Недропользование. 2026. Т. 26, № 1. С.1-21. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.1

ISSN 2712-8008
Том / Volume 26 №1 2026
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.831
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2026

Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов: истоки, методы, основные результаты

В.В. Макаров[1], М.А. Гузев[2], В.Н. Одинцев[3]

[1]Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10)
[2]Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук
(Российская Федерация, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7)
[3]Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук
(Российская Федерация, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4)

Geomechanics of highly compressed rocks and massifs: origins, methods, main results

Vladimir V. Makarov[1], Michael A. Guzev[2], Vladimir N. Odintsev[3]

[1]Far Eastern Federal University (10 Ajax village, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation)
[2]Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Applied Mathematics of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences (7 Radio st., Vladivostok, 690041, Russian Federation)
[3]Federal State Budgetary Scientific Institution N.V. Melnikov Institute for Integrated Development of Subsoil Resources
of the Russian Academy of Sciences (4 Kryukovskiy dead end, Moscow, 111020, Russian Federation)

Получена / Received: 01.08.2025. Принята / Accepted: 10.11.2025. Опубликована / Published: 12.01.2026

Ключевые слова:
геомеханика, геосреда, сильно сжатые породы, масштабный и структурный уровни, мезомеханика, неевклидова модель, параметры модели, образец горной породы, массив горных пород.

В статье рассмотрены основные этапы развития геомеханики, имеющей глубокие исторические корни, которые ведут к основополагающим трудам Шарля Огюстена де Кулона 1773 г., через два с половиной столетия давшей научное направление геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов как теории критических состояний геосреды. На основе анализа исторических документов и публикаций выявлены основные этапы развития геомеханики. Кратко освещены результаты последнего периода развития геомеханики сильного сжатия после введения в анализ мезомасштаба разрушения и структурных уровней геосреды. Рассмотрены результаты экспериментальных и аналитических работ по исследованию закономерностей деформирования и разрушения геосреды на первом (образцы горных пород) и втором (породный массив на масштабе горных выработок) структурных уровнях. Установлены реверсивный характер линейных деформаций в околоочаговой области подготовки макроразрушения образцов горных пород в предразрушающей стадии нагружения и закономерности формирования и развития мезотрещинных структур контрастного типа в этих условиях. Установлены также зональный характер деформирования массива вокруг глубоких горных выработок и закономерности формирования и развития мезотрещинной зональной структуры разрушения для разных типов массива. Экспериментальные исследования сопровождаются описанием поставленных и решенных задач механики сплошных сред с дефектами, приводящих к неевклидовому описанию моделей геосреды. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований и показано их полное качественное и хорошее количественное соответствие. В заключение рассмотрены объект, предмет, принципы и методы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов, выделяющие эту область геомеханики в самостоятельное научное направление как объединение традиционной геомеханики и физической мезомеханики.

Keywords:
geomechanics, geoenvironment, highly compressed rocks, scale and structural levels, mesomechanics, non-Euclidean model, model parameters, rock sample, rock massif.

This article examines the main stages in the development of geomechanics, which has deep historical roots, leading back to the seminal works of Charles Augustin de Coulomb in 1773. Two and a half centuries later, this work gave rise to the scientific field of geomechanics of highly compressed rocks and massifs as a theory of critical states of the geoenvironment. Based on an analysis of historical documents and publications, the main stages in the development of geomechanics are identified. The results of the most recent period of development of geomechanics of high compression, following the introduction of the mesoscale of failure and structural levels of the geoenvironment, are briefly discussed. The results of experimental and analytical studies investigating the patterns of deformation and failure of the geoenvironment at the first (rock samples) and second (rock mass at the scale of mine workings) structural levels are considered. The reversible nature of linear deformations in the near-focal zone of macrofracture preparation of rock specimens during the pre-fracture stage of loading and the patterns of formation and development of contrasting mesofracture structures under these conditions are established. Zonal deformation of the rock mass around deep mine workings and the patterns of formation and development of the mesofracture zonal structure of failure for different rock mass types are also established. The experimental studies are accompanied by a description of the posed and solved problems of continuum mechanics with defects, leading to a non-Euclidean description of geoenvironment models. The results of theoretical and experimental studies are compared, demonstrating their complete qualitative and good quantitative agreement. In conclusion, the object, subject, principles, and methods of geomechanics of highly compressed rocks and massifs are considered, distinguishing this area of geomechanics as an independent scientific field as a unification of traditional geomechanics and physical mesomechanics.

Макаров Владимир Владимирович (Author ID in Scopus: 22835820400, ORCID: 0000-0002-5335-4836) – доктор технических наук, профессор, e-mail: makarov.vv@dvfu.ru. Контактное лицо для переписки.
Гузев Михаил Александрович (Author ID in Scopus: 55976318100, ORCID: 0000-0001-9344-154X) – доктор физико-математических наук, академик, e-mail: guzev@iam.dvo.ru.
Одинцев Владимир Николаевич (Author ID in Scopus: 6602223002, ORCID: 0000-0001-5740-2703) – доктор технических наук, e-mail: odintsev.v@ipkonran.ru.

Vladimir V. Makarov (Author ID in Scopus: 22835820400, ORCID: 0000-0002-5335-4836) – Doctor of Science, Professor, e-mail: makarov.vv@dvfu.ru. The contact person for correspondence.
Michael A. Guzev (Author ID in Scopus: 55976318100, ORCID: 0000-0001-9344-154X) – Doctor of Science, Academician, e-mail: guzev@iam.dvo.ru.
Vladimir N. Odintsev (Author ID in Scopus: 6602223002, ORCID: 0000-0001-5740-2703) – Doctor of Science, e-mail: odintsev.v@ipkonran.ru.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Макаров, В.В. Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов: истоки, методы, основные результаты / В.В. Макаров, М.А. Гузев, В.Н. Одинцев // Недропользование. – 2026. – Т.26, №1. – С. 1–21. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.1

Please cite this article in English as:
Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N. Geomechanics of highly compressed rocks and massifs: origins, methods, main results. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2026, vol.26, no.1, pp. 1-21. DOI: 10.15593/2712-8008/2026.1.1

Введение. Истоки зарождения геомеханики (1773)

Зарождение геомеханики имеет глубокие исторические корни и связывается с именем Шарля Огюста Кулона, первым рассмотревшим вопросы теоретических расчетов наземных конструкций в связи с собственными разработками по теории прочности грунтов [1; 2]. В представленном им Парижской Академии наук мемуаре в марте (первая часть) и апреле (вторая часть) 1773 г. наряду с другими он предложил расчет контрбатарейной стенки, основанный на схеме разрушения грунтового образца сдвигом при действии сжимающих напряжений (рис. 1). Представленный доклад послужил основанием для представления Кулона к званию члена Академии и последующим его работам по трибологии и теории электромагнитного поля, сделавшим его имя достойным для включения в список 72 величайших умов Франции, расположенный на первом этаже Эйфелевой башни.

Одновременно и независимо от Кулона в том же 1773 г. Пьер-Симон Лаплас был введен в звание адъюнкта Парижской Академии и спустя 23 года предложил первую модель образования и развития Земли, известную как «гипотеза Канта-Лапласа» [3].

Кроме того, 1773 г. был отмечен публикацией по геологии немецкого исследователя Абраама Готтлоба Вернера, написавшего свой первый учебный курс минералогии и годом позже его издавшего. А.Г. Вернер впоследствии ввел термин «геогнозия», эквивалентный «геологии», разработал теорию нептунизма о происхождении горных пород и таким образом входит в ряд «отцов» геологии [4; 5].

Таким образом, 1773 г. дал начала как геомеханике, так и двум другим основополагающим наукам о Земле: геологии и теории образования планеты Земля, бурное развитие которых началось в XIX в.

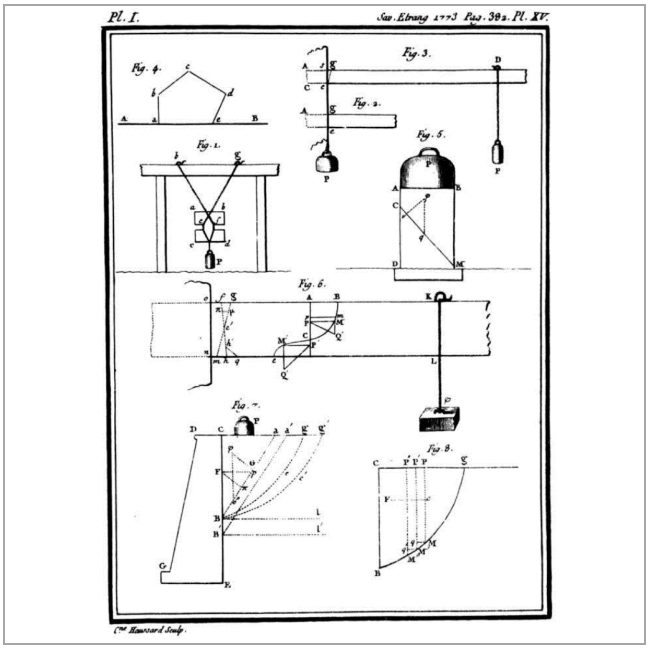


Рис. 1. Схемы разрушения образца грунта по Кулону, расчета контрбатарейной стенки и др. [2]

Развитие геомеханики (1773–1925)

«Геомеханический» мемуар Кулона долгое время не был замечен, и только в 1802 г. Р. Прони, писавший о разрушении грунтов, сослался на него как на первенствующего предшественника [6; 7]. Непосредственно же в строительстве наземных сооружений инженеры предпочитали придерживаться традиционных подходов определения параметров конструкций по стандартным таблицам [8; 9].

Введенное Кулоном понятие «сцепления» при оценке прочностных свойств пород и грунта приобрело всеобщее признание, а представление Отто Мором кулоновской прочностной теории в геометрической форме «кругов Мора» [10] позволило ей в дальнейшем развиваться как «теории прочности Кулона – Мора» [11].

Продолжались также теоретические и экспериментальные работы по применению методов механики к расчету параметров наземных и подземных конструкций, что заняло продолжительный отрезок времени вплоть до 1925 г., когда в трудах К. Терцаги [12] это движение не завершилось созданием «Механики грунтов» [9; 13].

Развитие геомеханики в XX в.: от механики грунтов к механике горных пород (1925–1962)

Развитие механики грунтов носило сложный и, подчас, драматичный характер. Будучи экспериментатором, К. Терцаги не учитывал результаты уже набиравшей силу теории пористых сред, где пионером был П. Филлунгер [14],



Рис. 2. Учредительное собрание Международного общества механики горных пород (ISRM), Зальцбург, 25 мая 1962 г. Голосование [18]

имевший к тому времени уже ряд публикаций в этой области [15]. Спор за первенство, развернувшийся между Терцаги и Филлунгером, закончился трагически для последнего: не получив поддержки руководства Венского технического университета, где оба оппонента работали в 1937 г., он покончил с собой.

Потеря «теоретического крыла» крайне негативно отразилась на развитии механики грунтов, которая во многом долго оставалась по сути эмпирическим направлением механики. Тем не менее, введение в расчеты строительных конструкций характеристик реальных грунтов, разработка экспериментальных методов их определения как в лабораторных, так и в натурных условиях – все это способствовало развитию геомеханики и во многом успешному применению ее методов при возведении наземных и подземных сооружений.

Создание в 1936 г. Международного общества механики грунтов как нельзя более полно отражало успехи этой науки в ее приложениях. Так продолжалось до 1959 г., когда крупные аварии: разрушение плотин в Мальпассе во Франции [16], в Вега-де-Тера в Испании [17] и на других сооружениях,

показали, что выход на масштабные проекты, связанный с вовлечением в расчеты свойств горных массивов, требует и более полного учета этих свойств.

Здесь большую организующую роль сыграл ученик К. Терцаги Леопольд Мюллер [18]. Будучи также учеником основателя Инженерной геологии И. Стини, Мюллер хорошо знал особенности блочного строения массива горных пород и установил принципиальное отличие свойств пород в образце и массиве [19]. Это явилось отправной точкой в создании им Международного общества механики горных пород (ISRM) в 1962 г. (рис. 2) [18].

От механики горных пород к нелинейной геомеханике (1962–1986)

Последовавшее затем бурное развитие механики горных пород позволило установить различие прочностных и деформационных свойств образцов и массивов, применить к расчету подземных сооружений, в том числе и глубоких, методы механики деформируемого твердого тела, сделать механику горных пород равноправным разделом общей механики, имеющим собственный объект, предмет и как теоретические, так и экспериментальные методы исследований.

Особенно важным был возврат теоретических исследований механики горных пород к результатам П. Филлунгера, безвременная кончина которого затормозила это направление практически на 30 лет. Развитие же механики сплошной среды с дефектами типа пор и трещин позволяло расширить круг классических моделей механики сплошной среды [20]. Были рассмотрены как основные подходы к моделированию сред с нарушением сплошности, так и введены понятия представительного объема и эквивалентности свойств модели и массива [21]. Принципиальным шагом стало введение представлений об иерархичности блочного строения массива [22], а двухстадийная модель разрушения Журкова – Куксенко поставила принципиально вопрос о моделировании предразрушающего состояния геосреды, где за стадией хаотического растрескивания и появления невзаимодействующих дефектов среды наступала стадия локализации и условий их взаимодействия [23; 24].

Эти результаты и стали тем фундаментом, опираясь на который появилась возможность, в конечном счете, описать новые экспериментальные данные, полученные в результате исследований закономерностей деформирования и разрушения пород массива в условиях больших глубин. Установление зонального характера разрушения массива вокруг глубоких горных выработок (рис. 3) стало решающим фактором, определившим новый этап развития геомеханики, как теории критических состояний геосреды [25]. Классические решения теории упругости, а также упругопластические задачи предполагают наличие не более одной контурной зоны разрушения, за которой следует «нетронутый» массив, где напряжения изменяются монотонно [26]. Поэтому остро встал вопрос о необходимости теоретического описания установленного явления.

Авторы открытия [27] попытались сделать это с позиций классической механики, введя «теорию ложных контуров», однако вскоре вынуждены были отказаться от нее [28]. Все это указывало на необходимость привлечения новых теоретических представлений о работе блочных сред в условиях высоких сжимающих напряжений. И такие представления одновременно и независимо были разработаны В.Е. Паниным в области «Физической мезомеханики» [29].

