

05

Инициация процесса накопления микротрещин в граните при сочетании статического и ударного нагружения. Триггерный эффект

© И.П. Щербаков, Х.Ф. Махмудов, А.Е. Чмель

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 13 сентября 2023 г.

Принято к публикации 8 октября 2023 г.

Методом лабораторного модельного эксперимента исследованы процессы накопления гипоцентров и распространения трещин. Ударная волна в одноосно сжатом граните возбуждалась маятниковым копром, направленным поперечно компрессии. Выделение энергии при накоплении микротрещин и формировании локального повреждения регистрировалось методом акустической эмиссии. Было обнаружено, что при статическом давлении, далеком от заранее измеренного порога глобального разрушения образца, выход энергии индуцированных копром микротрещин имеет несколько стадий с различным наклоном кривой накопления. При увеличении сжимающего давления на образец порог разрушения при ударном воздействии снижался на 5–20% в зависимости от установленной энергии копра, т. е. проявлялся триггерный эффект.

Ключевые слова: гранит, ударное разрушение, акустическая эмиссия, триггерный эффект.

DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56900.86-23

Введение

Интерес к явлению триггерного срыва — потере равновесия, находящейся в метастабильном состоянии крупномасштабной инфраструктурной системой (разрушение подземной конструкции, обвал горной породы, крушение морских прибрежных сооружений) при незначительном внешнем воздействии как естественного (фоновая сейсмическая активность [1], вулканическая деятельность [2], приливы [3], атмосферные явления [4]), так и антропогенного происхождения [5–7] — появился уже в прошлом веке, когда было отмечено влияние строительства масштабных водных резервуаров на сейсмическую активность регионов.

В дополнение к натурным наблюдениям в настоящее время проводятся работы по лабораторному изучению и моделированию триггерных ситуаций [8–11]. Особый интерес представляют эксперименты, относящиеся к нерешенным проблемам, влияющим на вероятность триггерных обрушений, таких, как степень исходной поврежденности горной породы [12,13] или наличие остаточных деформаций [14].

В лабораторных условиях „допороговое“ разрушение горных пород часто наблюдается методом акустической эмиссии (АЭ), который чувствителен к упругим волнам, излучающимся при возникновении микротрещин в нагруженных твердых телах. При этом используется различная геометрия приложения нагрузки, в частности, трехосное [15,16] или одноосное [17] сжатие, а также сдвиговое [18,19] и ударное [20] воздействия. Также метод АЭ применялся для регистрации микротрещин в гра-

нитах, вызванных высокотемпературным нагревом [21] или быстрым охлаждением [22].

Во многих публикациях отмечалось близкое соответствие лабораторных схем приложения нагрузки для АЭ-мониторинга развития разрушения натурным ситуациям [23,24]. В настоящей работе применялось сочетание статической вертикальной нагрузки образца с точечным ударом в горизонтальном направлении, что имитирует преимущественное вертикальное механическое напряжение горных пород в природе с ортогональным действием других, перечисленных выше [1–3,5–7] силовых факторов.

Исследование развития разрушения проводилось на гранитных образцах, одноосно нагруженных от устойчивых до предтриггерных состояний. Рассмотрены особенности накопления механических микродефектов в материале под действием одиночной ударной волны. Методом АЭ измерялось выделение энергии при образовании микротрещин с наносекундным разрешением по времени. Особое внимание уделялось начальной стадии паттерна выхода энергии при различных сочетаниях статического и динамического нагружения.

1. Образцы и оборудование

Образцами служили блоки гранита Вестерли размером $32 \times 20 \times 10$ mm. Акустические исследования поведения гранита Вестерли под механической нагрузкой были начаты еще в прошлом веке [17,25] и активно продолжают вплоть до последнего десятилетия [22,26,27].

