

ОБ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМАХ ГЕОМЕХАНИКИ¹

© 2026 г. В. Н. Родионов², А. А. Спивак*

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

**E-mail: spivak@idg.ras.ru*

Рассматриваются вопросы, связанные с описанием структуры и динамики деформирования блочной природной среды. Показано, что формирование структуры массивов горных пород и её изменения определяются режимом деформирования. Выделение в массивах горных пород активных структурных блоков не может основываться только на определении их геометрических размеров. Определяющим признаком активной естественной отдельности является наличие в некотором объеме массива динамически равновесной диссипативной структуры, которая соответствует стационарному режиму деформирования. Формулируются основные направления исследований в области геомеханики.

Ключевые слова: массив горных пород, блочное строение, деформация, напряжение, диссипативная структура.

Для цитирования: Родионов В.Н., Спивак А.А. Об актуальных проблемах геомеханики // Динамические процессы в геосферах. 2026. Т. 18. № 1. С. 1–7. https://doi.org/10.26006/29490995_2026_18_1_1

Введение

Изучение механических явлений и процессов, протекающих в недрах Земли и, в частности, в земной коре и в представляющих её массивах горных пород является важным самостоятельным научным направлением в науках о Земле. Сложность строения земного вещества, наличие неравномерно распределенных в пространстве и постоянно изменяющихся во времени нагрузок на среду и отдельные её элементы приводят к необходимости разрабатывать специальные подходы и способы описания закономерностей её поведения [Родионов и др., 1986]. Связанные с этим исследования выполняются в рамках геомеханики – науки, изучающей свойства горных массивов и слагающих их горных пород, а также напряженное состояние массива и процессы его деформирования и разрушения в результате влияния природных и техногенных факторов. При этом следует отметить возрастание неконтролируемого воздействия промышленного производства на природную среду, что ожидаемо может грозить катастрофическими последствиями.

Одним из важных факторов, определяющих поведение массивов горных пород, является их непрекращающееся движение и деформация в поле внешних сил [Кочарян, Спивак, 2003]. В большинстве случаев это медленные процессы, при которых внутренние действующие силы в каждый момент уравновешены. Движения вызываются либо внешними переменными объемными силами, либо нарушением равновесия вследствие, например, разрушения отдельных структурных образований (блоков) или в результате релаксации напряжений во внутренних областях рассматриваемого объема.

¹ Из неопубликованного: авторская версия статьи ноября 2006 г.

² Владимир Николаевич Родионов (1928–2008 гг.) – один из крупнейших специалистов в области физики взрыва и геомеханики, один из основателей Института динамики геосфер РАН, основатель научного направления и первый руководитель научной школы ИДГ РАН «Геомеханика».

В системе внешних действующих сил природного происхождения необходимо в первую очередь выделять силы, вызванные тектоникой, тепловыми потоками, вращением Земли и ее орбитальным движением, а также силы гравитации, в частности, вызванные гравитационным взаимодействием в системе Земля–Луна–Солнце (твердый прилив). Антропогенное воздействие на горные массивы связаны в основном с добычей минерального сырья подземным и открытым способами, добычей углеводородов (нефть, газ), строительством и эксплуатацией водохранилищ, закачкой и захоронением токсичных и радиоактивных отходов промышленного производства. Здесь же необходимо учитывать и воздействия, связанные с проведением взрывов разного назначения – химических и ядерных [Адушкин, Спивак, 1983].

Следует отметить, что при внешних воздействиях неоднородное строение массивов горных пород позволяет изменять форму отдельных его частей за счет дифференциальных подвижек друг относительно друга либо за счет их деформации и разрушения. Возможны случаи, когда реализуются оба механизма. В любом случае следствием могут быть трещинообразование, образование межблоковых границ и изменение структуры массива за счет формирования блочных структур иного масштабного уровня. В случае присутствия свободной поверхности, особенно в горных условиях, возможно развитие рельефообразующих процессов – оползней, обрушения горных пород и образование каменных лавин.

Указанные процессы требуют осмысления, количественного описания и главное – разработки мер, связанных с оценкой устойчивого режима деформирования массива и предупреждением нежелательных необратимых, а в худшем случае катастрофических последствий воздействий особенно антропогенного происхождения. Все это является предметом исследований в рамках геомеханики.