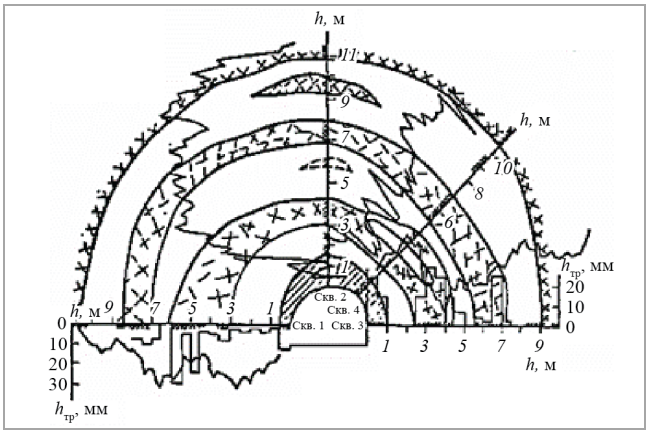


Рис. 3. Зональное разрушение массива (зональная дезинтеграция) [25]

Нелинейная геомеханика и мезомеханика (1986–2007)

Физическая мезомеханика кристаллических сред с дислокациями и дисклинациями (1982–1998). В 1983 г. увидела свет книга “Gauge Theory of Dislocation and Disclination”, в которой авторы А. Кадич и Д. Эделен [30] предложили применить калибровочный формализм Янга – Миллса, развитый в физике элементарных частиц, для построения сплошной среды с дефектами типа дислокаций и дисклинаций. Новаторский характер предложенной теории заключался в том, что в модели сплошной среды информация о ее свойствах представлялась не в результате усреднения свойств представительного объема реальной среды с нарушениями сплошности, а через калибровочное поле, допускающее интерпретацию в терминах пластических деформаций. Это сразу позволяло учесть условия взаимодействия дефектов реальных кристаллических тел и избавляло от необходимости процедуры усреднения их свойств.

Применение калибровочного формализма Томской школой физиков [29] привело к необходимости исследовать систему уравнений типа Максвелла для сильно возбужденных кристаллических сред и, как следствие, волновым полям пластических деформаций, что подтверждалось результатами экспериментов. Таким образом, введение в теорию промежуточного мезоуровня между микро- и макроуровнями дефектов оказалось весьма продуктивным для разработки методов управления свойствами материалов, находящихся в условиях экстремальных воздействий. Это позволило В.Е. Панину выдвинуть в 1998 г. концепцию «Физической мезомеханики» [31, 32]. Оставалось понять, как эти идеи могут быть распространены на горные породы и массивы.

Представления мезомеханики в приложении к процессам разрушения геосреды. Появление «Физической мезомеханики», как научной дисциплины, изучающей и моделирующей мезоуровень среды с дефектами, заставило пересмотреть подходы к построению адекватных математических моделей геосреды. Первая попытка создания новой модели к вышеописанному явлению «зональной дезинтеграции» массива горных пород вокруг глубоких выработок была реализована в 1997–2000 гг. в Трудах XI Российской конференции по механике горных пород [33; 34], где творческий коллектив механиков и геомехаников объединил свои усилия. Следует заметить, что в работе 1997 г. авторы еще использовали калибровочный формализм, и только в [34] для

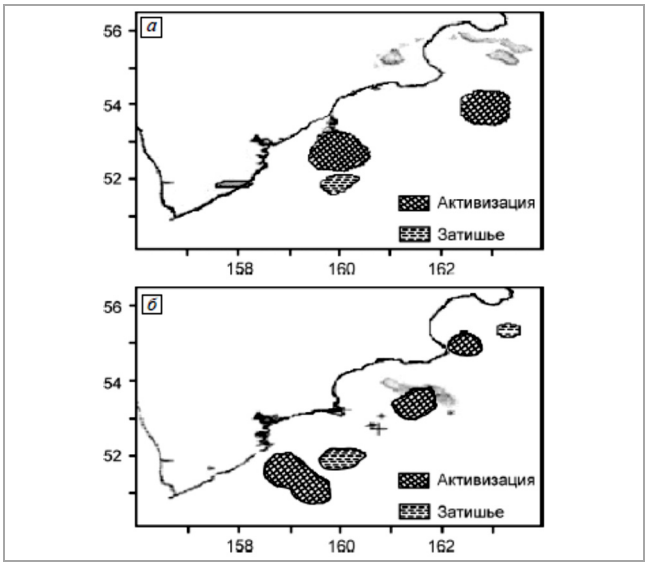


Рис. 4. Мезоструктуры «контрастного» типа по С.В. Гольдину [36]

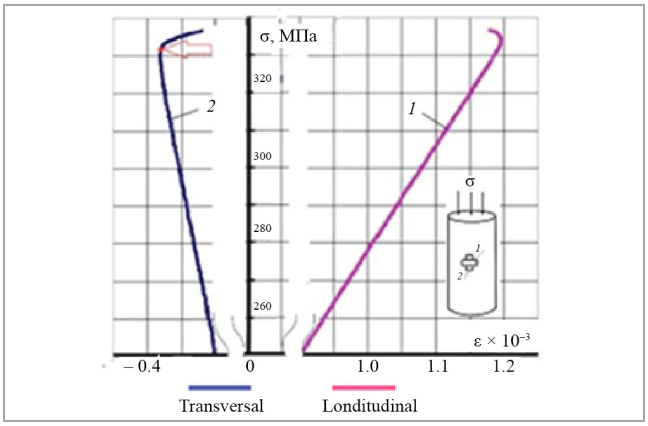


Рис. 5. Реверсивный характер линейных деформаций в предразрушающей области нагружения

описания дефектов было предложено отказаться от классической кинематики. Это означало невыполнение условий совместности Сен-Венана и, после естественной реализации формализма неравновесной термодинамики, приводило к определяющим соотношениям модели.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало их хорошую сходимость и позволило затем перейти к исследованию закономерностей зонального разрушения массива вокруг глубоких выработок [35]. Одновременно был показан неевклидовый характер пространства модели, поскольку *R*-функция представляла собой след тензора Римана.

Другим приложением мезомеханических представлений к процессам разрушения геосреды стали работы С.В. Гольдина [36]. Было показано, что области подготовки сейсмических событий представляют собой мезоструктуры «контрастного» типа (рис. 4), где сейсмически активные зоны чередуются с зонами акустического затишья, составляющими с ними единый процесс.

Важным направлением приложения мезомеханики к вопросам деформирования и разрушения геосреды стала работа томской школы мезомеханики, возглавляемая П.В. Макаровым [37]. В результате теоретических и экспериментальных исследований был показан иерархический характер разрушения геосреды, показано соответствие блока породного массива условиям формирования мезоструктуры и разработаны математические модели мезотрещинного процесса геосреды. Обобщением представленных работ было представление о нелинейном характере деформирования и разрушения геосреды.

Представление о нелинейном характере напряженно-деформированного состояния блочного массива в условиях больших сжимающих напряжений было также отражено в работах первооткрывателя явления зонального разрушения массива вокруг глубоких выработок В.Н. Опарина [38]. На основе проведенных экспериментальных исследований было показано закономерное увеличение количества зон с глубиной, сделаны попытки объяснения причин возникновения «зональности», введено представление о «маятниковых» волнах. Это явилось предпосылкой организации В.Н. Опариным совместного с исследователями из КНР ежегодного семинара, 12 первых заседаний которого были проведены с его активным участием [39].

Геомеханика сильно сжатых горных пород (2007)

Одновременно и независимо с вышеприведенными исследованиями, в 2007 г. вышла первая монография, где двое авторов из представляющего эту статью коллектива ввели термин «сильного сжатия», обобщающего условия возникновения мезотрещинных структур в массиве горных пород и образцах [40]. Термин был предложен по аналогии с «сильным возбуждением» кристаллических сред в мезомеханике.

Понятие сильно сжатых горных пород и массивов было использовано не только для описания зонального разрушения массива вокруг глубоких выработок, но и для аномальных явлений деформирования образцов горных пород. Был установлен «реверсивный» (с отрицательным приращением линейных деформаций) характер локального деформирования образцов при одноосном сжатии и установлен его механизм (рис. 5) [41].

Экспериментальные исследования закономерностей деформирования вмещающих пород показали, что не только разрушение вокруг глубоких выработок носит зональный характер, но и деформации вмещающих пород носят осциллирующий характер. Кроме того, были выделены две стадии деформационного процесса, следующего за созданием породных обнажений: формирования и развития деформационных зон. На стадии формирования в зонах разрушения происходит дилатансионное увеличение объема горных пород, в то время как промежуточные зоны характеризуются контракционным процессом.

Был также установлен зональный характер разрушения массива вокруг выработок, подвергшихся воздействию горных ударов: по данным бурения скважин, анализ выхода керна по буровой мелочи соответствовал зонам разрушения, в то время как промежуточные зоны характеризовались дискованием керна.

Моделирование состояния сильного сжатия горных пород и массива было проведено с использованием неевклидовых моделей латентных напряжений. В рамках этой модели дано решение задач о распределении поля напряжений вокруг горных выработок, расположенных в массиве с развитой дефектной структурой, а также решение задач о распределении поля напряжений в образце при сжатии.

Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов: результаты исследований (2007–2025)

Издание первой монографии [40] с упоминанием состояния «сильного сжатия» горных пород подводило итог предыдущему 10-летию исследований и давало начало новому научному направлению. С позиций представленных в книге результатов экспериментальных и теоретических исследований «аномальные» в традиционной геомеханике явления «зонального деформирования и разрушения» массива вокруг горных выработок и «реверсивный» характер линейных деформаций породных образцов приобретали закономерный характер.

Необходимыми представлялись следующие шаги в разработке общей теории, такие как введение мезомасштаба в модели сдвиго-отрывного разрушения горных пород и массивов, а также структурирование геосреды в соответствие с ее блочной иерархией.

Масштабные уровни разрушения горных пород и массивов. Методы «Физической мезомеханики материалов», ставшей имманентной частью геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов, требуют, в первую очередь, введения представлений о мезоуровне разрушения горных пород и массивов, являющемся неотъемлемой составляющей на всех структурных уровнях геосреды [42].

В этой связи представляет интерес рассмотрение процесса разрушения хрупких горных пород, имеющих зернистую структуру, на структурном уровне образца в условиях неравнокомпонентного сжатия [43–46]. При традиционном подходе исследование отрыва при сжатии сводится, главным образом, к моделированию микротрещин отрыва и последующему взаимодействию нескольких трещин [47–54], что явно недостаточно для описания макроразрушения пород.

Модель отрывного макроразрушения должна отражать не только процесс формирования макротрещин вследствие слияния микротрещин, порожденных порами и микротрещинами проскальзывания (sliding cracks) [55], но и новые идеи понимания механизма образования трещин на мезоуровне. В материалах с зернистой структурой можно выделить следующие масштабные уровни, на которых происходит разрушение материала (рис. 6) [42].

В области активного микроразрушения (FPZ-зоне – I) образуются множественные сдвиговые микротрещины на границах зерен. Часть микротрещин объединяется в более протяженные микротрещины различной ориентации, размер которых может составлять сотни микрон. Образование микротрещин в некотором объеме ведет к локальному перераспределению напряжений и соединению микротрещин, в результате чего в условиях бокового стеснения формируется область разрушенного материала (зона II). Эта область фактически является «мягким дилатирующим включением», которое существенно изменяет вблизи себя напряженное состояние. Это включение трансформирует напряжения, действующие вдоль трещины, в напряжения, действующие в перпендикулярном направлении. В линейно-упругом приближении величину этих напряжений можно линейно связать с внешней нагрузкой, действующей вдоль трещины [56].

Появление напряжений, действующих в перпендикулярном направлении, математически можно описать введением псевдоусилий, которые действуют нормально направлению развития трещины (см. рис. 6). Таким образом, в анализе процесса

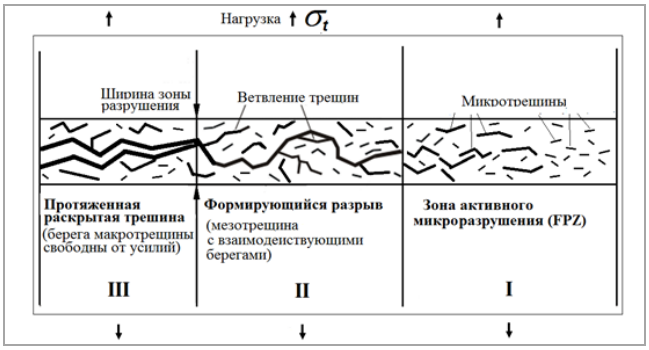


Рис. 6. Схема к механизму разрушения отрыва при сжатии [42]

развития трещины в области II рассматриваем разрыв, на берегах которого задана условно распирающая нагрузка. В целом, этот разрыв можно определить как мезотрещину, характерная особенность которой состоит в том, что, во-первых, она имеет неполное расхождение берегов по своей длине и, во-вторых, на ее берегах задается распирающая нагрузка.

С ростом внешней нагрузки длина мезотрещины увеличивается, следовательно, увеличивается и расхождение берегов. Наконец, при критическом расхождении, берега мезотрещины перестают активно взаимодействовать, и распирающая нагрузка исчезает (зона III). Таким образом, видимую макротрещину отрыва при сжатии математически можно представить разрезом с заданным (критическим) расхождением берегов, где величина расхождения берегов определяется размером соответствующих крупных зерен.

В целом, для математического описания развития трещины отрыва при сжатии необходимо рассматривать три масштабных уровня: (I) – микро, (II) – мезо, (III) – макро. При этом следует учитывать следующее:

1. На различных масштабных уровнях реализуется различный механизм деформации и разрушения материала, что предполагает использование различных граничных условий по напряжениям и смещениям для этих уровней.

2. В качестве критерия перехода с одного масштабного уровня на другой целесообразно использовать геометрический критерий соответствующего критического расхождения берегов, поскольку он связан со структурой геоматериала.

3. Задаваемыми параметрами в задаче являются величина нагрузки сжатия, модуль упругости, коэффициент Пуассона материала, величины критического расхождения берегов для каждого уровня, а также теоретическая прочность материала на разрыв и параметр линейной связи величины внешнего сжатия материала и распирающей нагрузки.

4. С каждым масштабным уровнем связываются определенные параметры, при этом общее количество параметров должно быть таким, чтобы имелась возможность однозначного определения величин параметров из решения задачи, включая зависимость длины квазиравновесной макротрещины от сжимающей нагрузки, как определяющее условие развития трещины.

