

## Изучение внутренних напряжений горных массивов в рамках упругих слоисто-блоковых моделей с включениями иерархического строения L-го ранга.

О.А.Хачай<sup>1</sup>, А.Ю.Хачай<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геофизики УрО РАН, olgakhachay@yandex.ru

<sup>2</sup>УрФУ ИЕН&М, andrey.khachay@gmail.com

---

### АННОТАЦИЯ

В последние годы интенсивно развиваются новые модели механики сплошных сред, обобщающие классические теории упругости. Эти модели находят применение для описания композитных и статистически неоднородных сред, новых конструкционных материалов, а также для сложно построенных массивов в шахтных условиях. В работе излагается алгоритм распространения акустических волн в рамках активного мониторинга упругих слоисто-блоковых сред с включениями иерархического типа L-го ранга. Получены соотношения для внутренних напряжений и деформаций для каждого иерархического ранга, которые составляют нелокальную теорию упругости. Исследуются существенные отличия нелокальной теории упругости от классической и связь между ними. Характерным отличием теории сред с иерархической структурой является присутствие в явной или неявной форме масштабных параметров, т.е. явная или скрытая нелокальность теории. В работе основное внимание уделяется исследованию эффектов нелокальности и внутренних степеней свободы, отражающихся во внутренних напряжениях, которые не описываются классической теорией упругости и которые могут быть потенциальными предвестниками развития катастрофического процесса в горном массиве.

**Ключевые слова:** внутренние напряжения, иерархическая среда, акустическое поле, итерационный алгоритм моделирования, нелокальная теория упругости, мониторинг тензора напряжений.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интенсивно развиваются новые физические и математические модели материальных сред, которые могут рассматриваться как далеко идущие обобщения классических теорий упругости (Панин В. Е. и др., 1985; Пригожин И., 2001; Кунин И. А., 1975; Шемякин, Е.И. и др., 1986). Наука о пластичности и прочности твердых тел переживает стадию смены парадигмы. В течение длительного времени описание пластической деформации и разрушения твердых тел развивалось в рамках линейных приближений механики сплошной среды (макромасштабный уровень) и физики деформационных дефектов в нагруженном твердом теле (микромасштабный уровень). Однако в последние десятилетия стало очевидным, что деформируемое твердое тело представляет собой многоуровневую иерархически организованную систему, которая должна описываться в рамках нелинейной механики и неравновесной термодинамики (Панин В.Е. и др., 2012)

Рассмотрены фундаментальные проблемы, возникающие при применении второго закона термодинамики к анализу систем на макроскопическом и микроскопическом уровнях. Показано, что неравновесность

состояния системы может стать причиной возникновения в ней порядка и что необратимые процессы могут приводить к возникновению нового типа динамических состояний материи, названных «диссипативными структурами» (Пригожин И., 2001).

Работа Кунина (Кунин И. А., 1975) посвящена сравнительно узкому вопросу: исследованию моделей упругих сред с микроструктурой. Исторически одной из первых моделей упругой среды, которая не может быть описана в рамках классической теории упругости, является континуум Коссера (1909). Однако долгое время мемуар Е. и Ф. Коссера оставался незамеченным, и лишь начиная примерно с 1958—60 гг. стали усиленно развиваться обобщенные модели континуума Коссера: теория ориентированных сред, несимметричная, моментная, мультиполярная, микроморфная и т. п. теории упругости (для краткости мы будем называть их моментными теориями). К настоящему времени опубликовано несколько сот работ, посвященных этой тематике, и их число продолжает быстро возрастать. Попытаемся весьма схематично классифицировать различные нелокальные теории упругих сред. Характеристической чертой всех таких теорий является их явная или неявная нелокальность.