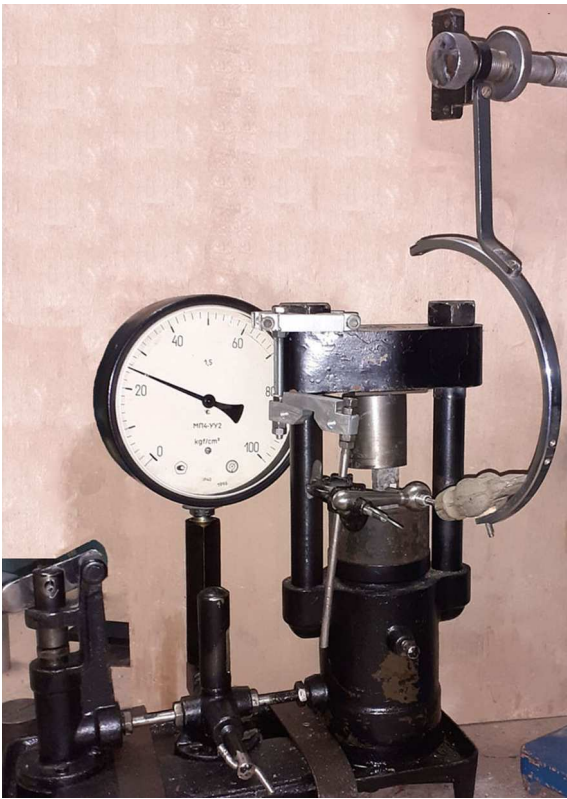


Рис. 1. Фотография установки для регистрации АЭ при ударном разрушении.

Плотность этого материала — 2650 g/cm^3 ; типичный размер зерен и пор — 0.8 и 0.6 mm соответственно [13].

Испытания проводились на лабораторном гидравлическом прессе. Экспериментальная установка (рис. 1) обеспечивала взаимно-перпендикулярное приложение нагрузок: вертикальное одноосное нагружение прессом и горизонтальный удар заостренным бойком с маятниковой подвеской. Образец помещался под поршень пресса перед упорной пластиной, препятствующей его горизонтальному смещению при ударе бойком при низких давлениях.

Предварительно определялся порог разрушения гранита (магистральный разрыв или тотальное крошение) при одноосном сжатии давлением Q_{th} без ударного воздействия. Воспроизводимость разрушающего давления от образца к образцу (проведено 10 измерений, 1 образец дал выпадающий результат) составила $\pm 2\%$ от средней величины.

Удар бойком производил локальное повреждение поверхности образца. Изменением высоты подъема копра энергия воздействия бойка на образец E задавалась величинами 0.06 , 0.12 и 0.18 J .

Для регистрации АЭ на подвергаемую удару поверхность образца прикреплялся мастикой широкополосный пьезодатчик из высокочувствительной керамики $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Сигналы АЭ через аналогово-цифровой

преобразователь АСК-3106 поступали в память компьютера с временным разрешением 40 ns . Импульсы АЭ частотой до 500 kHz подвергались цифровой низкочастотной фильтрации на уровне 80 kHz , чтобы отделить вклад колебаний элементов экспериментальной установки.

Измерения акустического отклика проводились при 1) давлении пресса $Q = 0$; 2) давлении $Q = 0.5Q_{th}$; 3) минимальном давлении $Q < Q_{th}$, при котором образец разрушался при данной энергии удара (эффект триггера). Каждая комбинация статического давления Q и энергии E повторялась 3–5 раз до получения воспроизводимого результата, т.е. генерации близких по интенсивности и продолжительности разверток АЭ.

2. Результаты и обсуждение

Сигнал АЭ регистрировался в течение 2 ms от момента касания бойком поверхности образца. Квадрат амплитуды акустического импульса, A^2 , пропорционален энергии E , выделившейся при образовании микротрещины. Возрастающая сумма энергий импульсов по мере генерации АЭ отражала процесс накопления микротрещин, возникающих после удара бойка. Кривые накопления, построенные при трех указанных выше энергиях удара, приведены на рис. 2–4, на каждом из которых можно видеть развитие повреждения в образцах при нулевом (рис. 2, a –4, a) и двух сжимающих давлениях пресса — равном 0.5 от разрушающего давления в статическом режиме (рис. 2, b –4, b) и некотором давлении $Q < Q_{th}$, приводящем при ударе к фатальному разрушению образца (рис. 2, c –4, c).