О структуре и механике массивов горных пород

Представления о поведении реального массива горных пород при внешних воздействиях невозможно без учета его строения. Особенность строения любого горного массива заключается в его делимости на отдельные структурные элементы – блоки [Садовский, 1979]. При этом важно, что блочная структура массива характеризуется хорошо выраженной иерархичностью: блок каждого из иерархических уровней представляет собой конгломерат из блоков меньшего размера [Кочарян, Спивак, 2003]. Границы между блоками представлены трещинами разного масштаба, возникновение и формирование которых связано с историей деформирования конкретного горного массива. Возникая в результате деформирования массива, трещины в большинстве случаев пересекаются, в результате чего формируются отдельности (блоки). В отличие от однородных массивов, состоящий из блоков, характеризуется большей подвижностью, поскольку деформация в таком массиве может осуществляться не только за счет деформации отдельности, но и путем смещения отдельностей друг относительно друга. Более того процесс дифференциального смещения соседних блоков энергетически более выгоден.

Здесь важно отметить, что наличие в массивах горных пород залеченных трещин свидетельствует о том, что массив непрерывно претерпевает изменение и возобновление своей структуры на протяжении всей его геологической истории.

Блочная структура горных массивов определяет еще одно их важное качество – анизотропию. Вследствие этого энергозатраты на деформирование блочного массива различны при изменении угла между главными осями тензора деформаций и преимущественным направлением трещин.

Если говорить о законе, описывающем процесс деформирования среды, то можно рассмотреть следующий подход. Изменение формы любого твердого тела связано с преодолением сопротивления тела сдвигу. Это можно сделать, разрушая связи между атомами в кристалле, но вместе с тем это можно сделать, перемещая атомы с места на место один за другим. Подобное происходит само собой около дефектов решетки твердого тела, где нарушается порядок и возникает локальная концентрация сдвиговых напряжений.

Релаксацию сдвиговых напряжений на неоднородностях твердого тела можно истолковывать как поглощение упругой энергии. Рассматривая эти потери при затухании упругих колебаний разной частоты, можно получить распределение поглощающих неоднородностей по их размеру l :

$$l^3 \frac{dn}{d \ln l} = \frac{2}{\pi Q},$$

имея в виду, что поглощение энергии упругих колебаний пропорционально объему неоднородности (l^3) и их числу в единице объема n . Здесь: Q – добротность колебательной системы.

Как свидетельствуют результаты многочисленных опытов, добротность Q реальных твердых тел примерно одинакова в широком диапазоне частот. То есть, добротность Q является характеристикой неупругого тела, которое вмещается в то же пространство, что и упругое тело. Это неупругое тело представлено совокупностью неоднородностей разного размера, релаксирующих сдвиговые напряжения.

Величина сдвиговых напряжений на неоднородностях пропорциональна скорости деформации упругого тела и описывается уравнением:

$$\frac{d\Delta\sigma}{dt} = \mu\varepsilon = v \frac{\Delta\sigma}{l},$$

где: $\Delta\sigma$ – избыточное напряжение сдвига на неоднородностях размера l , ε – скорость сдвиговой деформации, μ – модуль сдвига, v – скорость релаксации.

Поскольку, как показывает эксперимент, величина скорости релаксации изменяется в пределах одного порядка [Родионов и др., 1979], можно при характеристике неупругого тела (совокупность неоднородностей разного размера) считать $v = \text{Const} \approx 2 \times 10^{-6}$ см/с.

При деформировании реальные твердые тела одновременно проявляют свои упругие и неупругие свойства. Так, при малых деформациях и большой скорости деформирования твердое тело упруго и только затухание колебаний свидетельствует о его неупругости. При очень медленном процессе деформирования, когда сумма неупругих объемов становится соизмеримой с объемом всего тела, тело по поведению скорее напоминает вязкую жидкость. Здесь важно отметить, что при медленном деформировании под действием объемных сил изменение свойств твердого тела придает массиву (совокупности отдельных тел) необходимую подвижность для самоорганизации движений и созидательных эволюционных процессов.

Действительно, пусть в твердой среде медленно со скоростью w перемещается твердое тело с поперечным размером L . Действие объемной силы вызовет реакцию – сдвиговые напряжения на поверхности тела и соответствующие скорости деформации, скорость изменения которых составляет $\frac{w}{L}$. Изменение напряжений на неоднородностях при постоянной скорости деформации ($\frac{d\Delta\sigma}{dt} = 0$) также постоянны:

$$\Delta\sigma = \mu \frac{l\varepsilon}{v},$$

где в данном случае $\varepsilon = \frac{w}{L}$.

Отсюда получаем:

$$\frac{\Delta\sigma}{\mu} = \frac{lw}{Lv}.$$

Таким образом, напряжения на неоднородностях пропорционально отношению $\frac{l}{L}$.

