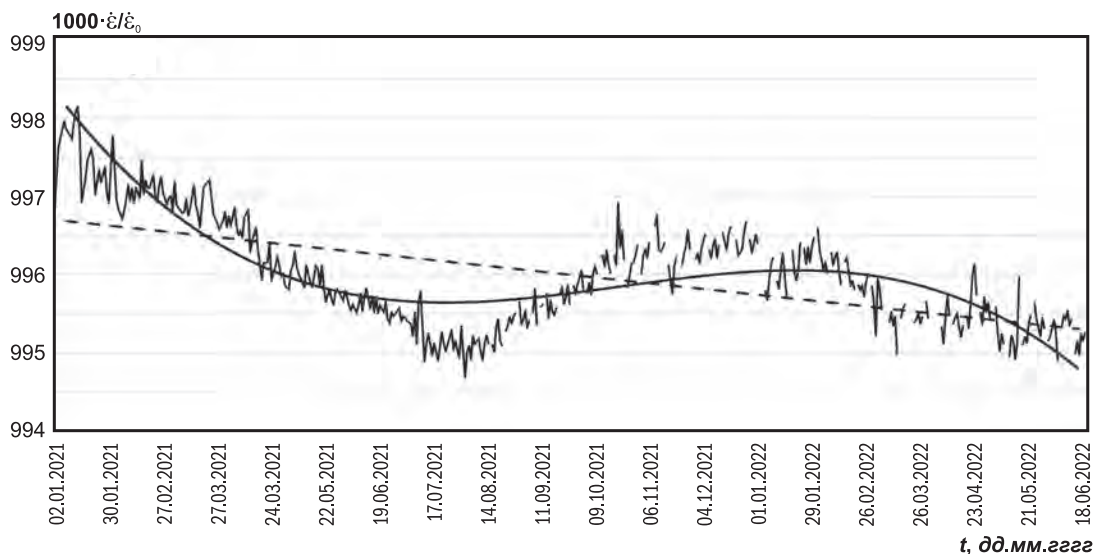


Рис. 4. Ход скорости крипа ПНО за период 01.01.2021 г. – 30.09.2022 г.

Для интерпретации выявленных особенностей крива рассмотрим две возможные причины: влияние атмосферного давления и температуры окружающей среды. Действие третьего возможного фактора – изменений влажности воздуха – в настоящей работе не рассматривается. В лабораторном помещении обеспечена относительная герметичность, тем не менее, для определения роли влажности необходима постановка отдельных специальных наблюдений, как и для изучения влияния таких факторов как акустические излучения [Баннов и др., 1982], электромагнитные волны и др. Как правило, в зимнее время влажность наибольшая, в летние – наименьшая, и поэтому можно ожидать, что и этот фактор будет вносить вклад в наблюдаемые особенности скорости крива.

В условиях рассматриваемого эксперимента годовые перепады между летними и зимними тем-

пературами составляют 1–2°C. Для оценки роли температуры примем во внимание, что коэффициент температурного расширения для образца из бетона составляет $1.1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, верхней и нижней плит стального пресса – $(1.0 \div 1.8 \cdot 10^{-5})/^{\circ}\text{C}$. Можно заметить, что значения этих коэффициентов для бетона и стали очень близки (на этом основано применение железобетона).

Согласно определению, относительное линейное расширение образца длиной l в зависимости от температуры имеет вид [Ржевский, Новик, 1967]:

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha(t^{\circ} - t_0^{\circ}), \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения, Δl – абсолютная деформация образца, t° – температура окружающей среды, t_0° – температура нормальных физических условий.