Можно видеть, что кривые накопления складываются из трех элементов, которые проявляются в сочетаниях или в единственном числе. Накопление микротрещин на начальном участке кривых, инициированных ударами с энергией 0.06 (рис. 2) и 0.12 J (рис. 3) при давлениях $Q = 0$ и $Q = 0.5Q_{th}$ происходит замедленно, с очень небольшим наклоном кривых. „Заторможенные“ участки (обозначены как зона A на рис. 2) имеют длительность 5 – $10 \mu\text{s}$ и сменяются ускоренным накоплением дефектов — наклон кривых резко увеличивается. Продолжительность фрагмента „быстрого“ роста — 10 – $15 \mu\text{s}$ (зона B). После него идет плавный затухающий рост кривых выхода выделенной микротрещинами энергии (зона C).

Исходя из структуры прочного, но гетерогенного минерала, можно предложить следующую интерпретацию трех стадий развития локального повреждения. „Заторможенность“ начального участка роста микротрещин объясняется некоторой пластичностью пористого материала с минимальными разрывами сплошности. После достижения через 5 – $10 \mu\text{s}$ предела пластической деформации, в течение последующих 10 – $15 \mu\text{s}$ происходит быстрое истощение резервуара условно „слабых мест“ в объеме образца и переход на плавное накопление микротрещин из более стабильных участков.

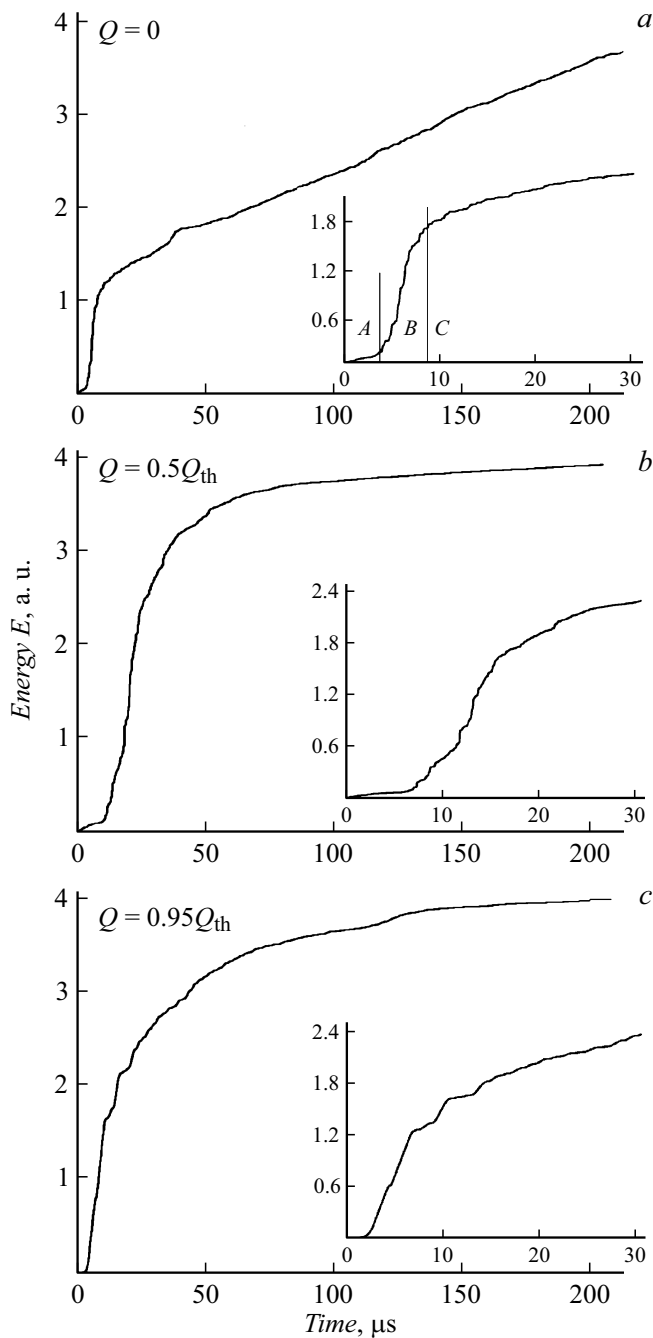


Рис. 2. Здесь и на рис. 3, 4 — кривые выделения акустической энергии при ударном повреждении образцов; на врезках показаны начальные участки кривых в укрупненном масштабе. Энергия удара бойка 0.06 J.