Критерии перехода с одного уровня на другой связаны с различными параметрами структуры в микромасштабе и в масштабе крупных зерен неоднородности. Значения параметров, вообще говоря, можно оценить по визуальным исследованиям структуры разрушения пород с помощью электронного микроскопа. Величину сил распирания для конкретной породы можно оценить из обратного анализа условий

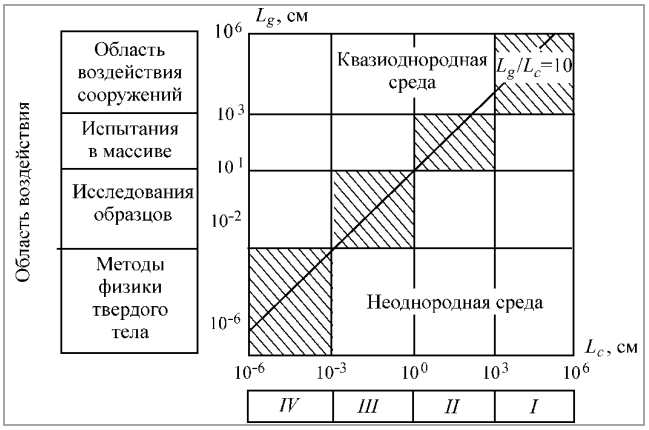


Рис. 7. Диаграмма структурной неоднородности горных пород в массиве: L_c – линейный размер элементов неоднородности; L_g – размер области воздействия (размер образца, размер зоны гидродинамического воздействия при опробовании скважин и т.п.) [61]

начала динамического развития трещины при разрушении образцов в процессе их однородного одноосного сжатия. Из наших оценок следует, что для многих пород усредненная величина псевдоусилий распирания составляет около $0{,}2 \div 0{,}4$ от действующих напряжений одноосного сжатия.

Постановка и решение математической задачи о развитии трещины отрыва при сжатии описаны в [42]. Из решения задачи следует, что структурные параметры микро- и мезомасштаба входят во все определяющие соотношения модели, даже для случая протяженной макротрещины, которая развивается за счет автономного движения ее конца. Автономно сдвигающийся конец макротрещины при ее росте является мезотрещиной определенной, установившейся длины. Введение в рассмотрение мезотрещины, то есть переходной зоны между зоной микроразрушения (зоной силового сцепления структурных элементов) и макротрещиной (объектом, поведение которого определяется макропроцессами в породе и массиве пород), позволяет проанализировать условия перехода растущей трещины в неустойчивое состояние. Такой подход позволяет также разделить «внутренние» процессы в породе, которые подготавливают образование макротрещины, и последующую реакцию макротрещины на условно внешние геопроцессы. В рамках такого подхода нет необходимости вводить «начальный» дефект – трещину, для объяснения причины развития макроразрушения, как это обычно принимается в механике разрушения.

Условность масштаба мезоуровня определяется, прежде всего, тем, что этот уровень разрушения геосреды присущ всем ее структурным уровням неоднородности, о которых речь пойдет ниже. Мезоуровень по отношению к исходному, рассматриваемому структурному уровню – это масштабный уровень макроразрушения предшествующего, более низкого ранга, на котором в рамках другой физической модели исследуется и описывается подготовка изменений на исходном, более крупном масштабном уровне.

Структурные уровни разрушения горных пород и массивов. Сформулированные выше представления о масштабных уровнях разрушения геосреды рассмотрены на примере первого структурного уровня – образца горных пород. В результате реализации макропроцесса разрушения формируется блочная среда следующего структурного уровня, где процессы повторяются с формированием блочности новой размерности и так далее, вплоть до размерности тектонических плит [57].

Вместе с тем, рассмотренная выше (Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко, М.А. Садовский (1987)) иерархичность размеров блоков с масштабным множителем, величина которого колеблется от 1,4 до 3 [28; 52], приводит к ступенчатой иерархии до нескольких десятков уровней, что делает задачу построения континуальной модели геосреды практически нерешаемой [58].

В то же время такая задача является приоритетной для геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов [59]. В случае традиционных методов построения континуальной модели среды с дефектами, как это рассматривалось в [52], вводится понятие «представительного объема» и, в соответствии с требованиями механики неоднородных сред, производится усреднение свойств реального трещиноватого блочного массива, после чего становится возможным рассматривать полученный «эффективный» континуум как сплошную среду с теми же свойствами, что и исходная дефектная [60].

Однако такой подход, во-первых, наталкивается на наличие четырех структурных уровней неоднородности массива горных пород, отмеченных в структурной геологии [61], что затрудняет определение масштаба усреднения. Во-вторых, усреднение характеристик геосреды приводит к исчезновению из анализа мезотрещинных структур, исследованию свойств которых и должна послужить разрабатываемая континуальная модель. И, наконец, перечень трудноразрешимых проблем замыкает упомянутое количество моделей, соответствующих каждому иерархическому уровню блоков и достигающих нескольких десятков.

Альтернативный способ построения континуума предлагается «Физической мезомеханикой материалов», где дефектные структуры, образованные дислокационными ансамблями кристаллов, описываются калибровочными моделями физики пластичности [44; 45]. Однако непосредственное применение таких моделей для описания мезотрещинных структур в иерархически блочной среде – от образца горных пород до горных выработок и далее коры – требует введения понятия структурного уровня геосреды.

Введение структурных уровней геосреды обусловлено, с одной стороны, результатами структурной геологии, где определены четыре уровня неоднородности в пределах земной коры в зависимости от линейных размеров элементов неоднородности (длины трещин в системах, размера породных блоков и т.п.) [61]. Возникающая при этом иерархическая структура предполагает качественное различие между уровнями неоднородности (рис. 7), в связи с чем разрабатываемая модель должна быть многоуровневой [42; 62].

С другой стороны, калибровочные модели мезомеханики должны быть ориентированы на какой-либо один из многочисленных дефектов кристаллической среды, как это показано в работе [63]. Причем введение многоуровневой модели предполагает наличие такого типа дефекта на всех ступенях градации модели, что может быть зафиксировано в дальнейшем как «принцип Панина».

Типичным видом разрушения горных пород и массивов является сдвиго-отрывная трещина, определяющая аномальный по отношению к разрушению грунта вертикальный характер развития при одноосном сжатии [46; 64]. Типичный вид сдвиго-отрывного разрушения на уровне образца горной породы показан на рис. 8. Рассматривая, далее, минеральное зерно как блок, легко перенести сдвиго-отрывной механизм разрушения на следующие иерархические уровни блочной геосреды, что и находит подтверждение в многочисленных структурно-геологических исследованиях [57].

Завершающим шагом на пути выделения структурных уровней геосреды, относительно которых возможна разработка многоуровневой континуальной модели, является введение мезомасштаба, как это было рассмотрено выше. Будем рассматривать микро-, мезо-, макромасштабное деление следующим образом, определенным иерархически-блочным строением геосреды и сдвиго-отрывным характером ее разрушения, где междублоковые сдвиговые перемещения, показанные на рис. 8, вызывают возникновение отрывных трещин, также распространяющихся, главным образом, по границам блоков. Микромасштабные дефекты будем рассматривать как внутриблочные, мезомасштабные сдвиго-отрывные трещины – как блочно-граничные, а макромасштабные дефекты – как результат объединения мезодефектов.

Такое деление оправдывается как двухуровневой моделью разрушения [65], так и ставшими классическими результатами экспериментов по объемному разрушению горных пород, приведенными в работе [66]: после стадии хаотического растрескивания мезотрещинные дефекты объединяются с образованием макротрещины, устойчивый характер развития которой с продолжением нагружения переходит в неустойчивую стадию и разделением образца на части.

Максимальный размер устойчивой макротрещины для образца горных пород может быть определен из следующего выражения [46; 67]:

$$2l_{*\text{обр.}}^{\text{макро}-\max} = \frac{h_* E}{2(1-\nu^2)\gamma_1 \sigma_c}, \qquad (1)$$

где $h_* \approx d_{\max}$ – размер блока в лабораторном образце; E – эффективный модуль упругости породы; σ_c – предел прочности на одноосное сжатие; ν – эффективный коэффициент Пуассона породы; $d_{\max}$ – максимальный диаметр минерального зерна.

Макроразрушение горной породы на уровне образца является предпосылкой образования блоков следующего иерархического уровня, где процессы накопления и объединения мезотрещин (междублоковых трещин) повторяются с образованием макродефекта следующего структурного уровня. Поэтому максимальный размер устойчивого макродефекта образца горной породы можно рассматривать как минимальный размер породного блока следующего структурного уровня, а для последующих структурных уровней пользоваться итерационной формулой:

$$2l_{*i}^{\text{макро}-\max} = \frac{h_{*i-1} E}{2\left(1-\nu^2\right)\gamma_1 \sigma_c} \quad (i = 1, 2, 3, 4), \qquad (2)$$

где h_{*0} – диаметр минерального зерна (естественного «блока» первого структурного уровня), м; $h_{*i-1} = l_{*i-1}^{\text{макро}-\max}$ для $i = 2, 3, 4$, поскольку основной формой блока в массиве является «кирпичная кладка» [68], для которой характерно отношение сторон 1:2 (рис. 9).

Сравнение расчетных значений с данными структурно-геологических исследований [61] показывает их хорошую сходимость (табл. 1).

Выделение максимальных размеров устойчивых макродефектов естественным образом ограничивает «снизу» и «сверху» пространство мезодефектов, которое, в соответствие с принципом Панина, можно обозначить как структурный уровень геосреды. Введение этого понятия позволяет ввести также количественные характеристики соотношений между микро-, мезо- и макродефектами соседних структурных уровней. Устойчивый макроразрыв максимальной длины, определенный по формуле (2)

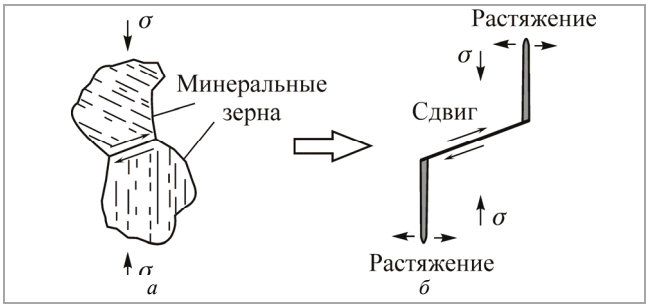


Рис. 8. Образование сдвиго-отрывной мезотрещины:
а – схема сдвига при сжатии; *б* – схема отрыва при сжатии

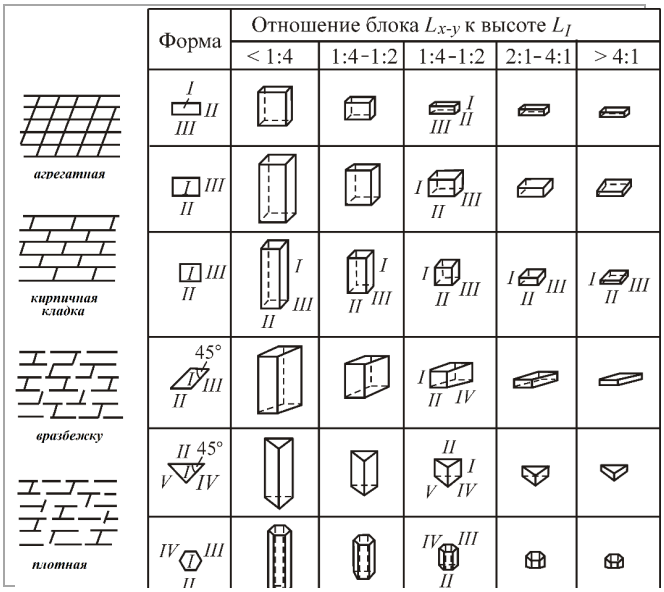


Рис. 9. Блочное строение массива: типы блоков [69]

для какого-либо структурного уровня из ряда 1, 2, 3, является мезодефектом минимальной длины соседнего верхнего структурного уровня, поскольку соответствует минимальному размеру породного блока на этом уровне.

Соответственно, мезодефекты нижнего соседнего структурного уровня могут быть рассмотрены как микродефекты верхнего соседнего уровня, поскольку являются внутриблоковыми на этом масштабе. Микродефекты же нижнего структурного уровня (внутриблоковые дефекты) на верхнем уровне рассматриваются только при учете статистики свойств «физической точки» континуума в силу их незначительного влияния («принцип монолитного блока»).

В табл. 2 приведены в качестве примера размеры мезо- и макротрещин для двух первых структурных уровней геосреды.

Переходя далее к рассмотрению соотношений структурных элементов разных уровней, легко заметить, что масштаб структурных уровней соответствует порядку 1:100 (табл. 3). Это существенно упрощает разработку континуальной модели геосреды, которая теперь может быть представлена четырьмя моделями, сопровождаемыми соответствующими методами определения их параметров.

Таким образом, введение геоструктурного коэффициента K_{gs} позволяет переходить к построению многоуровневой континуальной модели геосреды:

$$K_{gs} = h_{*i} / h_{*i-1} = 100,$$

где h_{*i} – размеры геоблоков на i-м структурном уровне геосреды ($i = 1, 2\ldots4$ – структурные уровни геосреды).

Таблица 1

Параметры структурных уровней геосреды

Параметр	Структурный уровень			
	Образец	Массив		Кора
		горная выработка	выемочное поле	
h_*, м	$1\cdot10^{-4}$ (0,1 мм)	$1\cdot10^{-2}$ (1 см)	$1\cdot10^{0}$ (1 м)	$1\cdot10^{2}$ (100 м)
$2l_*^{\text{макро–max}}$, м	$2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{0}$	$2\cdot10^{2}$	$2\cdot10^{4}$
Данные структурной геологии [67]	Нарушения межкристаллических областей, а также дефекты структуры в решетках породообразующих минералов от долей миллиметра до нескольких сантиметров	Естественная трещиноватость от десятков сантиметров до десятков метров	Крупные геологические нарушения, тектонические разрывы и т.п. размерами от сотен метров до километров	Крупные тектонические разрывы, с линейными размерами свыше 10 км

Таблица 2

Соотношение мезо- и макро-масштабов для двух соседних структурных уровней геосреды

Уровень		Размер блока	Длина трещины	
структурный	масштабный		Min	Max
Образец	Мезо	Размер минерального зерна $d_{\max}$	$2l_{\text{обр}}^{\text{мезо-min}} = d_{\max}$	$2l_{\text{обр}}^{\text{мезо-min}} = (5 \div 10)d_{\max}$
	Макро	Диаметр образца $d = 30 \div 50$ мм Высота образца $h = 60 \div 100$ мм	$2l_{\text{обр}}^{\text{макро-min}} = (5 \div 10)d_{\max}$	$2l_{*\text{обр}}^{\text{макро-max}} = \dfrac{h_* E}{2(1-\nu^2)\gamma_1\sigma_c}$
Массив	Мезо	Размер блока горной породы $d_{\text{мас}} = l_*^{\text{обр. макро}}$	$2l_{\text{мас}}^{\text{мезо-min}} = d_{\text{мас}} = l_{*\text{обр}}^{\text{макро-max}}$	$2l_{\text{мас}}^{\text{мезо-min}} = (5 \div 10)d_{\text{мас}}$
	Макро	Размер равновелик диаметру выработки: $d_{\text{выр}} \div 10d_{\text{выр}}$	$2l_{\text{мас}}^{\text{макро-min}} = (5 \div 10)d_{\text{мас}}$	$2l_{*\text{мас}}^{\text{макро-max}} = \dfrac{h_*^{\text{мас}} E}{2(1-\nu^2)\gamma_1\sigma_{\text{ост}}}$

Таблица 3

Масштаб иерархически структурированной геосреды

Параметр	Структурный уровень			
	Образец	Массив		Кора
		горная выработка	выемочное поле	
h_*, м	$1\cdot10^{-4}$ (0,1 мм)	$1\cdot10^{-2}$ (1 см)	$1\cdot10^{0}$ (1 м)	$1\cdot10^{2}$ (100 м)
Масштаб (к каждому предшествующему структурному уровню)	1	1:100	1:100	1:100

При этом под структурным уровнем геосреды понимается статистически однородный диапазон нарушений сплошности массива горных пород (мезотрещин), соответствующий максимальному размеру устойчивой на этом уровне сдвиго-отрывной макротрещине.