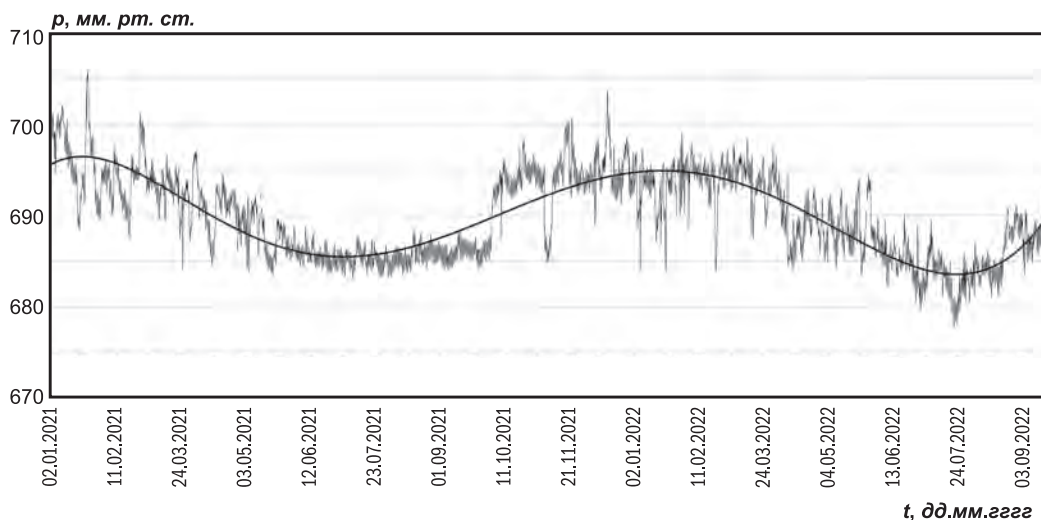


Рис. 5. Ход атмосферного давления за период 01.01.2021 г. – 30.09.2022 г.

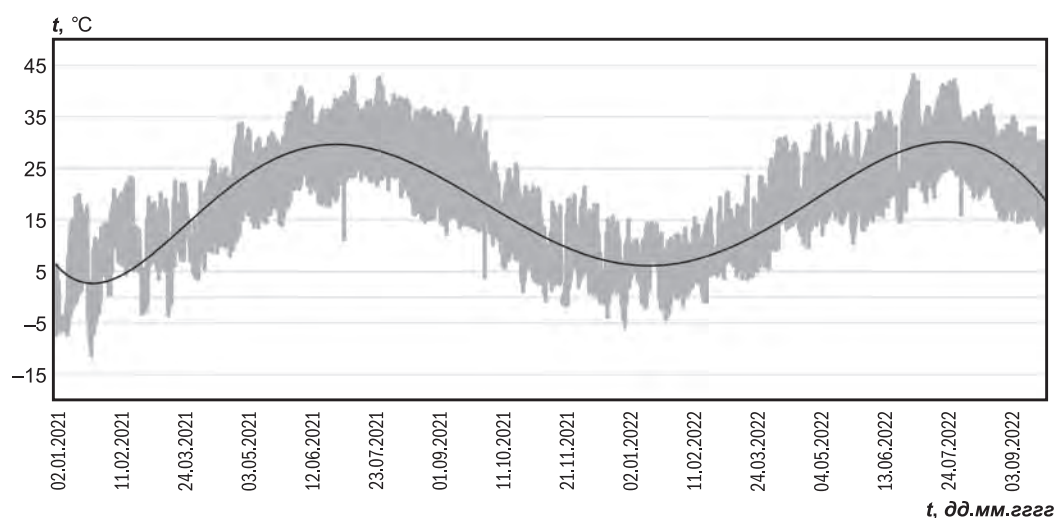


Рис. 6. Ход температуры окружающей среды за период 01.01.2021 г. – 30.09.2022 г.

В равновесии давление со стороны пружины пресса уравнивается дополнительным давлением со стороны образца и пластин пресса, обусловленным их расширениями при росте температуры окружающей среды. Поскольку эти напряжения внутри образца и в пластинах пресса находятся в равновесии и равны друг другу, то для оценки дополнительного напряжения Δp в первом приближении на основании закона упругости [Ржевский, Новик, 1967; Захаров, Смирнов, 2021] примем следующее выражение для напряжений деформаций:

$$\Delta p = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости для стали, равный $2.1 \div 2.4$ ГПа. Разброс значений этого модуля обусловлен их различиями для разных марок сталей.

Учёт упругих характеристик стального пресса даёт возможность избежать относительно больших различий модулей упругости материала образца на растяжение и сжатие. С учётом выражений (1) и (2) можно получить следующее выражение для дополнительного давления:

$$\Delta p = 2E\alpha(t^\circ - t_0^\circ), \quad (3)$$

где α – коэффициент линейного температурного расширения для стали.