Объем максимальной неоднородности l_m в Q меньше объема тела, то есть:

$$\frac{l_0}{L} = \sqrt[3]{\frac{2}{\pi Q}}.$$

При этом объемы неоднородностей для $l < l_0$ в каждом интервале $\frac{\Delta l}{l}$ также составляют величину $\frac{2L^3}{\pi Q}$.

Приведенные выше простые соотношения свидетельствуют о подобии строения неупругих тел. При этом соотношение объема наибольшей неоднородности и объема всего тела определяется величиной добротности Q , причем эти соотношения одинаковы на всех масштабных уровнях. Максимальные сдвиговые напряжения ограничены прочностью, то есть условием сохранения сплошности. Следовательно, скорости движения w также ограничены сверху.

Если принять постоянным соотношение прочности тела к модулю сдвига, что наблюдается для большинства горных пород, то можно оценить максимальную скорость движения твердого тела в твердой среде, принимая: $Q \sim 10^3$; $w/v \sim 0.1$ и $\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \sim 10^{-2}$. В результате можно считать, что максимальная скорость движения не может превышать 10 см/год.

Предельная скорость движения не только разделяет области псевдовязкого движения в среде, но одновременно выделяет из окружающей среды само квазинезависимо движущееся тело с его границами. В большом медленно движущемся теле вследствие его неоднородности могут возникать более мелкие структуры подобных тел. Имея меньшие размеры, они обладают подобной структурой. Однако скорости их движения будут по-прежнему ограничиваться предельными значениями.

Согласованное движение тел субструктурного уровня, которые и определяют собственно структуру на всех масштабных уровнях, очевидно, должно подстраиваться к движению наибольшего по размеру тела – главного источника механической энергии. Такая иерархическая структура распределяет поток энергии, направляя её ко все более мелким структурам. При этом размеры тела L , движущегося с постоянной скоростью w , не играют роли в формировании структуры, поскольку исходное распределение неоднородностей одинаково для всех масштабных уровней.

Формирование блочной структуры в динамике

Возникновение структур неупругих тел обусловлено движением крупных массивных тел под действием объемных сил. При этом формирование блочной структуры происходит при стабильном режиме деформирования. По этой причине можно ожидать, что имеется взаимное соответствие деформационного режима и возникающей блочной структуры. По-видимому, нужно отдельно выделить начальную стадию формирования блочной структуры, когда деформирование путем смещения блоков друг относительно друга дает малый вклад в общий процесс. На этой стадии стационарный режим деформирования определяет кинетику формирования структуры. В дальнейшем структура, сохраняя в «памяти» историю деформации массива, способна стабилизировать деформационный режим на тот период, пока не будут исчерпаны степени свободы, содержащиеся в структуре.

Наличие кинетической и стационарной стадий режима деформирования, а также исчерпание степеней свободы блочной структуры позволяет ввести понятие «возраст структуры» и, таким образом, связать структуры не только с режимом деформирования, который характеризуется скоростью подвода механической энергии к блочному массиву, но также непосредственно со временем в пределах «жизни» структуры.

Итак, медленно перемещаясь в твердой среде, крупные квазинезависимые тела порождают в ней множество тел разного размера и со своей структурой. Утрачивая упругие свойства, они, как и крупное тело движутся в окружающей среде с одинаковой относительной скоростью. По этой причине собственное время их обособленного существования ограничивается временем прохождения пути, равного их собственному размеру. Правильно выстроенная цепочка подобных тел разного возраста

может помочь нам предсказать будущее того крупного тела, которое было родоначальником движения. Тот же результат можно получить, изучая изменения во времени подобного объекта меньшего размера. Время жизни подобных объектов пропорционально их размерам. Действительно, суммарное напряжение сдвига на поверхности движущегося тела растет пропорционально его площади (L^2) и скорости движения $w = L\varepsilon$, то есть пропорционально L^3 . Силы, приводящие в движение тела в поле силы тяжести, также пропорциональны L^3 и величине отклонения плотности от среднего значения. Это определяет подобие структур при равновесии активных сил и сил сопротивления при равных скоростях движения. Все медленно движущиеся тела сохраняют свою структуру на пути, пропорциональном L . Это означает, что обновление или воспроизводство структур будет происходить в телах разного размера пропорционально L .

Подобие формирования структур разного масштаба позволяет оценивать отдаленное «будущее» массивов горных пород, находящихся в условиях внешнего воздействия. К примеру, в инженерной практике можно прогнозировать долговечность тоннелей, проведя предварительно опережающее бурение. В других случаях можно использовать опережающие скважины для оценки изменения состояния горного массива, регистрируя начальные стадии формирования структур неупругих тел.