Принципы построения континуальной модели геосреды. В работе [59] рассмотрены основные модели классической механики применительно к построению адекватной модели геосреды. Не повторяя сделанные в ней выводы, можно лишь подчеркнуть, что необходимым условием выделения континуума является определение масштаба осреднения и представительного объема, задающего значения «эффективных» параметров среды.

Масштаб усреднения определяется из соотношения [52]:

$$\lambda \ll L \ll \mathscr{L}, \qquad (3)$$

где λ – естественная неоднородность геосреды; L – характерный размер осреднения свойств геосреды по объему; $\mathscr{L}$ – масштаб решаемой механической задачи.

Применительно к выделенным нами выше четырем структурным уровням геосреды и микро-мезо-макро-масштабам на каждом из них неравенство (3) можно записать в виде:

$$h_{*i-1} \ll L_i \ll h_{*i} \ (i = 1, 2, 3, 4), \qquad (4)$$

где i – структурный уровень геосреды; h_{*i} – размер породного блока на i-м уровне геосреды; L_i – характерный размер мезодефекта на i-м уровне геосреды.

Заметим, что в пределах структурного уровня размеры мезодефектов подчиняются статистическим закономерностям. Типичными для массива горных пород являются нормальный и логнормальный законы распределения размеров блоков [57; 61]. Это же относится и к размерам представительного объема на каждом структурном уровне.

Принимая естественную неоднородность – породный блок – на каждом из структурных уровней за физическую точку, можно выделить минимальные размеры представительного объема модели в пределах 30 блоков [70]. Это позволяет, далее, перейти к представлению о математической точке модели и определить статистику распределения свойств геосреды соответствующего структурного уровня.

Математическая модель сплошной среды с дефектами рассмотрена в работах [71–74]. Отсылая читателя к математическим подробностям этой модели, поясним основную идею расширения классической теории упругости и переход к неевклидовой континуальной модели. Хорошо известно из классической теории упругости, что шесть компонент классического тензора деформаций ε_{ij} выражаются только через три компоненты вектора перемещений, поэтому тензор деформаций не может быть произвольным и должен удовлетворять дополнительным ограничениям, которые в механике сплошной среды называются условиями совместности для деформаций [75]. Эти условия сводятся к тому, что тензор Римана – Кристоффеля, вычисленный для метрического тензора деформации $g_{ij} = \delta_{ij} - 2\varepsilon_{ij}$ [75], равен нулю. С геометрической точки зрения это означает, что пространство, соответствующее данной метрике, являются евклидовым [76]. При малых деформациях равенство нулю тензора Римана сводится к условию совместности Сен-Венана.

Введение дефектов различных типов для описания внутренней структуры геосреды требовало

расширения кинематических оснований теории с точки зрения классической механики сплошной среды. В физических теориях прочности и пластичности рассмотрены различные модели дефектов кристаллической структуры материалов. Анализ физических моделей дефектов внутреннего строения материала привел исследователей [68; 77] к выводу о необходимости использовать при их описании неевклидовы геометрические объекты, запрещенные в классической теории упругости, то есть не укладывающиеся в рамки Евклидова геометрического описания деформационных свойств упругой сплошной среды.

В геомеханике первая неевклидова континуальная модель, учитывающая несовместность деформаций, была использована для описания распределения поля напряжений вокруг подземных выработок с круглым поперечным сечением [34]. Для плоско-деформированного состояния сплошной среды существует единственная функция несовместности деформаций E_{ij} – скалярная кривизна R тензора Римана [76]:

$$\frac{R}{2} = \frac{\partial^2 E_{11}}{\partial x^2 \partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{22}}{\partial x^1 \partial x^1} - 2\frac{\partial^2 E_{12}}{\partial x^1 \partial x^2}. \qquad (5)$$

Связь вводимой в теорию функции R с классическими характеристиками сплошной среды можно объяснить в терминах функции напряжений Эйри. С этой целью рассмотрим плоско-деформированное состояние сплошной среды в условиях механического равновесия, тогда справедливы уравнения для компонент напряжений σ_{ij}:

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x^1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x^1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x^2} = 0. \qquad (6)$$

Соотношения (6) тождественно удовлетворяются, если ввести функцию напряжений Эйри Ф согласно формулам:

$$\sigma_{11} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2 \partial x^2}, \ \sigma_{22} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^1 \partial x^1}, \ \sigma_{12} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^1 \partial x^2}. \qquad (7)$$

В классической теории упругости $R = 0$, что соответствует выполнению условий совместности для деформаций для классических деформаций ε_{ij}:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x^2 \partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x^1 \partial x^1} - 2\frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x^1 \partial x^2} = 0. \qquad (8)$$

Линейная связь между компонентами поля напряжений σ_{ij} и классическими деформациями ε_{ij} (закон Гука) позволяет выразить ε_{ij} через σ_{ij}, затем подставить полученное соотношение в (8), и используя (7) получить однородное бигармоническое уравнение для классической функции напряжений $\Phi = \Phi_{clas}$:

$$\Delta^2 \Phi_{clas} = 0. \qquad (9)$$

Переход к неевклидовой модели сплошной среды связан с предположением, что $R \neq 0$ (5). Сохраняя реологическое соотношение между компонентами поля напряжений σ_{ij} и деформациями E_{ij} линейным: $\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} E_{kk} + 2\mu E_{ij}$, нетрудно получить уравнению для функции напряжений Φ:

$$\Delta^2 \Phi = \frac{\mu}{1-\nu} R, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}. \qquad (10)$$

Таким образом, при расширении классической теории мы переходим от однородного бигармонического уравнения (9) для функции напряжений к неоднородному (10). Поскольку (10) является линейным, то решение Ф можно представить в виде суммы классической функции напряжений Φ_{clas} и дополнительного вклада Φ_{n-clas}:

$$\Phi = \Phi_{clas} + \Phi_{n-clas}, \qquad (11)$$

где Φ_{n-clas} – частное решение уравнения (10). Подставляя (11) в (7), получаем следующее представления для компоненты поля напряжений

$$\begin{aligned}
&\sigma_{11} = \sigma_{11,clas} + \sigma_{11,n-clas}, \ \sigma_{11,clas} = \frac{\partial^2 \Phi_{clas}}{\partial x^2 \partial x^2}, \\
&\sigma_{11,n-clas} = \frac{\partial^2 \Phi_{n-clas}}{\partial x^2 \partial x^2}, \\
&\sigma_{22} = \sigma_{22,clas} + \sigma_{22,n-clas}, \ \sigma_{22,clas} = \frac{\partial^2 \Phi_{clas}}{\partial x^1 \partial x^1}, \\
&\sigma_{22,n-clas} = \frac{\partial^2 \Phi_{n-clas}}{\partial x^1 \partial x^1}, \\
&\sigma_{12} = \sigma_{12,clas} + \sigma_{12,n-clas}, \ \sigma_{12,clas} = -\frac{\partial^2 \Phi_{clas}}{\partial x^1 \partial x^2}, \\
&\sigma_{12,n-clas} = -\frac{\partial^2 \Phi_{n-clas}}{\partial x^1 \partial x^2}.
\end{aligned} \qquad (12)$$

Из (12) видно, что структура поля внутренних напряжений складывается из классического поля упругих напряжений $\sigma_{ij,clas}$ и неклассического поля напряжений $\sigma_{ij,n-clas}$, определяемого через функцию несовместности R.

Функция R использовалась при формулировке моделей сплошных сред с внутренней структурой [34; 78] и для нее было получено эволюционное уравнение, которое для рассматриваемого нами стационарного случая дается соотношением:

$$\Delta^2 R = \gamma^2 R \ , \qquad (13)$$

где параметр $1/\sqrt{\gamma}$ характеризует размер внутренней дефектной структуры и определяется экспериментально. Сравнивая (13) с (10) и выполняя перенормировку $\sigma_{ij} \to \mu\sigma_{ij}$, $\Phi \to \Phi\mu/\gamma$ $R \to R\gamma(1-\nu)$, получаем уравнение для функции напряжений:

$$\Delta^2 \Phi_{n-clas} = \gamma^2 \Phi_{n-clas}. \qquad (14)$$

При рассмотрении общего случая механического равновесия твердого тела было показано [73], что структура напряжений в виде (12) сохраняется:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij,clas} + \sigma_{ij,n-clas}. \qquad (15)$$

Это означает, что поле внутренних напряжений складывается из поля напряжений $\sigma_{ij,n-clas}$, созданного дефектами, и компенсирующего их поверхностную неуравновешенность поля упругих напряжений $\sigma_{ij,clas}$. Совместное действие этих напряжений позволяет материалу сохранять заданную форму, и их изменение автоматически приводит к изменению формы тела при выходе дефектов из объема тела на поверхность.

Следует заметить, что напряжения $\sigma_{ij,n-clas}$ обладают свойством самоуравновешенности: суммарная сила и суммарный момент обращаются в нуль (современные исследователи именуют их также латентными или остаточными напряжениями [79]).

Идея использования неевклидовой модели на разных структурных уровнях рассмотрения геосреды определяется принципом неевклидовой иерархичности. Он заключается в том, что при описании иерархически-блочного массива пород каждый структурный уровень исследуется в рамках соответствующей неевклидовой модели, охватывающей определенный диапазон иерархии. Выше были указаны четыре структурных уровня рассмотрения блочного массива горных пород, при этом каждый из уровней можно исследовать в рамках неевклидовой модели. Эта идея приводит к необходимости решения соответствующих краевых задач.

Для образца сильно сжатой горной породы при одноосном нагружении подходы к решению были рассмотрены в [80], что соответствует первому структурному уровню исследования геосреды. Другим примером являются построенные в [81] решения, демонстрирующие критическое поведение поля напряжений по отношению к внешней нагрузке для породного массива, и в случае проведения глубокозалегающей горной выработки [82], что соответствует второму структурному уровню. Построенные для среды с дефектами решения обладают свойством периодичности и отвечают идее локализации сдвиго-отрывного разрушения горных пород и массивов.

Мезотрещинные структуры образцов сильно сжатых горных пород при одноосном нагружении. Мезотрещинные структуры горных пород и массивов обнаруживаются на всех структурных уровнях геосреды. Методика комплексного метода исследования мезотрещинных структур сильно сжатых горных пород на первом структурном уровне (породные образцы) заключается в установлении положения очаговой области подготовки макроразрушения методами акустической эмиссии с установлением гипоцентров образования мезотрещин и одновременном измерении линейных деформаций образца как по высоте, так и по образующей в окружном направлении [83] (рис. 10).

Результаты исследований закономерностей деформирования образцов горных пород в предразрушающем состоянии с использованием жесткой сервоуправляемой системы показаны на примере образца дацита № 20. Использовалась схема расположения тензорезисторов, представленная на рис. 10. Деформационные кривые линейных деформаций для центральной части образца показаны на рис. 11. Видно, что в предразрушающей стадии нагружения в некоторых областях наблюдается выполаживание кривых с уменьшением на этом участке модулей деформаций в 3–5 раз.

В предразрушающей стадии нагружения в образце образуются области с различными деформационными характеристиками. На рис. 12 показаны типичные линейные деформации в области наибольшего разуплотнения (датчики № 1, 2). Аномальный характер деформирования объясняется влиянием области разуплотнения, находящейся непосредственно под областью реверсивного деформирования. Эта область в предразрушающей стадии нагружения характеризуется аномальным увеличением поперечных и продольных деформаций. Кривая объемных деформаций приобретает *U*-образную форму, фиксируется порог дилатансии.

В других областях отмечается отрицательное приращение линейных деформаций (рис. 13).

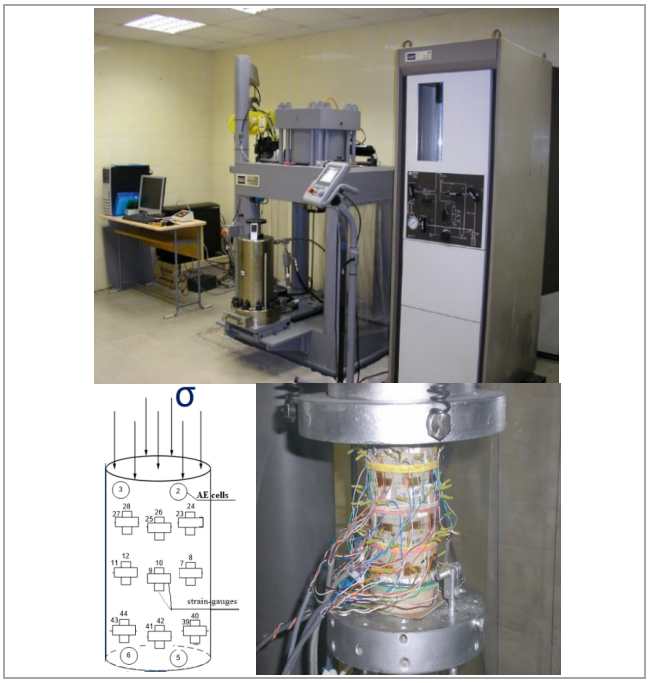


Рис. 10. Комплексный метод исследования мезотрещинных структур сильно сжатых образцов горных пород

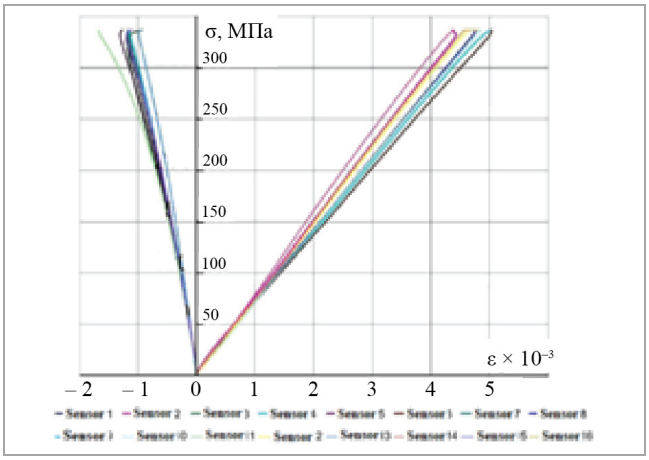


Рис. 11. Характер деформаций в центральной части образца

Такой тип деформирования получил название «реверсивное деформирование первого типа». Аномальный характер деформирования объясняется влиянием области разуплотнения, находящейся непосредственно под областью реверсивного деформирования.