Коэффициент 2 в выражении (3) отражает факт равенства между напряжениями, действующими на образец и пластины пресса. Подставляя значения годового перепада температур 2°C и значения соответствующих параметров образца в (3), получим для Δp интервал возможных значений $(0.046 \div 0.139)$ МПа. Если сравнить эти значения с годовым перепадом атмосферного давления в месте проведения лабораторных наблюдений, составляющих около 0.002 МПа, то можно сделать вывод о том, что роль перепада температуры в возникновении термонапряжений в образце и, тем самым, в проявлении годового хода скоростей крипа должна быть большей. Если, кроме того, учесть, что атмосферное давление действует как всестороннее, а не одноосное, то это ещё больше подтверждает превалирование роли перепада температуры в годовых изменениях скорости крипа.

Заключение

Характер хода скорости крипа предельно напряжённого образца горной породы во многом согласуется со стандартными представлениями кинетической теории прочности и модели ЛНТ. В отличие от стандартного представления о переходе после равномерного пластического течения к лавинообразному росту трещин

в узкой зоне их концентрации вплоть до разделения образца, в настоящем эксперименте наблюдается упрочнение образца на заключительной стадии перед полным разрушением, снижение скорости крипа, и лишь затем прогнозируется лавинообразный рост магистральной трещины.

Долговременные наблюдения за деформациями предельно напряжённого образца горных пород дали возможность качественно обнаружить годовую сезонность в скоростях крипа: в летние месяцы каждого года в период 2009–2022 гг. скорость крипа наименьшая, в зимние – наибольшая. В весенние и осенние периоды, соответственно, скорости имеют промежуточные значения. Обнаружены изменения амплитуд колебаний скорости крипа: на начальных стадиях амплитуды были наибольшими, в средний период наблюдений – в несколько раз меньше, на последней стадии – с промежуточными значениями. По-видимому, на начальных стадиях образец был неуплотнённым и поэтому более податливым к деформациям. На средней стадии произошло его уплотнение, он стал более жёстким, и постепенно в нём стали развиваться микротрещины. На последней стадии за счёт объединения микротрещин в одну или несколько узких, плоских зон образец стал более податливым к деформациям и более чувствительным к изменениям параметров окружающей среды.

Аналитические оценки для изменений термонапряжений, вызванных годовыми перепадами температуры 2°C , показали, что влияние температуры на годовую периодичность крипа более вероятно, чем действие годовых перепадов атмосферного давления.

Для определения влияния на скорость пластических деформаций сезонных изменений влажности воздуха необходима постановка отдельных специальных наблюдений, как и для изучения влияния других факторов: акустических излучений, электромагнитных волн и др.

Литература

- Баннов Ю.А., Брудный Л.Г. и др. Акустические излучения перед землетрясениями // Прогноз землетрясений. № 1. – Душанбе: Дониш, 1982. – С. 242–251.
- Виноградов С.Д., Мирзоев К.М., Саломов Н.Г. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов. – Душанбе: Дониш, 1975. – 118 с.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1991. – 219 с.
- Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 259, № 6. – С. 1350–1353.

- Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений. – М.: Наука, 2006. – 254 с. – EDN: QKFPZD
- Захаров В.С., Смирнов В.Б.* Физика Земли. – М.: ИНФПА-М, 2021. – 328 с.
- Каримов Ф.Х., Саломов Н.Г.* Сезонные вариации деформаций предельно напряжённых модельных образцов горных пород // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 115–119. – EDN: YOABNJ
- Каримов Ф.Х., Саломов Н.Г.* Сезонные вариации крипа предельно напряжённых сред и сейсмической активности // Инновационные технологии в решении актуальных проблем сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии. Материалы Международной научной конференции, посвящённой 110-летию академика Г.А. Мавлянова (20–21 октября 2020 г.). – Ташкент: ИС АН РУз, 2020. – С. 100–104. – URL: <https://www.seismos.uz/files/Сборник%202020.pdf>
- Криштофович А.К.* (ред.). Геологический словарь. Т. 1. – М.: Недра, 1978. – 486 с.
- Куксенко В.С.* Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений. Вып. 4. – Душанбе-М.: Дониш, 1984. – С. 8–20.
- Мирзоев К.М., Саломов Н.Г., Шепелин И.С.* Комплексная аппаратура для лабораторных исследований сейсмических процессов // Труды Международной конференции по снижению сейсмического риска, посвящённой 60-летию со дня Хаитского землетрясения 1949 г. в Таджикистане. – Душанбе: ИГССС АН РТ, 2009. – С. 102–105.
- Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. – М.: Наука, 1978. – 232 с.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясения // Физика очага землетрясения. – М.: Наука, 1975. – С. 6–29.
- Ребецкий Ю.Л.* Дилатансия, поровое давление флюида и новые данные о прочности горных массивов в естественном залегании // Флюиды и геодинамика. – М.: Наука, 2006. – С. 120–146.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 573 с.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я.* Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1967. – 288 с.
- Ризниченко Ю.В.* Энергетическая модель сейсмического режима // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1976. – № 5. – С. 3–19.
- Садовский М.А., Авсюк Ю.Н., Барсуков О.М., Белоусов В.В. и др.* Основы прогноза землетрясений // Прогноз землетрясений. Вып. 3. – Душанбе-М.: Дониш, 1984. – 216 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 101 с.
- Семёнов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н.* Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 165–175.
- Смирнов В.Б., Пономарёв А.В.* Физика переходных режимов сейсмичности. – М.: РАН, 2020. – 412 с. – URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-fizika-perehodnyh-rezhimov-seysmichnosti.pdf>
- Соболев Г.А.* Физические основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 314 с.
- Уломов В.И., Мавашев Б.З.* О предвестнике сильного Ташкентского землетрясения // Доклады Академии наук СССР. – 1967. – Т. 176, № 2. – С. 319–323.
- Шерман С.И.* Деструкция литосферы и её реализация в разломообразовании и сейсмичности: разработка тектонофизической модели сейсмической зоны // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: Материалы Всероссийского совещания (г. Иркутск, 18–21 августа 2009 г.). В 2-х т. Т. 2. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – С. 77–80.
- Anderson D.L., Whitcomb J.H.* The dilatancy model of earthquake prediction // Proceedings conference on tectonic problems of the San Andreas fault system. V. 13. – California: Stanf. Univ. Publ., 1973. – P. 417–426.
- Logan J.M.* Creep, stable-sliding and premonitory slip // Proceedings 2nd conference experimental studies of rock friction with application to earthquake prediction. – CA.: Menlo Park, 1977. – P. 205–237.
- Nur A.* Dilatancy, pore fluids and premonitory of variations of tS/tP travel times // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1972. – V. 62. – P. 1217–1222.
- Reid H.F.* The elastic-rebound theory of earthquakes // University of California Publications in Geological Sciences. – 1911. – V. 6. – P. 413–444.
- Sholz C.K., Sykes L.R., Aggarwal Y.P.* Earthquake prediction: A physical basis // Science. – 1973. – V. 181, N 4102. – P. 803–809.
- Stuart W.S.* Diffusion less dilatancy model for earthquake precursors // Geophysical Research Letters. – 1974. – V. 1. – P. 261–264.
- Van Vleck L.H.* Elements of materials science and engineering. – Boston: Pearson, 1989. – 624 p.

Сведения об авторах

Каримов Фаршед Хилолович, доктор физ.-мат. наук, зав. лаб. Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана (ИГССС НАНТ), г. Душанбе, Таджикистан. E-mail: farshed_karimov@rambler.ru

Саломов Нусратулло Гафурович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИГССС НАНТ, г. Душанбе, Таджикистан. E-mail: seismtadj@rambler.ru

Analysis of long-term deformations of the ultimately stressed samples of rocks

© 2023 F.H. Karimov, N.G. Salomov

IGEES NAST, Dushanbe, Tajikistan

Received October 11, 2022

Abstract The results of ongoing laboratory observations of long-term plastic deformations of an extremely stressed sample of rocks, which have been carried out from September 2009 to September 2022, are presented. A sample in the form of a cube with sides of 7 cm, made in the form of a cement-sand conglomerate, is subjected to a constant uniaxial pressure of 7 MPa. With the use of rubber suspension dampers, the press installation was isolated from the influence of microseisms and other mechanical vibrations from external sources. The laboratory ensured regular temperature stabilization of the environment within daily temperatures of the order of 1°C, and hermetic conditions were observed with minimal influence of humidity. For the measurement, a special method was used to register impulses of deformation jumps, which are converted into electromagnetic signals by virtue of a highly sensitive installation. The trend components of the creep rate, its annual periodicities and four stages, reflecting the features of changes in the state of the sample, are identified. It is shown that the magnitude of the large-scale, positive trend over the entire observation period is at least an order of magnitude greater than the standard one. At a qualitative level, a correlation was found between the amplitudes of diurnal variations in the creep rate and the distinguished stages of the ultimate deformed state. Estimates are made for the seasonal temperature influence of the surrounding laboratory environment on the annual periodicity of the creep in comparison with seasonal changes in atmospheric pressure.