Возникающие в процессе деформирования твердого тела структуры увеличивают его подвижность и облегчают формоизменение. Одновременно эти структуры участвуют в «переработке» подводимой извне механической энергии в тепловую. При этом, несмотря на участие в «переработке» энергии структур всех иерархических уровней, при заданной скорости деформации всегда выделяются структуры определенного масштабного уровня, около которых энергия диссипирует преимущественно либо наиболее интенсивно – так называемые диссипативные структуры [Родионов, 1979]. Остальные дефекты и неоднородности твердого тела проявляют себя в основном интегрально, принимая участие в изменении упругих и прочностных характеристик среды.

Со сменой деформирования, как это показано выше, изменяется структура, изменяется поведение тела и таким образом возникает новая диссипативная структура. Наиболее заметное проявление диссипативной структуры наблюдается при разрушении материала, когда размер образуемых отдельностей зависит от концентрации напряженных неоднородностей. Разный масштаб диссипативных структур определяет характер поведения твердого тела: одно и то же тело может вести себя как хрупкое или пластичное в зависимости от скорости деформации и исходного распределения в нем дефектов по размеру. Отсюда важный вывод, а именно: с учетом неоднородности напряжений в твердом теле вследствие формирования диссипативной структуры не всегда оправдано использование предела прочности по напряжению в качестве характеристики твердого тела. Более того, разрушение твердого тела может происходить как при нагружении, так и при разгрузке в зависимости от истории его деформирования.

Наличие диссипативной структуры также объясняет, каким именно образом медленное макроскопическое деформирование может влиять на изменение внутренних структур на уровне микрон неоднородностей. Таким образом, выделение в массивах горных пород естественных тел (блоков) не может основываться только на определении их геометрических размеров, например, на основе планиметрирования.

Определяющим признаком естественного субструктурного тела является наличие в некотором объеме диссипативной структуры, которая соответствует стационарному режиму деформирования. То есть, естественное тело – это область пространства, в которой имеет место динамическое равновесие, а именно: получаемая извне энергия расходуется на воспроизводство структуры. Этим определяется чувствительность структуры и режима существования конкретного массива горных пород к тому или иному воздействию. Нельзя судить о величине (масштабе) воздействия путем простого сравнения энергии воздействия с собственными запасами энергии тела. Здесь значительную роль играет устойчивость структуры: если структура легко может перестроиться на другой режим, то даже относительно слабое воздействие на нее может оказаться опасным и привести к нежелательным эффектам.

Заключение

С учетом выше приведенных рассуждений можно сформулировать основные направления и задачи геомеханики, связанные с оценкой долговечности природных горных массивов и создаваемых в них искусственных сооружений, а также установление пределов допустимого воздействия на природные структуры, способные к квазинезависимому деформированию, исключая негативные и катастрофические последствия:

- исследование режимов и особенностей деформирования структурных элементов массивов горных пород и их ансамблей на разных масштабных уровнях;
- определение классификационных признаков структурного строения массивов горных пород по величине возможных необратимых проявлений в результате возмущающих воздействий;
- исследование причинно-следственных связей и количественных зависимостей между структурой массивов, характером деформационных процессов и характеристиками внешних воздействий;
- разработка прямых и косвенных способов определения механических характеристик структурных нарушений горных массивов;
- установление механизмов генерации напряжений на разных масштабных уровнях и их релаксации;
- разработка геомеханических моделей строения и деформирования блочно-иерархических природных сред;
- разработка критериев устойчивости структурно-неоднородных массивов горных пород при разных внешних воздействиях.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках работ, результаты которых в настоящее время используются при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012700798-8).

Список литературы

- Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М. : Недра. 1983. –319 с.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М. : ИКЦ «Академкнига». 2003. – 423 с.
- Родионов В.Н. Диссипативные структуры в геомеханике. Препринт. М. : ИФЗ РАН. 1979. – 24 с.
- Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики. М. : Недра. 1986. – 301 с.
- Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Доклады академии наук СССР. 1979. Т. 247. № 4. С. 829–831.

ON CURRENT PROBLEMS OF GEOMECHANICS

© 2026 V. N. Rodionov, A. A. Spivak,*

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

**E-mail: spivak@idg.ras.ru*

The issues related to the description of the structure and dynamics of deformation of a blocky natural environment are considered. It is shown that the formation of the rock mass structure and its changes are determined by the deformation regime. The allocation of active structural blocks in rock arrays cannot be based solely on determining their geometric dimensions. The defining feature of active natural isolation is the presence of a dynamically balanced dissipative structure in a certain volume of the array, which corresponds to a stationary deformation regime. The main directions of research in the field of geomechanics are formulated.

Keywords: rock mass, block structure, deformation, stress, dissipative structure.