Одновременно в направлении оси нагружения относительно области разуплотнения происходит образование области относительного уплотнения с реверсом линейных деформаций (датчики № 13, 14). Эта область характеризуется отрицательным приращением продольных и поперечных деформаций, при этом отрицательные приращения продольных деформаций превышают отрицательные приращения поперечных деформаций (см. рис. 13).

Одновременно в соседней по горизонтали к области разуплотнения части образца образуется также область относительного уплотнения (датчики № 11, 12). Данная область также характеризуется отрицательными приращениями продольных и поперечных деформаций. При этом приращения поперечных деформаций превышают приращения продольных деформаций (рис. 14).

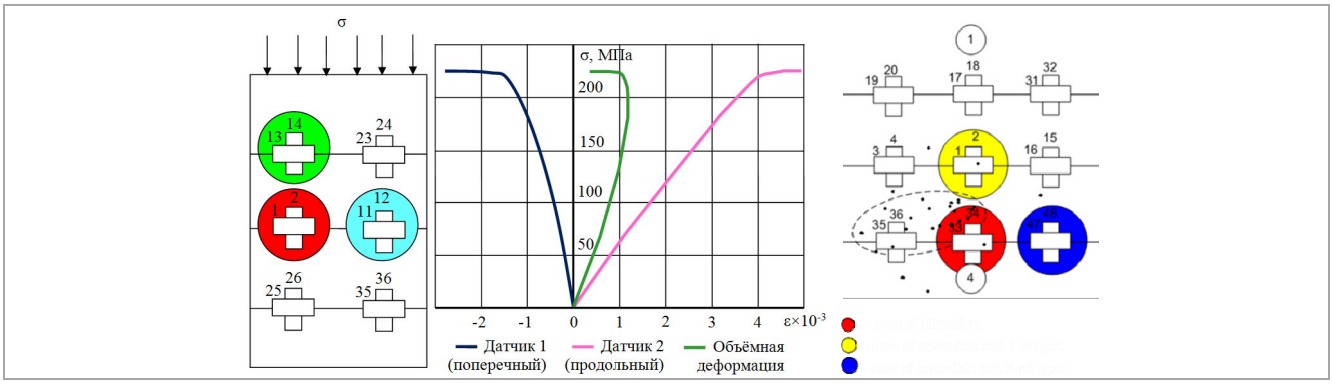


Рис. 12. Область разуплотнения (образец № 20, дацит) – отмечена красным

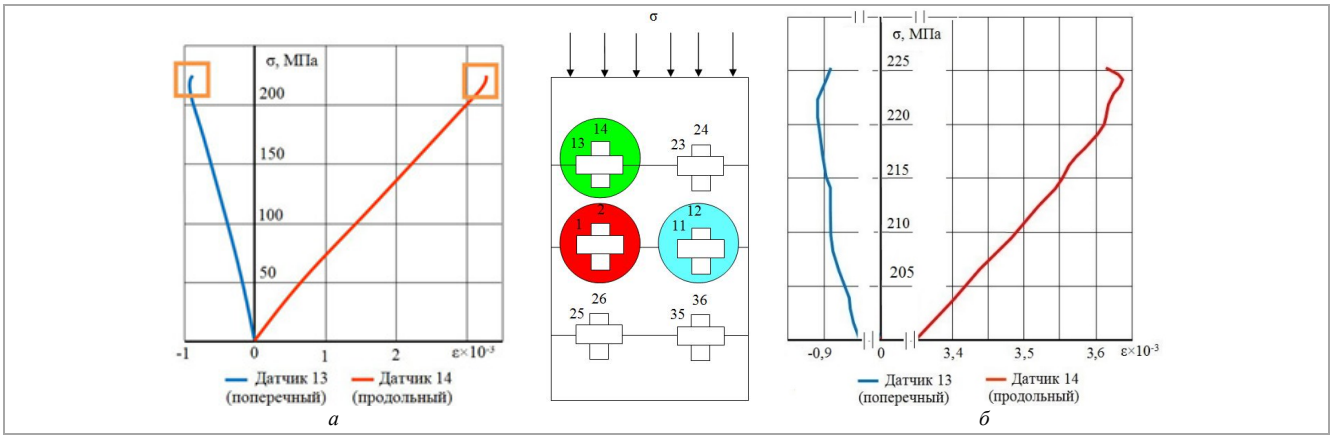


Рис. 13. Область реверсивных деформаций первого типа (отмечена зеленым): *а* – линейные и объемные деформации; *б* – линейные деформации в конечной стадии нагружения (образец № 20, дацит)

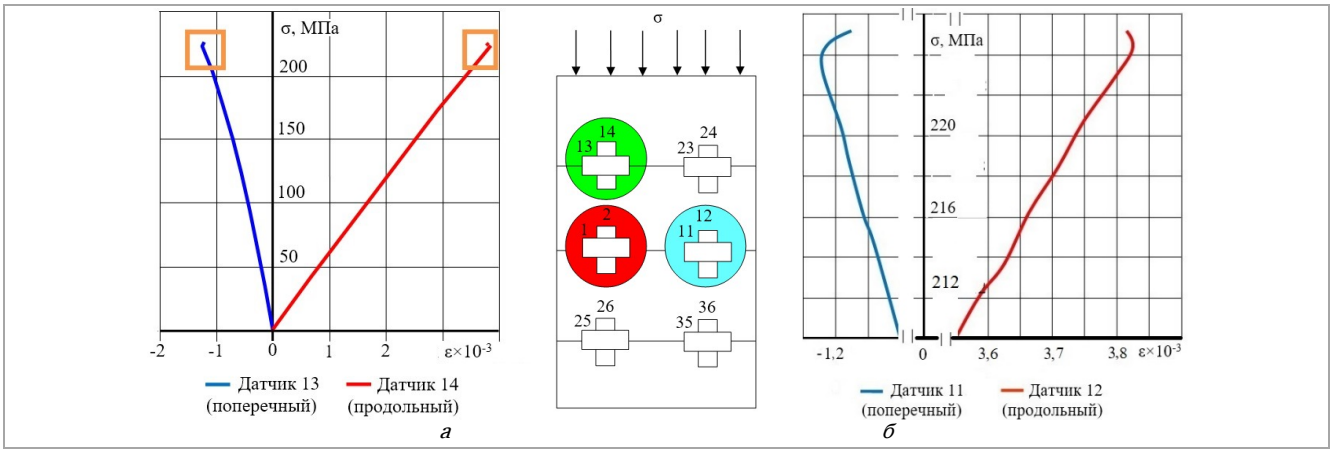


Рис. 14. Область реверсивных деформаций второго типа (отмечена голубым): *а* – линейные и объемные деформации; *б* – линейные деформации в конечной стадии нагружения (образец № 20, дацит)

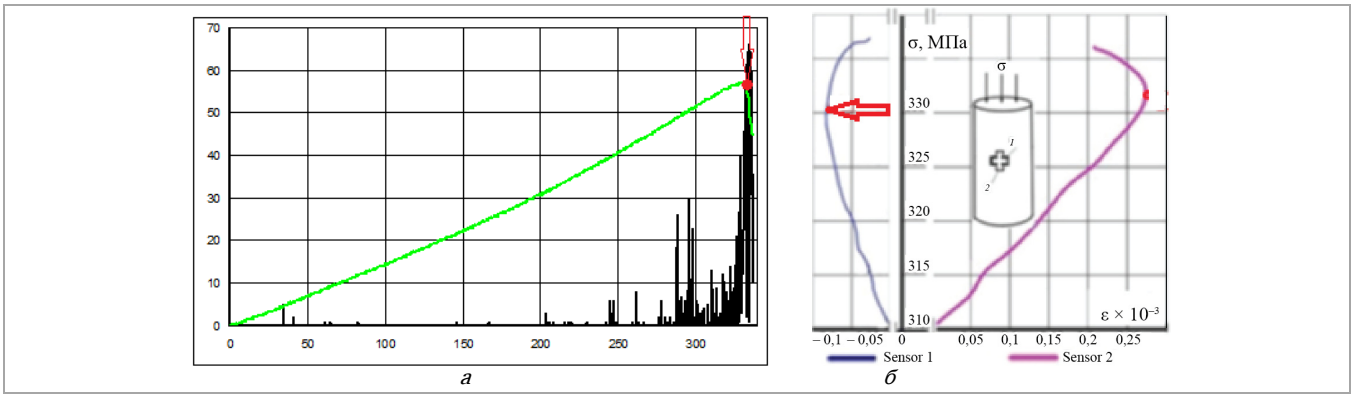


Рис. 15. Изменение интенсивности акустической эмиссии (*а*) и реверсивные деформации в околоочаговой области подготовки макроразрушения (*б*)

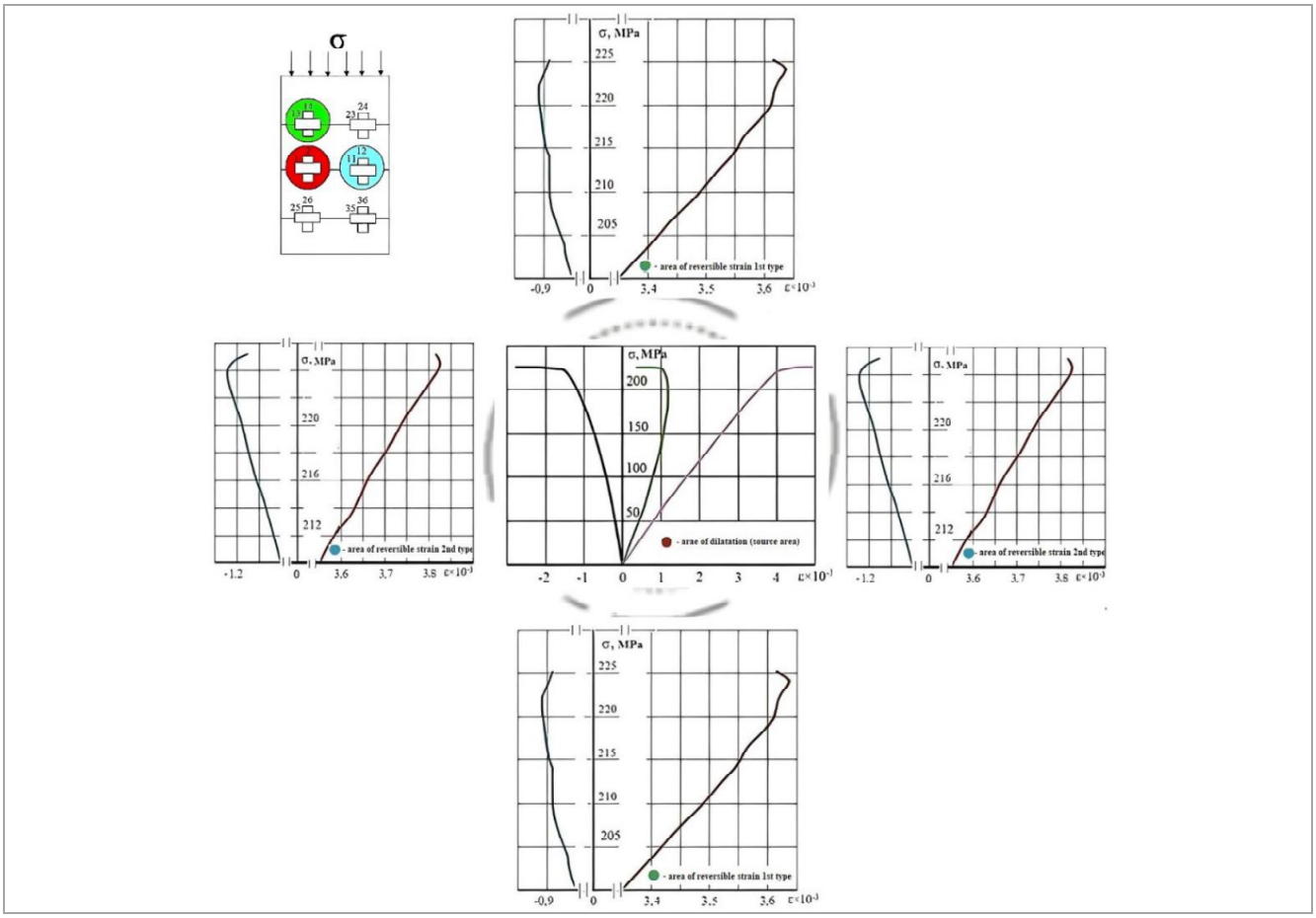


Рис. 16. Мезотрещинная структура контрастного типа образцов горных пород

Такой тип деформирования наблюдается рядом с областью разуплотнения перпендикулярно оси нагружения и получил название «реверсивного деформирования второго типа». Расположение областей реверсивного деформирования первого и второго типов относительно области разуплотнения показано на рис. 14.

Одновременно проводимые акустические исследования показывают, что точка реверса линейных деформаций совпадает с пиком активности акустической эмиссии (рис. 15).

Рассмотрение совокупности очаговой и околоочаговой области подготовки макроразрушения показывает формирование в образцах горных пород на предразрушающей стадии нагружения мезотрещинной структуры контрастного типа (рис. 16). Очаговая область характеризуется аномальными значениями приращений линейных деформаций положительного знака, а в околоочаговой области эти приращения имеют отрицательный знак.

Моделирование мезотрещинных структур породных образцов. Воспользуемся неевклидовой моделью сплошной среды для описания напряженно-деформированного состояния сильно сжатого образца. Следует сразу отметить, что потенциальное решение должно позволять выделять очаговую область подготовки макроразрушения в образце в стадии предразрушения и обладать периодическим характером распределения напряжений, как по периметру образца, так и по его высоте.