Keywords Ultimate stressed sample, creep, kinetic theory of strength, LNT model, polynomial approximation, thermal stresses.

For citation Karimov, F.H., & Salomov, N.G. (2023). [Analysis of long-term deformations of the ultimately stressed samples of rocks]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(1), 51-59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.1.03>. EDN: CPHONW

References

- Anderson, D.L., & Whitcomb, J.H. (1973). The dilatancy model of earthquake prediction. In *Proceedings Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System, V. 13* (pp. 417-426). CA.: Stanf. Univ. Publ.
- Bannov, Yu.A., Brudny, L.G. et al. (1982). [Acoustic radiation before earthquakes]. *Prognoz zemlentryaseni. Vyp. 1* [Forecast of earthquakes. Iss. 1] (pp. 242-251). Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ. (In Russ.).
- Dobrovolsky, I.P. (1991). *Teoriia podgotovki tektonicheskogo zemlentryaseniia* [Theory of preparation of a tectonic earthquake]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 219 p. (In Russ.).
- Karimov, F.H., & Salomov, N.G. (2018). [Seasonal variations of deformations of extremely stressed model samples of rocks]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XIII International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (pp. 115-119). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: YOABNJ
- Karimov, F.H., & Salomov, N.G. (2020). [Seasonal variations of the creep of extremely stressed media and seismic activity]. In *Innovatsionnye tekhnologii v reshenii aktual'nykh problem seismologii, gidrogeologii i inzhenernoi geologii. Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posviashchennoi 110-letiiu akademika G.A. Mavlianova (20-21 oktiabria 2020 g.)* [Innovative technologies in solving urgent problems of seismology, hydrogeology and engineering geology. Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 110th anniversary of Academician G.A. Mavlyanov (October 20-21, 2020)] (pp. 100-104). Tashkent, Uzbekistan: AS RUzb. Publ. (In Russ.). Available at: <https://www.seismos.uz/files/Cборник%202020.pdf>
- Krishtofovich, A.K. (Ed.). (1978). *Geologicheskii slovar'. T. I* [Geological glossary. Iss. I]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 486 p. (In Russ.).
- Kuksenko, V.S. (1984). [Kinetic aspects of the process of destruction and the physical basis of its prediction]. *Prognoz zemlentryaseni. Vyp. 4* [Forecast of earthquakes. Iss. 4] (pp. 8-20). Dushanbe, Tajikistan - Moscow, Russia: Donish Publ. (In Russ.).
- Logan, J.M. (1977). Creep, stable-sliding and premonitory slip. In *Proceedings 2nd Conference Experimental Studies*

