

ИЗМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И. В. Шатунов^{1,2,*}, Г. Г. Кочарян¹

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

Динамическое воздействие на массив скальных пород приводит к локализации изменения проницаемости в разломных зонах. При этом механизм изменения проницаемости может быть различным. В работе выполнен статистический анализ результатов измерений параметров трещиноватости при крупных подземных взрывах в массивах скальных пород. Показано, что за пределами зоны интенсивного динамического воздействия (приведенные расстояния более $60 \text{ м/кт}^{1/3}$) образование новых трещин во вмещающем массиве практически не происходит. Однако, изменение трещиноватости локализуется на участках структурного ослабления массива: в зонах экзогенной трещиноватости, в местах развития интрузий и тектонических трещин, а также в большей степени в разломных зонах. При этом увеличение трещиноватости в разломах прослеживается на расстояниях до $220 \text{ м/кт}^{1/3}$. Выполнены расчеты изменения эффективной проницаемости разломных зон. Показано, что в приведенных расстояниях от 60 до $130 \text{ м/кт}^{1/3}$ при динамическом воздействии проницаемость за счет подновления трещин в разломных зонах способна возрастать в 5–15 раз по сравнению с исходной, что подтверждается как расчетами, так и прямыми исследованиями поствзрывных фильтрационных свойств массива.

В зоне динамических воздействий малой интенсивности, изменение проницаемости разломных зон может происходить за счет эффекта декольматации – процесса разрушения малопроницаемых коллоидных барьеров в трещинах. Прохождение сейсмической волны достаточной амплитуды приводит к разрушению перемычек из коллоидных пленок и минеральных частиц, закупоривающих трещины, что ведет к резкому увеличению проницаемости и пьезопроводности среды.

Кроме того, резкие перепады порового давления в моменты сейсмической активности создают кратковременные, но мощные потоки флюида. Флюид под высоким давлением буквально «вымывает» кольматант, очищая каналы фильтрации в зоне повреждения.

При землетрясениях, где высокие амплитуды волны напряжений достигаются только в непосредственной окрестности распространяющегося разрыва, эффект декольматации может оказаться весьма существенным. Как показывают оценки, амплитуды волны в несколько бар оказывается достаточным для разрушения барьеров как прямым динамическим воздействием, так и медленной диффузионной волной Био, возбуждаемой на границе зоны влияния разлома (*fault damage zone*). По некоторым сведениям, в момент декольматации коэффициент пьезопроводности может мгновенно увеличиться на 1–3 порядка. Очищенные трещины становятся «магистралями» для мантийных и метаморфогенных флюидов, что может способствовать инициации новых сейсмических событий из-за снижения эффективного напряжения в новых участках разлома.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700824-4).

CHANGES IN THE EFFECTIVE PERMEABILITY OF A FAULT ZONE UNDER DYNAMIC LOADING

I. V. Shatunov^{1,2,*}, G. G. Kocharyan¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

*E-mail: shatunov.iv@phystech.edu

Dynamic loading of rock masses leads to localized permeability changes within fault zones. The mechanisms responsible for these permeability variations may differ. In this study, a statistical analysis was performed using fracture-parameter measurements obtained from large underground explosions in rock masses. It was shown that beyond the zone of intense dynamic loading (scaled distances greater than $60 \text{ m/kt}^{1/3}$), the formation of new fractures in the host rock is negligible. However, changes in fracturing become localized within structurally weakened parts of the massif, including zones of exogenic fracturing, areas affected by intrusive bodies and tectonic fractures, and, most prominently, fault zones. An increase in fracture intensity within faults is observed at distances up to $220 \text{ m/kt}^{1/3}$. Calculations of the effective permeability evolution in fault zones show that, at scaled distances between 60 and $130 \text{ m/kt}^{1/3}$, dynamic loading may increase permeability by a factor of 5–15 relative to its initial value due to fracture reactivation within the fault zone. This conclusion is supported both by model calculations and by direct post-blast investigations of the hydraulic properties of the rock mass. In the zone of weak dynamic loading, permeability changes in fault zones may occur through a unclogging mechanism, i.e., the destruction of low-permeability colloidal barriers within fractures. The passage of a seismic wave of sufficient amplitude may break down bridges formed by colloidal films and mineral particles that clog fractures, resulting in a sharp increase in permeability and hydraulic diffusivity. In addition, abrupt pore-pressure fluctuations during seismic activity generate short-lived but intense fluid fluxes. High-pressure fluids may effectively flush out clogging material, thereby clearing fluid-flow pathways within the damaged zone. During earthquakes, where high stress-wave amplitudes are reached only in the immediate vicinity of the propagating rupture, the unclogging effect may be particularly important. Estimates indicate that wave amplitudes of several bars may be sufficient to destroy such barriers, both through direct dynamic stressing and through the slow Biot diffusion wave excited at the boundary of the *fault damage zone*. According to some studies, the hydraulic diffusivity coefficient may increase instantaneously by 1–3 orders of magnitude during unclogging. Once reopened, fractures may become preferential pathways for mantle and metamorphic fluids, which can promote the initiation of new seismic events through a reduction in effective normal stress on adjacent fault segments.