Задача о распределении поля напряжений σ_{ij} в образце формулируется в стационарной постановке, и уравнения равновесия для компонент поля напряжений в цилиндрических координатах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z}+\frac{\sigma_{rr}-\sigma_{\varphi\varphi}}{r}=0,\\
&\frac{\partial \sigma_{r\varphi}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial z}+\frac{2\sigma_{r\varphi}}{r}=0,\\
&\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{\varphi z}}{\partial \varphi}+\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}+\frac{\sigma_{rz}}{r}=0.
\end{aligned} \qquad (16)$$

Краевые условия для σ_{ij} сводятся к заданию силы вдоль оси z на торцах цилиндра $z=\pm h$ и обращению в нуль всех ее компонент на боковой поверхности $r=R$ и записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}
&\sigma_{zz}\big|_{z=\pm h}=-P, \quad \sigma_{zr}\big|_{z=\pm h}=0, \quad \sigma_{z\phi}\big|_{z=\pm h}=0,\\
&\sigma_{rr}\big|_{r=R}=0, \quad \sigma_{r\phi}\big|_{r=R}=0, \quad \sigma_{rz}\big|_{r=R}=0.
\end{aligned} \qquad (17)$$

Хорошо известно, что соответствующее классическое решение $\sigma_{ij,clas}$ теории упругости для задачи (16), (17) имеет единственную отличную от нуля компоненту напряжений $\sigma_{zz,clas}=-P$. Использование сформулированной выше неевклидовой модели приводит к необходимости введения дополнительных напряжений $\sigma_{ij,n-clas}$, которые определяются через неклассическую функцию напряжений Φ_{n-clas} Эйри согласно формулам:

$$\sigma_{rr,n-clas}=\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\Phi_{n-clas},$$
$$\sigma_{\varphi\varphi,n-clas}=\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\Phi_{n-clas},$$
$$\sigma_{zz,n-clas}=\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\right)\Phi_{n-clas},$$
$$\sigma_{rz,n-clas}=-\frac{\partial^2\Phi_{n-clas}}{\partial r\partial z},\qquad(18)$$
$$\sigma_{r\varphi,n-clas}=-\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial\Phi_{n-clas}}{\partial\varphi}\right),$$
$$\sigma_{z\varphi,n-clas}=-\frac{1}{r}\frac{\partial^2\Phi_{n-clas}}{\partial r\partial z}.$$

Заметим, что решение Φ_{n-clas} уравнения (14) является линейной комбинацией функций F^+,F^-:

$$\Phi_{n-clas}=F^++F^-,\qquad(19)$$

$$\left(\Delta+\gamma\right)F^+=0,\quad\left(\Delta-\gamma\right)F^-=0.\qquad(20)$$

В справедливости этого утверждения можно убедиться, подставляя (19) в (14) и используя (20).

В цилиндрической системе координат рассмотрим частные решения $F^{\pm}_{nq}$ уравнения (20) в виде $F^{\pm}_{nq}=y^{\pm}_{nq}\cos(n\varphi+\varphi_0)\cos qz$ с неизвестной функцией $y^{\pm}_{nq}=y^{\pm}_{nq}(r)$. Подстановка $F^{\pm}_{nq}$ в (20) дает уравнение для цилиндрических функций:

$$\frac{d^2y^{\pm}_{nq}}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dy^{\pm}_{nq}}{dr}+\left(\pm\gamma-q^2-\frac{n^2}{r^2}\right)y^{\pm}_{nq}=0.\qquad(21)$$

Рассмотрим решения (21), удовлетворяющие естественному, с точки зрения физики, требованию отсутствия особенности на оси $r=0$ и убыванию при $r\to\infty$. Тогда

$$y^+_{nq}=J_n(kr),k=\sqrt{\gamma-q^2},\gamma\ge q^2;\qquad(22)$$
$$y^-_{nq}=I_n(pr),p=\sqrt{\gamma+q^2},$$

где $J_n(kr)$ – функция Бесселя; $I_n(pr)$ – модифицированная функция Бесселя n порядка. Следовательно, общее решение для неклассической функции напряжений Φ_{n-clas} можно представить в виде суммы частных решений $\Phi_{n,q}$:

$$\Phi_{n-clas}=\sum_{n,q}\Phi_{n,q},\Phi_{n,q}=y^+_{nq}(r)+y^-_{nq}(r)=$$
$$=\alpha_{nq}J_n(kr)+\beta_{nq}I_n(pr),\qquad(23)$$

где α_{nq},β_{nq} – некоторые постоянные. Отсюда и из (18) следует, что

$$\sigma_{rr,n-clas}=\sum_{n,q}\left[\alpha_{nq}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}-q^2-\frac{n^2}{r^2}\right)J_n(kr)+\right.$$
$$\left.+\beta_{nq}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}-q^2-\frac{n^2}{r^2}\right)I_n(pr)\right]\cos(n\varphi+\varphi_0)\cos qz,$$
$$\sigma_{\varphi\varphi,n-clas}=\sum_{n,q}\left[\alpha_{nq}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}-q^2-\frac{n^2}{r^2}\right)J_n(kr)+\right.$$
$$\left.+\beta_{nq}\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}-q^2-\frac{n^2}{r^2}\right)I_n(pr)\right]\cos(n\varphi+\varphi_0)\cos qz,$$
$$\sigma_{zz,n-clas}=\sum_{n,q}\left[\alpha_{nq}\left(-k^2+\frac{n^2}{r^2}\right)J_n(kr)+\right.$$
$$\left.\beta_{nq}\left(p^2+\frac{n^2}{r^2}\right)I_n(pr)\right]\cos(n\varphi+\varphi_0)\cos qz,$$
$$\sigma_{rz,n-clas}=q\sum_{n,q}\left[\alpha_{nq}\frac{d}{dr}J_n(kr)+\right.$$
$$\left.\beta_{nq}\frac{d}{dr}I_n(pr)\right]\cos(n\varphi+\varphi_0)\sin qz,\qquad(24)$$
$$\sigma_{r\varphi,n-clas}=\sum_{n,q}n\left[\alpha_{nq}\frac{d}{dr}\left(\frac{J_n(kr)}{r}\right)+\right.$$
$$\left.+\beta_{nq}\frac{d}{dr}\left(\frac{I_n(pr)}{r}\right)\right]\sin(n\varphi+\varphi_0)\cos qz,$$
$$\sigma_{z\varphi,n-clas}=-\frac{1}{r}\sum_{n,q}qn\left[\alpha_{nq}J_n(kr)+\beta_{nq}I_n(pr)\right]\times$$
$$\times\sin(n\varphi+\varphi_0)\sin qz.$$

Краевые условия (17) для $\sigma_{\varphi z,n-clas},\sigma_{rz,n-clas}$ на торцах образца приводит к требованию $\sin qh=0$, тогда получаем дискретный набор $q_m=\pi m/h,\ m\ge1$. Выполнение краевого условия (17) для $\sigma_{\varphi r,n-clas},\sigma_{zr,n-clas}$ при $r=R$ дает систему уравнений для определения α_{nq},β_{nq}:

$$\left.\alpha_{nq}\frac{d}{dr}J_n(kr)+\beta_{nq}\frac{d}{dr}I_n(pr)\right|_{r=R}=$$
$$=0,\left.\alpha_{nq}J_n(kr)+\beta_{nq}I_n(pr)\right|_{r=R}=0\qquad(25)$$

Если справедливо (25), то выполняется условие (17) для $\sigma_{rr,n-clas}$. Система (25) имеет нетривиальное решение, если

$$J_n(kR)\left.\frac{d}{dr}I_n(pr)\right|_{r=R}-I_n(pR)\left.\frac{d}{dr}J_n(kr)\right|_{r=R}=0.\qquad(26)$$

Покажем, что выполнение условия (26) можно обеспечить при больших значениях аргументов: $kR,pr\to\infty$. Действительно, в этом предельном случае можно воспользоваться асимптотическими формулами:

$$\frac{dJ_n(kR)}{dR}\sim-kJ_{n+1}(kR)\sim-k\sqrt{\frac{2}{\pi kR}}\cos\left(kR-\frac{\pi n}{2}-\frac{\pi}{4}\right),$$
$$\frac{dI_n(pR)}{dR}\sim pI_{n+1}(pR)\sim p\frac{1}{\sqrt{2\pi pR}}\exp(pR)$$

Применяя эти соотношение к (26), получим

$$kp\frac{1}{\pi R\sqrt{kp}}\cos\left(kR-\frac{\pi n}{2}-\frac{\pi}{4}\right)\exp(pR)+$$
$$+kp\frac{1}{\pi R\sqrt{kp}}\exp(pR)\cos\left(kR-\frac{\pi(n+1)}{2}-\frac{\pi}{4}\right)\approx0$$

Отсюда следует условие $\mathrm{tg}\left(kR-\pi n/2-\pi/4\right)\approx-1$ и ограничения на k: $k_sR=\pi n/2+2\pi s$, где целое $s\ge0$.

Если перейти от $\sigma_{zz,n-clas}$ к полю

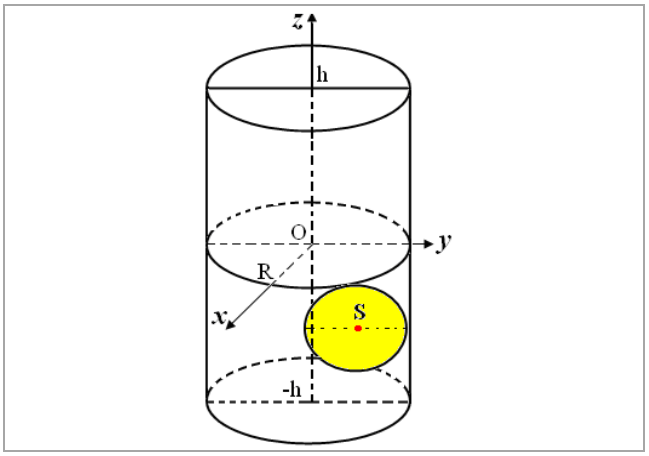


Рис. 17. Схема образца горной породы в состоянии сильного сжатия; $S\left(\frac{R}{2}, 0, -0{,}4 \cdot h\right)$ – центр очаговой области подготовки макроразрушения

$$\Sigma_{zz,n-clas} = \sigma_{zz,n-clas} - \sigma_{zz,n-clas}\Big|_{z=h} = \\ = \sum_{n,q}\left[\alpha_{nq}\left(-k^2 + \frac{n^2}{r^2}\right)J_n(kr) + \right. \\ \left. + \beta_{nq}\left(p^2 + \frac{n^2}{r^2}\right)I_n(pr)\right]\cos(n\varphi + \varphi_0)(\cos qz - (-1)^{m+1}),$$

то уравнения равновесия будут выполняться, а $\Sigma_{zz,n-clas}$ удовлетворяет нулевым условиям на торцах образца.

Таким образом, сконструированы формулы для параметризации распределений поля внутренних напряжений, порождаемых неоднородностями в образце горной породы. Это сделано в рамках схемы минимального расширения классической теории упругости путем введения функции несовместности R, которая допускает естественную интерпретацию в терминах неевклидовых геометрических характеристик. Общее решение задачи дается формулой (15). Определение амплитудных коэффициентов в решении следует выполнять по данным экспериментальных наблюдений за поведением образцов горных пород.

Определение амплитудного параметра и параметра периодичности математической модели. Приведенные результаты экспериментальных исследований характера деформирования образцов горных пород в предразрушающей стадии нагружения при $P > P^*$ (P^* – критическая нагрузка, за которую может быть принята точка реверса деформаций) показали, что деформирование образца может носить реверсивный характер, заключающийся в изменении знаков приращения продольных и поперечных деформаций на локальных участках измерения, которые позволяет выделять принятая многоточечная схема наклейки датчиков.

Помимо разнознакового приращения линейных деформаций по высоте образца, такой же характер деформирования наблюдается и по углу. Геометрическое положение очаговой области подготовки макроразрушения, а также околоочаговых областей реверсивных деформаций I и II типов показано на рис. 16. Теоретические соотношения для описания полей напряжений представлены в предыдущем разделе. В построенных формулах ограничимся слагаемыми с $n = 1{,}2;\ m = 1;\ s = 1$.

Локализация очаговой области требует введение критерия разрушения [80]. С этой целью введем функцию:

$$K_I = M\left(-\beta\sigma_{\varphi\varphi,n-\text{clas}} + T_{zz,n-\text{clas}}\right), \qquad (27)$$

где ввели обозначения $T_{zz} = \sigma_{zz,n-\text{clas}}$; K_I – коэффициент интенсивности напряжений в вершине мезотрещины в очаговой области образца, $МПа \cdot \sqrt{м}$; $\beta = \frac{\gamma_3}{\gamma_1}$, $\gamma_1 = 0{,}25; \gamma_3 = 0{,}2$; $M = \sqrt{\pi l} \cdot \gamma_1$; l – половина длины мезотрещины, м. Трещиностойкость горной породы образца определяется как $K_{Ic}^* = M \cdot \sigma_c^*$, МПа $\cdot\sqrt{м}$, при условии, что нагрузка превышает критическую P^* $P > P^*$). Здесь $\sigma_c^* = \sigma_c - P^*$, где P^* –критическая нагрузка, при достижении которой в образце начинает формироваться мезотрещинная структура.

Предполагается, что в центре очаговой области коэффициент интенсивности напряжений (27) достигает значения, равного трещиностойкости горной породы:

$$K_I|_S = K_{Ic}^*. \qquad (28)$$

Допускается, что первый инвариант тензора напряжений на боковой поверхности образца удовлетворяет условию

$$\left(\sigma_{rr,n-\text{clas}} + \sigma_{\varphi\varphi,n-\text{clas}} + T_{zz}\right)\Big|_{(R,0,0)} = \\ = \sigma_c^*, P > P^*, \sigma_c^* = \sigma_c - P^*. \qquad (29)$$

Дополнительная гипотеза состоит в том, что $\sigma_{\varphi\varphi,n-\text{clas}}, T_{zz}$ достигают своих экстремальных значений в очаговой области на рис. 17:

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\partial T_{zz}}{\partial \varphi}\Big|_{\left(\frac{R}{2},\frac{\pi}{6},-0{,}4\cdot h\right)} = 0; \dfrac{\partial T_{zz}}{\partial r}\Big|_{\left(\frac{R}{2},\frac{\pi}{6},0\right)} = 0 \\ \dfrac{\partial \sigma_{\varphi\varphi,n-\text{clas}}}{\partial z}\Big|_{\left(\frac{R}{2},\frac{\pi}{6},-0{,}1\cdot h\right)} = 0, \dfrac{\partial \sigma_{\varphi\varphi,n-\text{clas}}}{\partial \varphi}\Big|_{\left(\frac{R}{2},\frac{\pi}{6},0\right)} = 0 \end{array}\right\}, \qquad (30)$$

Соотношения (28) – (30) позволяют определить значения параметров модели.