Так же необходимо отметить, что наклон кривых на продолжительном финишном участке ниже при энергии удара 0.006 J (рис. 2, *a, b*), чем при энергии 0.012 J (рис. 3, *a, b*). Следовательно, при более энергичном воздействии накопление микротрещин происходило быстрее.

При нулевом статическом давлении удар бойка оставлял повреждение поверхности с линейным размером

0.5–1 мм. При сжатии образца до давления $Q = 0.95Q_{th}$ при ударе с энергией 0.006 J, а также до давления $Q = 0.9Q_{th}$ при ударе с энергией 0.012 J в образце происходили триггерные срывы с формированием магистральных трещин (за пределами разверток длительностью 2 мс).

При максимальной энергии удара (0.18 J) вариации характера кривых на начальном участке отсутствовали. Кроме того, ломаный ход кривых свидетельствует о менее упорядоченных выбросах энергии вместо монотонного, плавного процесса деградации материала. При давлении $Q = 0.8Q_{th}$ возник мощный триггерный

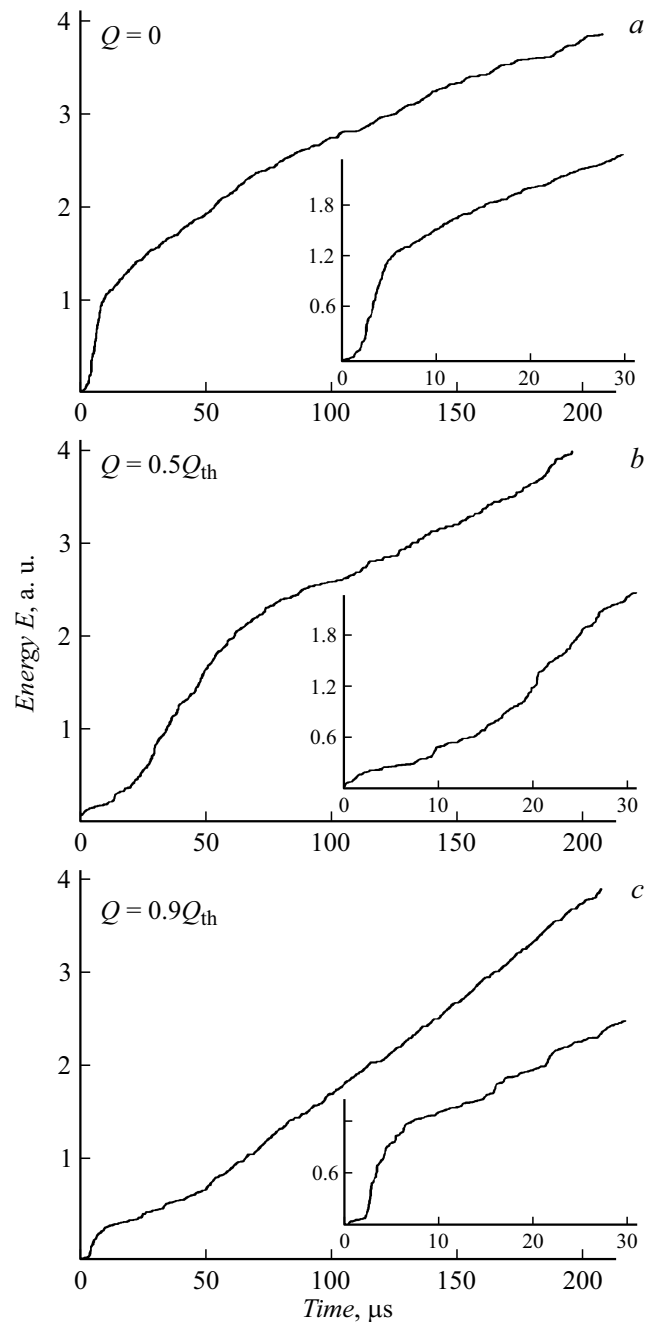


Рис. 3. То же, что на рис. 2. Энергия удара 0.12 J.