- of Rock Friction with Application to Earthquake Prediction (pp. 205-237). CA.: Menlo Park.
- Mirzoev, K.M., Salomov, N.G., & Shepelin, I.S. (2009). [Complex equipment for laboratory studies of seismic processes]. In *Trudy mezhdunarodnoi konferentsii po snizheniyu seismicheskogo riska, posvyashyonnoi 60-letiyu so dnya Khait'skogo zemletryaseniya 1949 g. v Tadjikistane* [Proceedings of the International Conference on Seismic Risk Reduction, dedicated to the 60th anniversary of the 1949 Khait earthquake in Tajikistan] (pp. 102-105). Dushanbe, Tajikistan: IGEES AS RT Publ. (In Russ.).
- Myachkin, V.I. (1978). *Protsessy podgotovki zemletryaseni* [Earthquakes' preparation processes]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 232 p. (In Russ.).
- Myachkin, V.I., Kostrov, B.V., Sobolev, G.A., & Shamina, O.G. (1975). [Fundamentals of the physics of the source and earthquake precursors]. In *Physika ochaga zemletryaseni* [Physics of the earthquake source] (pp. 6-29). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Nur, A. (1972). Dilatancy, pore fluids and premonitory of variations of tS/tP travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62, 1217-1222.
- Rebetskii, Yu.L. (2006). [Dilatancy, fluid pore pressure and new data about durability of rock massifs in situ]. In *Fluidy i geodynamika* [Fluids and geodynamics] (pp. 120-146). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Regel, V.R., Slutzker, A.I., & Tomashevsky, E.E. (1974). *Kineticheskaya teoriya prochnosti tvordykh tel* [Kinetic theory of the durability of solids]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 573 p. (In Russ.).
- Reid, H.F. (1911). The elastic-rebound theory of earthquakes. *University of California Publications in Geological Sciences*, 6, 413-444.
- Riznichenko, Yu.V. (1976). Energetic seismic regime's mode. *Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth*, 5, 3-19. (In Russ.).
- Rzhevsky, V.V., & Novik, G.Ya. (1967). *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of rock physics]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 288 p. (In Russ.).
- Sadovsky, M.A., Avsyuk, Yu.N., Barsukov, O.M., Belousov, V.V. et al. (1984). [Fundamentals of earthquake prediction]. In *Prognoz zemletryaseni. Vyp. 3* [Forecast of earthquakes. Iss. 3]. Dushanbe, Tajikistan - Moscow, Russia: Donish Publ., 216 p. (In Russ.).
- Sadovsky, M.A., Bolkhovitinov, L.G., & Pisarenko, V.F. (1987). *Deformirovanie geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess* [Deformation of the geophysical medium and the seismic process]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 101 p. (In Russ.).
- Semyonov, R.M., Kashkovskii, V.V., & Lopatin, M.N. (2018). [Model of the preparation and realization of the tectonic earthquake and its precursors under the earth crust stretching]. *Geodinamika I tertonofizika* [Geodynamics and tectonophysics], 9(1), 165-175 (In Russ.).
- Sherman, S.I. (2009). [Lithosphere destruction and its realization at faulting and seismicity]. In *Razlomoobrazovanie i seismichnost' v litosfere: tektonofizicheskie kontseptsii i sledstviia. T. 2* [Faulting and seismicity in the lithosphere: tectonophysical concepts and consequences. Iss. 2] (pp. 77-80). Irkutsk, Russia: IZK SO RAN Publ. (In Russ.).
- Sholz, C.K., Sykes, L.R., & Aggarwal, Y.P. (1973). Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 181(4102), 803-809.
- Smirnov, V.B., & Ponomaryov, A.V. *Fizika perekhodnykh rezhimov seismichnosti* [Physics of the transitional regimes of seismicity]. Moscow, Russia: RAS Publ., 412 p. (In Russ.). Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-fizika-perehodnykh-rezhimov-seismichnosti.pdf>
- Sobolev, G.A. *Fizicheskie osnovy prognoza zemletryaseni* [Physical basics of earthquakes' prediction]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 314 p. (In Russ.).
- Stuart, W.S. (1974). Diffusionless dilatancy model for earthquake precursors. *Geophysical Research Letters*, 1, 261-264.
- Ulomov, V.I., & Mavashev, B.Z. (1967). [About the precursor of strong Tashkent earthquake]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the Academy of Sciences of the USSR], 176(2), 319-323. (In Russ.).
- Van Vleck, L.H. (1989). *Elements of Materials Science and Engineering*. Boston, USA: Pearson Publ., 624 p.
- Vinogradov, S.D., Mirzoev, K.M., & Salomov, N.G. (1975). *Issledovaniya seismicheskogo rezhima pri razrushenii obraztsov* [Studies of the seismic regime during the destruction of samples]. Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ., 118 p. (In Russ.).
- Zakharov, V.S., & Smirnov, V.B. (2021). *Fizika Zemli* [Physics of the Earth]. Moscow, Russia: INFPA-M Publ., 328 p. (In Russ.).
- Zavyalov, A.D. (2006). *Srednesrochnyi prognoz zemletryaseni* [Mean-term earthquakes prediction]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 254 p. (In Russ.). EDN: QKFPZD
- Zhurkov, S.N., Kuksenko, B.C., & Petrov, V.A. (1981). [Physical foundations for predicting mechanical failure]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections], 259(6), 1350-1353. (In Russ.).

Information about authors

Karimov Farshed Hilolovich, Dr., Chief of Laboratory of the Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of National Academy of Sciences of Tajikistan (IGEES NANT), Dushanbe, Tajikistan. E-mail: farshed_karimov@rambler.ru

Salomov Nusratullo Ghafurovich, PhD, Leading Researcher of the IGEES NANT, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: seismtadj@rambler.ru