Результаты теоретических исследований распределения напряжений в сильно сжатом образце в стадии предразрушения представлены на рис. 18. Из рис. 18 видно, что в центре околоочаговой области осевое латентное напряжение меняет знак ($T_{zz} < 0$), что свидетельствует об относительном растяжении в осевом направлении (реверсивном характере деформирования).

Сравнение результатов экспериментальных и аналитических исследований. Для сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований вычислены теоретические (вызванные латентными напряжениями) продольные деформации на боковой поверхности образца при $E = 60000$МПа; $z = 0{,}5 \cdot h$; $\nu = 0{,}48$. Результаты вычислений представлены в табл. 4 и на рис. 19.

Как следует из данных табл. 4 и рис. 19, получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Модель описывает реверсивные линейные деформации в центральной части образца и предсказывает их симметричный характер.

Мезотрещинные структуры массива сильно сжатых горных пород вокруг глубоких выработок. Исследование закономерностей деформирования массива горных пород, находящегося в состоянии сильного сжатия, проведено разработанным многоинтервальным методом измерения деформаций in situ. Метод заключается в установлении величины рационального интервала измерений по длине скважин, отвечающих условиям надежного (не менее двух зон) определения характеристик зональной мезотрещинной структуры, а также в разработке соответствующего способа измерения деформаций, точность которого удовлетворяет требованиям достоверности.

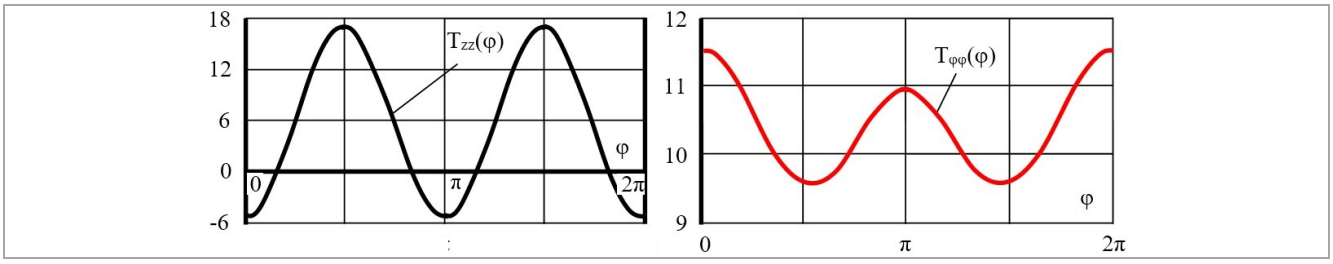


Рис. 18. Распределение компонент самоуравновешенных напряжений в центральной части образца горной породы (МПа)

Таблица 4

Сравнение значений экспериментальных и теоретических продольных деформаций центральной части образца

φ,°	0	45	90	135	180	225	270	315
$\varepsilon_{zz}^{exp} \cdot 10^{-4}$	3,41	7,19	8,71	29,5	–7,2	8,32	1,14	0,38
$\varepsilon_{zz}^{theor} \cdot 10^{-4}$	–12,59	8,084	28,55	8,084	–12,59	7,369	27,54	7,369

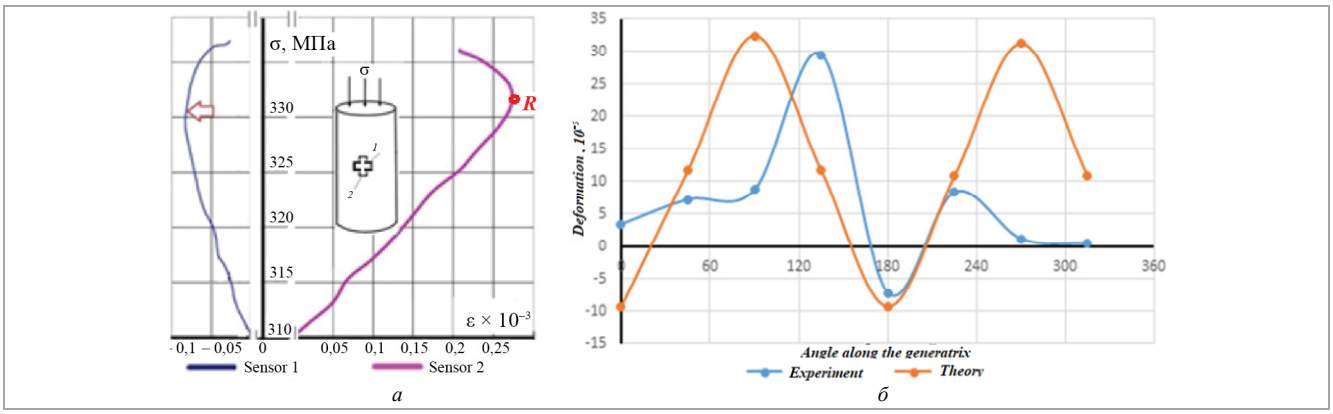


Рис. 19. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований: *а* – реверс линейных деформаций; *б* – теоретическая и экспериментально полученные кривые деформирования в предразрушающей области нагружения

Таблица 5

Значение параметра периодичности γ; где r^* – положение середины первой зоны разрушения

σ_c, МПа	r^*	$r_0 = 2$ м	$L_{скв}$	$r_0 = 2{,}5$ м	$L_{скв}$
100	1,557	4,141	8,225	2,651	12,895
110	1,637	3,751	7,858	2,400	12,280
120	1,717	3,413	7,503	2,185	11,720
130	1,797	3,120	7,174	1,996	11,213
140	1,877	2,863	6,877	1,832	10,743
150	1,957	2,636	6,602	1,687	10,317
160	2,037	2,437	6,351	1,559	9,928
170	2,117	2,259	6,118	1,445	9,564
180	2,197	2,099	5,901	1,343	9,223

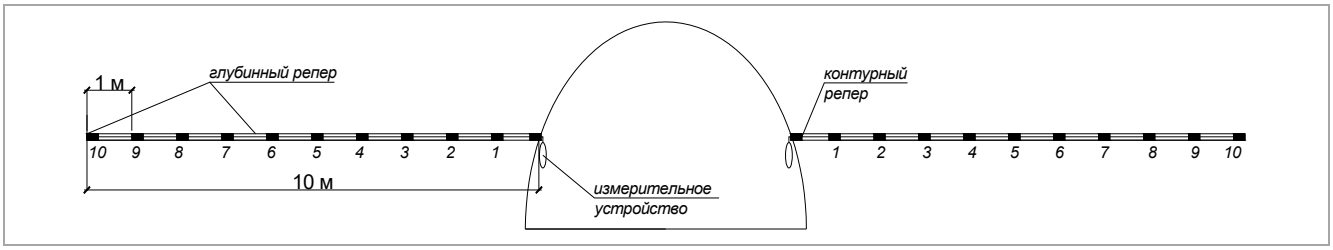


Рис. 20. Схема реперной станции

С использованием рассмотренной выше математической модели (21) установлено, что минимальная длина скважин и количество интервалов для условий месторождения зависят от предела прочности пород на одноосное сжатие и радиуса выработки (табл. 5).

Рациональный интервал измерения для скважин длиной 10 м может быть принят в 1 м по всей длине скважины. Исходя из условий монтажа реперов в скважинах и имеющегося технологического оборудования на предприятии, условий размещения реперных станций, максимальная глубина скважины устанавливается 10 м. Общая схема реперной станции изображена на рис. 20.

Таким образом, метод деформационных многоинтервальных исследований заключается в том, что

в противоположные борта выработки непосредственно вблизи забоя при ее проведении на высоте 1,5–1,8 м пробуриваются скважины глубиной 10 м и диаметром 105 мм, в которые с интервалом 1 м устанавливаются глубинные реперы клиновой конструкции струнного типа. На контуре выработки в устье скважины установлен базовый неподвижный репер, необходимый для фиксации показаний смещений реперов, измеряемых датчиками часового типа с ценой деления 0,01 мм.

На рис. 21 показана схема установки Станции 1 горизонта –406 м и условия проведения измерений по приведенной методике. Методы обработки результатов наблюдений заключались в определении разности смещений соседних точек породного массива, отсчитываемых от контура выработки. Такая схема соответствует принятой в международной практике и осуществлена в широко распространенном в настоящее время комплексе ГЕОКОН.

Закономерности деформирования массива горных пород вокруг подземных выработок на больших глубинах исследованы в однородных удароопасных породах рудника Николаевский (г. Дальнегорск, Приморский край) на глубинах 700–800 м.

В результате проведенных наблюдений получены смещения реперов на четырех станциях и построены графики деформаций породного массива. Установлено, что деформирование вмещающих пород носит незатухающий, осциллирующий характер. Это свидетельствует о нахождении пород массива в состоянии динамической неустойчивости, что имеет следствием чередование процессов уплотнения и разуплотнения вмещающих пород, характерной для больших глубин.

На рис. 22 показан характер деформирования массива вдоль скважины в отдельные моменты наблюдения. Хорошо видно, что деформирование носит зональный характер: в контурной части массива преобладают радиальные деформации растяжения, что свидетельствует о концентрации тангенциальных напряжений сжатия. Затем отмечена ярко выраженная зона относительного радиального сжатия, за которой вновь отмечена зона радиального растяжения и т.д. вглубь массива. В целом по скважине длиной 10 м отмечено три пары таких зон.

Таким образом, закономерности зонального деформирования сильно сжатого массива горных пород вокруг подземных выработок заключаются в том, что, начиная от контурной части и с удалением вглубь массива, его деформации приобретают периодический осциллирующий характер, а сама зональная структура от момента формирования претерпевает закономерные изменения во времени. Для условий месторождения начальный период формирования зональной мезотрещинной структуры имеет продолжительность от 37 до 49 суток.

Установленные закономерности требуют аналитического описания с использованием неевклидовой модели сплошной среды. С этой целью поставлена и решена краевая задача аналитического описания зональной мезотрещинной структуры контрастного типа.

На большой глубине система «горный массив – выработка» моделируется невесомой плоскостью, нагруженной на бесконечности гравитационным напряжением, и ослабленной круглым отверстием со свободным от нагрузок контуром, моделирующим круглую незакрепленную подземную выработку в условиях всестороннего сжатия. Краевая задача о распределении поля напряжений вокруг выработки для плоско-деформированного состояния. Это соответствует подходам, принятым в механике подземных сооружений [26] (рис. 23).

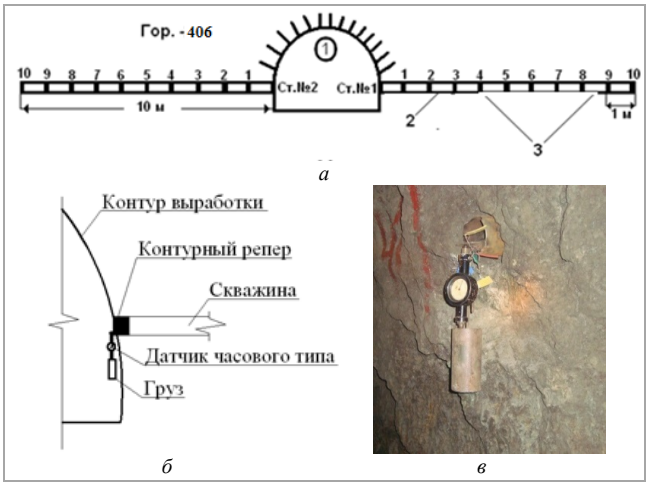


Рис. 21. Схема установки реперных станций (*а*), схема измерения показаний (*б*) и процесс измерений (*в*): *1* – выработка; *2* – скважина; *3* – глубинные реперы

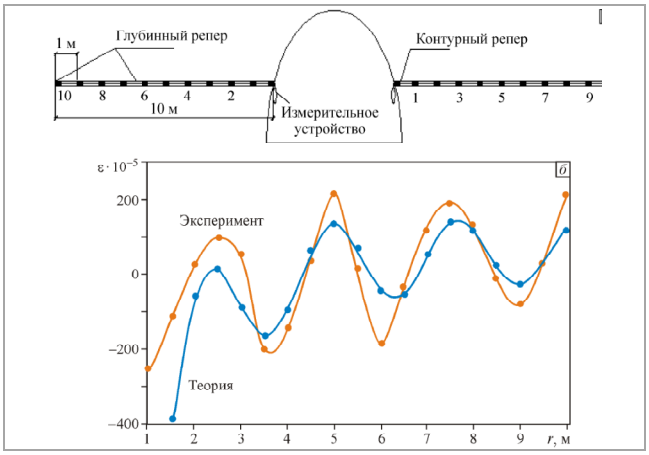


Рис. 22. Зональный характер деформирования вмещающих пород по Станции 1 (блок Север-8 на горизонте –406 м), скважине 1, рудника «Николаевский» на 33-е и 42-е сутки после установки

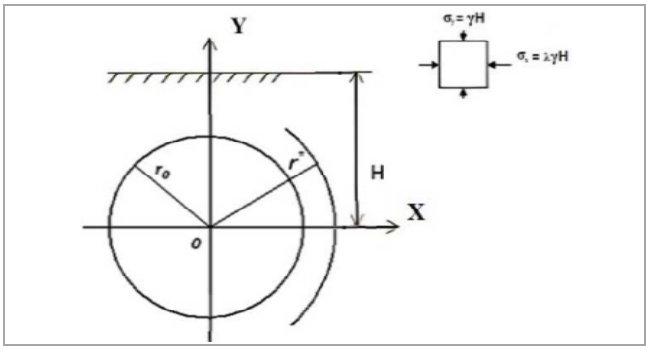


Рис. 23. Расчетная схема задачи о незакрепленной выработке

В качестве упрощений принимаются условия несжимаемости и гидростатичности нагружения на бесконечности, что с достаточной точностью воспроизводит условия натурного эксперимента. В полярной системе координат уравнения равновесия совпадают с первым соотношением системы (16) в предположении отсутствия зависимости от φ и z:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}\left(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}\right) = 0, \quad r_0 < r < \infty,$$

где σ_{rr} – радиальное напряжение; $\sigma_{\varphi\varphi}$ – тангенциальное напряжение.

На контуре выработки ($r = r_0$) внешние силы отсутствуют, а на бесконечности они заданы следующим образом:

$$\sigma_{rr} = 0 \text{ при } r = r_0, \quad \sigma_{rr}, \sigma_{\varphi\varphi} \to \sigma_\infty \text{ при } r \to \infty,$$

где $\sigma_\infty = \gamma_n \cdot H$, γ_n– удельный вес пород; H – глубина заложения выработки.