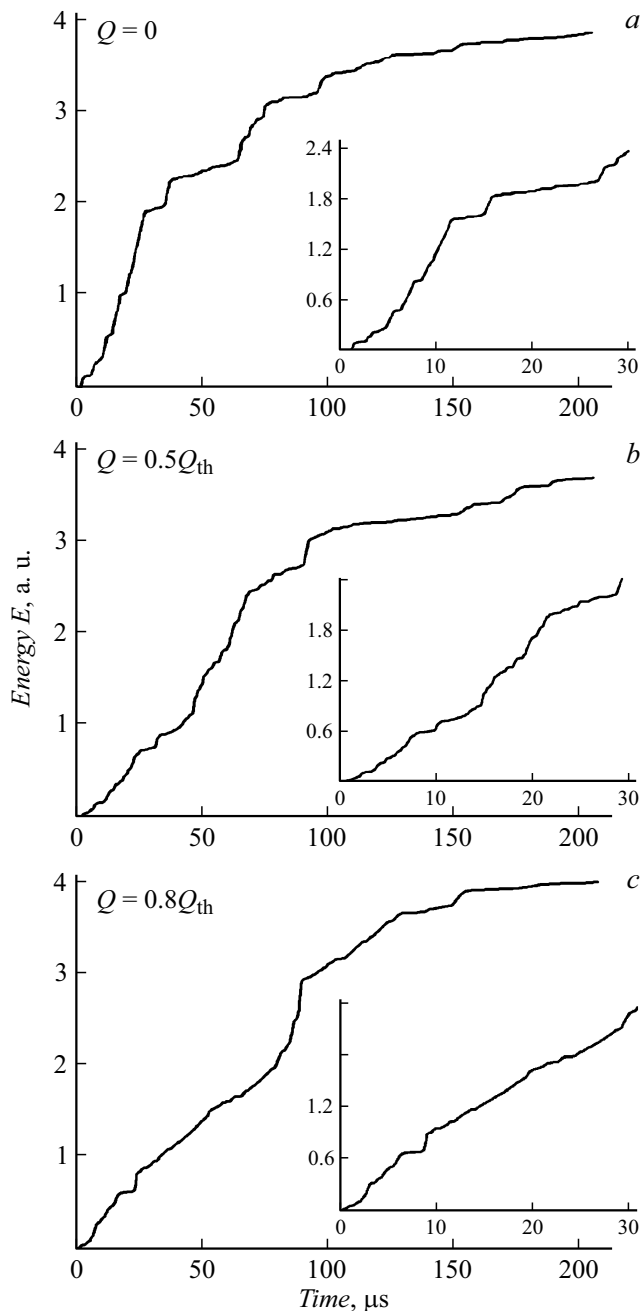


Рис. 4. То же, что на рис. 2. Энергия удара 0.18 J.

эффект — макроскопическое разрушение образца с распадом на мелкие фрагменты.

Заключение

Сравнение кривых накопления энергии образования микротрещин при локальном ударном повреждении гранита при сжимающих давлениях $Q = 0$ и $0.5Q_{th}$ показало, что при этих условиях в режиме выхода энергии можно выделить три стадии:

а) краткое (в данных условиях эксперимента 5–10 μs) незначительное выделение энергии при пластической деформации материала с минимальной деструкцией структуры;

б) интенсивный процесс деструкции за счет разрушения имеющихся „слабых точек“ (10–15 μs);

в) затухающий процесс накопления микротрещин с формированием точечного повреждения поверхности с линейным размером ~ 1 мм.

