

# ЭВОЛЮЦИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ

---

Пономарев А.В. ( ), Смирнов В.Б. (1), Фокин И.В. (1, 2), Патонин А.В. (1), Шаталина Е.И. (1), Сергеев Д.С. (2), Леонова А.М. (1), Егоров Н.А. (1)

(1) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

(2) Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

e-mail: avp@ifz.ru

Экспериментально исследована изменчивость проницаемости образцов осадочных и изверженных горных пород (керны диаметром 30 мм и высотой 60 мм) при всестороннем сжатии и одноосном нагружении вплоть до разрушения. Проницаемость определялась на регулярной основе методом стационарного потока флюида (constant flow-rate method) при градиенте давления фильтрующейся жидкости 1 МПа. Значения проницаемости вычислялись на основе закона Дарси в предположении ламинарности потока флюида. Давление всестороннего сжатия поддерживалось на уровне 20 или 30 МПа, а средняя скорость деформирования составляла около  $0.2 \times 10^{-7}$  1/с. Эксперименты выполнялись в режиме ступенчатого нагружения с управлением по величине деформации (strain control), при этом величина деформационных ступеней составляла около  $8.3 \times 10^{-4}$  (смещение поршня прессы 50 мкм). В качестве нагружающих машин использовались сервоуправляемые комплексы GCTS RTR 4500 и Z 1000 ИНОВА. Методика проведения опытов обеспечивала получение полной реологической кривой – от упругой области до формирования узкой зоны микротрещиноватости на этапе деформирования за пределом прочности. В результате были получены оценки динамики изменчивости проницаемости на всем интервале нагружения. Длительность отдельного эксперимента достигала 3 суток, что при частоте измерения проницаемости каждые 40 минут позволяло получить детальную картину изменения этого параметра по мере развития разрушения. Показано, что изменения проницаемости носят закономерный характер для всех типов исследованных пород и определяются, в основном, возникновением и развитием популяции трещин в условиях полного насыщения образцов флюидом. На этапе упругого деформирования проницаемость задаётся первичной структурой породы и незначительно меняется с ростом напряжений. Далее, по мере приближения к пределу прочности и переходу материала к неупругому поведению, проницаемость заметно увеличивается и может возрасти на 1–2 порядка по сравнению с первичной матричной (около 10 мкДа). После образования зоны макроразрушения и падения осевой нагрузки проницаемость почти не меняется, оставаясь на высоких значениях. Естественно предположить, что эти изменения обусловлены образованием и ростом дефектов (микротрещин). Динамика трещинообразования может быть выявлена по наблюдениям за акустической эмиссией (АЭ). Мы исследовали акустические режимы на образцах-близнецах песчаников (вырезанных из одного исходного керна) для сопоставления изменения проницаемости и параметров акустического режима при подготовке макроразрушения. Обнаружено, как и в ранее проведенных опытах, что акустическая активность возрастает на этапе перехода от упругого поведения к пределу прочности, что хорошо коррелируется с изменением проницаемости. Анализ амплитудного распределения АЭ показал, что энергия событий закономерно увеличивается по мере формирования макроразрушения. Это подтверждает реализацию сценария роста размеров трещин и их слияния, приводящего к образованию крупной сложно построенной зоны трещиноватости, которая обеспечивает относительно высокие значения проницаемости при низких значениях акустической активности предположительно за счет роста площади образующихся микротрещин. Возможно, дополнительный вклад в этот сценарий вносит флюидное воздействие, которое понижает прочность деформируемой породы. В таком случае увеличение проницаемости на стадии

слияния и роста трещин может вносить дополнительный вклад в формирование «положительной обратной связи», обеспечивающей согласно концепции ЛНТ лавинообразное развитие процесса разрушения. Исследование эволюции проницаемости по уже сформированной зоне «разлома» в условиях сдвига осложняется неоднородным распределением нормальных напряжений, морфологией рельефа поверхности, скоростью скольжения, величиной сдвигового смещения, процессами залечивания трещин, диффузии флюида и т. д., учёт которых требует специальных экспериментов. Изучение изменчивости проницаемости в трещиноватых, тектонически активных зонах представляет не только фундаментальный, но и прикладной интерес, учитывая эффекты наведённой сейсмичности.

Лабораторные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования ИФЗ РАН.