Последняя, в свою очередь, проявляется в том, что теории содержатся параметры, имеющие размерность длины. Эти масштабные параметры могут иметь различный физический смысл: например, расстояние между частицами в дискретных структурах, размер зерна или ячейки, характерный радиус корреляции или сил дальнего действия и т.д. Но всегда будем предполагать, что масштабные параметры малы по сравнению с характерным размером тела. Следует различать случаи сильной и слабой нелокальности. Если «разрешающая способность» модели имеет порядок масштабного параметра, т.е. в рамках соответствующей теории физически допустимо рассмотрение длин волн, соизмеримых с масштабным параметром, то мы будем называть теорию нелокальной, или сильно нелокальной (при желании это подчеркнуть). В таких моделях можно рассматривать элементы среды порядка масштабного параметра, но, как правило, расстояния, много меньшие масштабного параметра, не имеют физического смысла. В нелокальных моделях скорость распространения волн зависит от их длины, поэтому часто употребляется также термин «среда с пространственной дисперсией». Подчеркнем, что нелокальность или пространственная дисперсия могут иметь различное происхождение. Они могут быть обусловлены микроструктурой среды (в частности, дискретностью микромоделей) или приближенным учетом таких параметров, как толщина стержня или пластины. Соответственно можно говорить о физической или геометрической природе нелокальности. О структуре исходной микромоделей «знают» только эффективные упругие модули, но извлечь из них эту информацию, конечно, невозможно. Отсюда следует, что явный учет эффектов микроструктуры и, в частности, внутренних степеней свободы возможен лишь при одновременном учете нелокальности, т.е. последовательная теория упругих сред с микроструктурой обязательно должна быть нелокальной (Кунин И. А., 1975).

В последние годы большое внимание уделяется исследованию пространственного напряженно-деформированного состояния горного массива. Эти исследования ведутся как с целью практического освоения больших глубин с помощью глубоких шахт. Так и с целью изучения напряжений в земной коре. Основное внимание уделяется экспериментальным методам наблюдения за деформациями и перемещениями в горном массиве в окрестности выработок и оценкам напряжений. Развитие инструментальных методов требует основательного проникновения физических представлений в горные науки. Обнаруженный

эффект зональной дезинтеграции горных пород в окрестности подземных выработок на больших глубинах есть одно из естественных состояний горного массива, находящегося под действием гравитационных и тектонических сил (Шемякин, Е.И. и др., 1986). В работе (Тажигаев К.Т., Ташмаматов А.С., 2014, см библиографию) подробно изложена проблема определения остаточных напряжений экспериментальными методами, природа возникновения и сохранности остаточных напряжений в горных породах, металлических конструкциях, многокомпонентных материалах.

### Методика и моделирование

При измерениях напряжений в массиве горных пород методами разгрузки фиксируется суммарный результат деформаций от снятия остаточных напряжений и напряжений внешних сил. Однако для прогнозирования возможного разрушения массива возникает необходимость в разделении напряжений массива на напряжения внешних сил и остаточные внутренние напряжения. При этом вследствие того, что структура массива имеет слоисто-блочный вид с внутренними включениями иерархического типа, которые расположены нелокально, необходимо иметь возможность определять более точно возможный источник внутреннего разрушения, который влечет за собой разрушение по принципу домино. В настоящей работе разработан 2D алгоритм определения внутренних напряжений в рамках акустического мониторинга слоисто-блоковой упругой среды с упругими иерархическими включениями  $L$ -го ранга с использованием продольной и поперечной волны (Хачай О.А., Хачай А.Ю., 2021).

### Выводы

Благодаря использованию модели слоисто-блоковой среды с иерархическими включениями можно с помощью акустического мониторинга определить положение наибольших значений внутренних напряжений, определить тип возникших напряжений и с меньшими усилиями осуществить метод разгрузки горного массива. При необходимости проведения краткосрочного прогнозного мониторинга геодинамических областей и определить более точно положение готовящегося землетрясения в качестве скважинных активных акустических наблюдений надо их настроить на слоисто-блоковую модель с иерархическими включениями, а в качестве наблюдаемого мониторингового параметра использовать значения тензора внутренних иерархических напряжений.

### Литература

Кунин И. А.

Теория упругих сред с микроструктурой, нелокальная теория упругости. М. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1975. – 416с.

Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В.

Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. –254с.

Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В.

Нелинейные волновые процессы в деформируемом твердом теле как многоуровневой иерархически организованной системе. УФН, 2012, т.182, №12, с.1351-1357.

DOI: 10.336//UFNr.0182/201212i.1351.

Пригожин И.

Введение в термодинамику необратимых процессов. Время, структура и флуктуации.

Нобелевская лекция по химии 1977 г. М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – с.123-155.

Тажобаев К.Т., Ташмаматов А.С.

Остаточные напряжения в горных породах и метод их определения. И.Ц “Техник” Бишкек, 2014. –126с.

Хачай, О.А., Хачай А.Ю.

Изучение внутренних напряжений горных массивов в рамках упругих слоисто-блоковых моделей с включениями иерархического строения L-го ранга

DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.47.003>

Мониторинг Наука и технологии 2021, 1, (47), 56-62.

Шемякин, Е.И., Фисенко Г.Л., Курленя М.В., Опарин В.Н. и др.

Эффект зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. ДАН СССР, 1986, т. 289, № 5, с. 830-832.