При увеличении сжатия образцов проявился триггерный эффект: порог катастрофического разрушения падал на 5% при энергии удара 0.06 J; на 10% при 0.12 J и на 20% при 0.18 J. В последнем случае указанных выше переходных процессов не наблюдалось. „Бессимптомная“ инициация развития повреждения указывает на высокую степень опасности поведения объектов, находящихся в зоне воздействия названных выше факторов, способствующих „допороговому“ разрушению.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y. Jin, N. Dyaour, Y. Zheng. *Seismic Record.*, **1**, 66 (2021). DOI: 10.1785/0320210015
- [2] J.C. Lahr, B.A. Chouet, C.D. Stephens, J.A. Power, R.A. Page. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **309**, 139 (1994). DOI: 10.1016/0377-0273(94)90031-0
- [3] C.H. Scholz, Y.J. Tan, F. Albino. *Nature Commun.*, **10**, Article N 2526 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-10605-2
- [4] W. Fan, J.J. McGuire, C.D. de Groot-Hedlin, M.A.H. Hedlin, S. Coats, J.W. Fiedler. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 12909 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-10605-2
- [5] В.В. Адушкин. *Геология и геофизика*, **5**, 709 (2018). DOI: 10.15372/GiG20180510
- [6] А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Шевкунова, В.Г. Подкорытова, О.В. Куприш. *Росс. сейсмологический журн.*, **2**, 88 (2020). DOI: 10.35540/2686-7907.2020.3.08
- [7] T. Chelidze, T. Matcharashvili, V. Mepharidze, N. Dovgal. *Entropy*, **25**, 467 (2023). DOI: 10.3390/e25030467
- [8] А.П. Бобряков. *ФТПРПИ*, **6**, 35 (2013).
- [9] И.П. Щербаков, Х.Ф. Махмудов, А.Е. Чмель. *ФТПРПИ*, **6**, 64 (2022).
- [10] В.А. Новиков, В.И. Окунев, В.Н. Ключкин. *Триггерные эффекты в геосистемах*. Материалы IV Всеросс. конф. с международным участием (6–9 июня, М., 2017), с. 171.
- [11] V.A. Novikov, V.I. Okunev, V.N. Klyuchkin, J. Liu, Yu.Ya. Ruzhin, X. Shen. *Earthq. Sci.*, **30**, 167 (2017). DOI: 10.1007/s11589-017-0181-8
- [12] J. Jiang, G. Su, X. Zhang, X.-T. Feng. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **79**, 3175 (2020). DOI: 10.1007/s10064-020-01760-8
- [13] L.Q. Chen, J.S. Zhang, J.H. Chen, J.G. Chen. *J. Cent. South Univ.*, **48**, 484 (2017). DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2017.02.028
- [14] H. Xu, X.-T. Feng, Ch. Yang, X. Zhang, Y. Zhou, Zh. Wang. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **117**, 90 (2019). DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2019.03.013

- [15] B. Haimson, C. Chang. *Int. J. Rock. Mech. Min.*, **37**, 285 (2000). DOI: 10.1016/S1365-1609(99)00106-9
- [16] S. Stanchits. *Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Australian Centre for Geomechanics* (2008), p. 69. DOI: 10.36487/ACG_repo/808_154
- [17] C.H. Sondergeld, L.H. Estey. *JGR Solid Earth*, **86**, 2915 (1981). DOI: 10.1029/JB086iB04p02915
- [18] X. Lei. *Appl. Sci.* **9**, 2498 (2019). DOI: 10.3390/app9122498
- [19] P.A. Johnson, J. Carmeliet, H.M. Savage, M. Scuderi, B.M. Carpenter, R.A. Guyer, E.G. Daub, C. Marone. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 1559 (2016). DOI: 10.1002/2015GL067056
- [20] X. Liu, M. Pan, X. Li, J. Wang. *Proceedings of the World Conference on Acoustic Emission-2015* (Springer Proceedings in Physics, 179), p. 135.
- [21] L. Griffiths, O. Lengliné, M.J. Heap, P. Baud, J. Schmittbuhl. *JGR Solid Earth.*, **123**, 2246 (2018). DOI: 10.1002/2017JB015191
- [22] X. Jinyong, Ch. Zhanqing, W. Jiangyu. *J. Eng. Geol.*, **29**, 508 (2021). DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2019-473
- [23] X. Lei, S. Ma. *Earthquake Sci.*, **27**, 627 (2014). DOI: 10.1007/s11589-014-0103-y
- [24] G.C. McLaskey, D.A. Lockner. *Int. J. Rock. Mech.*, **110**, 97 (2018). DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.07.001
- [25] P. Tapponnier, W.F. Brace. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr.*, **13**, 1976, 103 (1976). DOI: 10.1016/0148-9062(76)91937-9
- [26] P. Kolář, M. Petružálek, T. Lokajíček, J. Šílený, Z. Jechumtálová, P. Adamová, A. Boušková. *Pure Appl. Geophys.*, **177**, 4271 (2020). DOI: 10.1007/s00024-020-02517-w
- [27] A. Blanke, G. Kwiatek, T.H.W. Goebel, M. Bohnhoff, G. Dresen. *Geophys. J. Int.*, **524**, 1371 (2020). DOI: 10.1093/gji/ggaa524