На большой глубине для системы «горный массив–выработка» в общем случае не выполняется условие совместности деформаций, так что функция R не обращается в нуль. Так как задача плоская и осесимметричная, то в полярных координатах уравнение (14) примет вид:

$$\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}r\frac{d}{dr}\right)^2 \Phi_{n-clas} = \gamma^2 \Phi_{n-clas}, \qquad (31)$$

где r – расстояния от центра выработки до точки массива, м. Решение уравнения (31), убывающее при $r \to \infty$ дается формулой:

$$\Phi_{n-clas} = aJ_0(\sqrt{\gamma}r) + bN_0(\sqrt{\gamma}r) + cK_0(\sqrt{\gamma}r), \qquad (32)$$

в которой $J_0(\sqrt{\gamma}r), N_0(\sqrt{\gamma}r), K_0(\sqrt{\gamma}r)$ функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого порядка соответственно. В полярных координатах компоненты поля напряжений (18) равны

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rr,clas} + \sigma_{rr,n-clas}, \sigma_{n-Eucl} = \frac{1}{r}\frac{d\Phi_{n-clas}}{dr},$$
$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\varphi\varphi,clas} + \sigma_{\varphi\varphi,n-clas}, \sigma_{\varphi\varphi,n-clas} = \frac{d^2\Phi_{n-clas}}{dr^2}.$$

Решение для классического поля напряжений хорошо известно в научной литературе, тогда отсюда и из (34) получаем

$$\sigma_{rr} = \sigma_\infty\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2r}\frac{E}{\gamma^{3/2}(1-\nu^2)}\times$$
$$\times\left[aJ_1(\sqrt{\gamma}r) + bN_1(\sqrt{\gamma}r) + cK_1(\sqrt{\gamma}r)\right],$$
$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_\infty\left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2r}\frac{E}{\gamma^{3/2}(1-\nu^2)}\times \qquad (33)$$
$$\times\left[aJ_1(\sqrt{\gamma}r) + bN_1(\sqrt{\gamma}r) + cK_1(\sqrt{\gamma}r)\right] -$$
$$-\frac{E}{\gamma(1-\nu^2)}\left[aJ_0(\sqrt{\gamma}r) + bN_0(\sqrt{\gamma}r) - cK_0(\sqrt{\gamma}r)\right].$$

Здесь σ_∞, E – гравитационное напряжение, модуль Юнга соответственно (МПа); r – расстояние от центра выработки до точки массива, м. $J_0(\sqrt{\gamma}r), N_0(\sqrt{\gamma}r), K_0(\sqrt{\gamma}r)$ – функции Бесселя, Неймана и Макдональда первого порядка соответственно; γ, a, b, c – параметры математической модели зонального разрушения сильно сжатых горных пород вокруг подземных выработок.

Для определения параметров сформулируем дополнительные условия. Поскольку на контуре выработки образуется зона разрушения, то функция R достигает максимального по модулю своего значения в точках контура. Допуская, что при зональном характере разрушения массива во всех остальных зонах процессы разрушения идут по идентичному механизму, второе граничное условие для функции R определяем как ее экстремальность в первой зоне разрушения. Отсюда граничные условия задачи записываются в следующем виде:

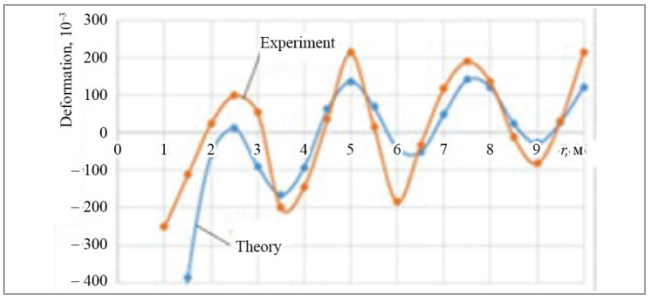


Рис. 24. Сравнение теоретических и экспериментально измеренных деформаций массива вокруг глубоких горных выработок

$$\frac{\partial R}{\partial r} = 0, \text{ при } r = r_0, \frac{\partial R}{\partial r} = 0 \text{ при } r = r^*,$$

где r^* – середина первой зоны разрушения, определяемая из эксперимента. Соотношения позволяют уменьшить число неизвестных параметров до двух: c и γ.

Из (33) видно, что радиальное σ_{rr} и тангенциальное напряжение $\sigma_{\varphi\varphi}$ в массиве горной породы вокруг круговой незакрепленной горной выработки определяются суммарным результатом воздействия гравитационного поля напряжений, зависящего от глубины заложения выработки, и напряжения, порожденного влиянием дефектной структуры массива.

Получение решения (33) для напряжений позволяет переходить к следующему этапу исследований, заключающемуся в разработке методов определения параметров модели: входящих в эти выражения коэффициентов c и параметра γ. Методы определения параметров разработаны в соответствии с физическими представлениями о зонах сдвиго-отрывного разрушения пород [84; 85]. Для условий, приведенных выше экспериментальных исследований, определены амплитудный параметр модели, а также параметр периодичности γ. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследований показывает их полную качественную и хорошую количественную сходимость (рис. 24).

Подводя итог комплексу экспериментально-аналитических работ, проведенных с период 2007–2025 гг., необходимо отметить, что за это время разработана общетеоретическая концепция «сильного сжатия» горных пород и массивов, основывающаяся на комплексе полученных результатов.

Горные породы и массивы рассматриваются как энергонасыщенные (состоящие в критическом состоянии) иерархически блочные образования геосреды, находящиеся в условиях как технологических воздействий, так и самоподдерживающихся процессов деформирования и разрушения. Такое состояние порождает мезотрещинные структуры различного уровня, являющиеся формированиями подготовки макропроцессов разрушения, блокообразования и обеспечения блочной иерархии массива.

Установлена высокая степень эффективности моделирования мезотрещинных структур горных пород и массивов системой неевклидовых моделей, отличающихся между собой только значениями параметров, методы определения которых имеют специфику для каждого структурного уровня разрушения геосреды. Учет неевклидовой структуры модели позволяет избежать двух неизбежных следствий представления дискретных сред сплошными: это, во-первых, «исчезновение» мезоструктур в результате процедуры усреднения и, во-вторых, неопределенность масштаба усреднения, поскольку модель отхватывает

исключительно мезоуровень возникающих сдвиго-отрывных трещин [86].

При этом сама возможность использования неевклидовых моделей связана в геомеханике сильного сжатия с введением в анализ мезотрещинных процессов разрушения и выделения микро-, мезо- и макроуровней разрушения, где микроуровень ограничивается, как правило, внутриблоковым процессом дефектообразования, мезоуровень рассматривается как блокограничный, а макроуровень разрушения обусловлен объединением взаимодействующих мезотрещин. Процессы взаимодействия мезотрещин приводят к формированию мезотрещинных структур контрастного типа, которые являются областями подготовки макроразрушения.

В свою очередь, макропроцессы разрушения геосреды теснейшим образом связаны с блокообразованием, имеющим иерархический характер, что заставляет выделить уже структурные уровни разрушения, разделенные, в соответствии с требованием структурной геологии, масштабом 1:100. Это зафиксировано в работе введением геоструктурного коэффициента $K_{gs} = 100$.

Выделение структурных уровней и исследование их влияния на макропроцессы, происходящие в сильно сжатых массивах горных пород, показали перспективность такого подхода в объяснении многих аномальных природных явлений. И, рассматривая возникающие на каждом структурном уровне геосреды макродефекты как мезодефекты следующего структурного уровня, геомеханика сильного сжатия переходит к иерархической системе структурных уровней, на каждом из которых существуют собственные микро-, мезо- и макромасштабы разрушения.

Совокупность проведенных исследований можно характеризовать как «Геомеханику сильно сжатых горных пород и массивов». Это весьма перспективное направление прогнозирования, в частности, геодинамических явлений разрушения горных пород и массивов, связанное с введением надежных предвестников разрушения. Другим перспективным направлением является рассмотрение мезоструктур разрушения пород «веерного» типа, что позволяет прояснить назревшие вопросы тектонофизики и сейсмологии, например, такие как аномально низкое сдвиговое сопротивление на возникающих при землетрясениях разломах и аномально высокие скорости развития трещин [87–89].

Заключение

Геомеханику сильно сжатых горных пород и массивов можно определить как направление научных исследований, являющееся симбиозом классической геомеханики [90] и физической мезомеханики [31]. Геомеханика сильно сжатых пород рассматривает многоуровневое напряженно-деформированное состояние пород геосреды как материалов с разномасштабной структурой, при различных видах их нагружения в условиях термодинамически неравновесных процессов деформирования и разрушения. В критических состояниях каждого структурного уровня геосреды накопленная внутренняя упругая (обратимая) энергия горных пород обеспечивает процессы микро-, мезо- и макроразрушения отрывного и сдвигового типа.

Критические состояния геосреды обусловлены предельными (близкими к пределу прочности) напряжениями пород и массивов, находящихся при этом в состоянии механического и термодинамического неустойчивого равновесия. В этих условиях даже небольшие возмущения поля напряжений делают возможным переход из состояния статического равновесия к динамическому разрушению с выходом процесса разрушения на другой масштабный уровень. На практике это проявляется в различных формах проявлений горного давления в подземных выработках: в виде интенсивного заколообразования пород на стенках горных выработок, горного удара, протяженного сдвигового разрыва, фазовых переходов (во флюидосодержащих породах) и т.п. Такие проявления горного давления часто связаны с гибелью горнорабочих и значительным материальным ущербом.

Это и обусловливает необходимость выделения исследований вопросов устойчивости и предельного напряженного состояния пород (а также газонасыщенного угля) в специальное научное направление, как в отношении экспериментальной части, так и математического моделирования, что, безусловно, повлечет новую постановку задач и разработку новых средств исследований в рамках геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов.

Развиваемая в России геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов является комплексным научным направлением, представляющим симбиоз классической (общей) геомеханики и физической мезомеханики, объект, предмет и методы исследования которой продиктованы особенностями критических состояний геосреды.

Объектом исследований геомеханики сильного сжатия является энергонасыщенная (находящаяся в критическом состоянии) иерархически блочная геосреда в условиях как технологических воздействий разрушения породного массива, так и самоподдерживающихся процессов деформирования и разрушения. Предметом исследований нового направления геомеханики являются указанные критические состояния геосреды, обусловленные формированием и развитием мезотрещинных структур контрастного типа, представляющих собой области метастабильного состояния горных пород и массивов и объединяющих как очаговые, так и околоочаговые области подготовки макроразрушения.

Цель геомеханики сильного сжатия состоит в установлении закономерностей формирования и развития мезотрещинных структур горных пород и массивов, обусловленных как внешними воздействиями на различных структурных уровнях блочной геосреды, так и процессами самоорганизации ее деформирования и разрушения.

Основной задачей геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов является разработка надежных методов прогноза возникновения и реализации критических состояний геосреды, а также методов управления ими на различных структурных уровнях.

Экспериментальные методы исследований геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов направлены на фиксирование и воспроизведение в лабораторных условиях процессов формирования и развития мезотрещинных структур различных структурных уровней и отличаются от традиционных методов геомеханики учетом одновременности протекающих процессов деструкции в очаговых областях подготовки макроразрушения и процессов консолидации материала геосреды в околоочаговых областях.

Теоретические методы исследований геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов имеют в своей основе моделирование геосреды на различных структурных уровнях комплексом однотипных континуальных моделей, учитывающих несовместность деформаций в каждой математической точке, и отличающихся только значениями параметров моделей, а также методами определения этих параметров.

Таким образом, «Геомеханика сильно сжатых горных пород и массивов» имеет собственные цель, объект, предмет, задачи и методы исследований, выделяющие ее из классической геомеханики как самостоятельное научное направление.

Новые подходы и методы исследования в рамках геомеханики сильного сжатия позволили уже на современной стадии исследований понять и объяснить многие аспекты разномасштабного разрушения горных пород, наведенную структуру сдвиговых и отрывных трещин в горных породах, режимы их развития, а также адекватно подойти к выявлению прогнозных критериев катастрофических проявлений горного давления при разработке месторождений на больших глубинах.

Библиографический список

1. Gillmor, C.S. Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France / C.S. Gillmor. – Princeton University Press, 2017. – 328 p.
2. Coulomb, Ch.A. Sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture / Ch.A. Coulomb // Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savons. – Paris, 1776. – Vol. VII. – P. 343–382. DOI: 10.1051/geotech/2023019
3. Gillispie, C.C. Pierre-Simon Laplace, 1749–1827: a life in exact science / C.C. Gillispie. – 2018. – 335 p.
4. Oldroyd, D.R. Thinking about the earth: A history of ideas in geology / D.R. Oldroyd. – Harvard University Press, 1996. – 410 p.
5. Werner, A.G. Von den äußerlichen Kennzeichen der Fossilien / A.G. Werner. – Crusius, 1774. – 302 p.
6. Prony, R. Recherches sur la poussée des terres, et sur la forme et les dimensions à donner aux murs de revêtement / R. Prony. – De l'Imprimerie de la République, 1802. – 55 p.
7. Тимошенко, С. История науки о сопротивлении материалов / С. Тимошенко. – М.: ГИТТЛ, 1957. – 536 с.
8. Das, B.M. Principles of geotechnical engineering / B.M. Das, K. Sobhan. – 5th Ed. – Boston: CENGAGE Learning, 2017. – 764 p.
9. Historical background and evolution of Soil Mechanics / P. Lokkas [et al.] // Wseas Transactions on Advances in Engineering Education. – 2021. – Vol. 18. – P. 96–113. DOI: 10.37394/232010.2021.18.10
10. Mohr, O. Über die Darstellung des Spannungszustandes und des Deformationszustandes eines Körperelementes und über die Anwendung derselben in der Festigkeitslehre / O. Mohr // Der Civilingenieur. – 1882. – Vol. 28, no. 2. – P. 113–156.
11. Gross, D. Some remarks on the history of fracture mechanics / D. Gross // The History of Theoretical, Material and Computational Mechanics-Mathematics Meets Mechanics and Engineering. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – P. 195–209. DOI: 10.1007/978-3-642-39905-3_12
12. Terzaghi, K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage / K. Terzaghi. – Vienna, Deuticke, 1925. – 399 p.
13. Terzaghi, K. Principles of soil mechanics: a summary of experimental studies of clay and sand / K. Terzaghi. – McGraw-Hill, 1926. – 98 p.
14. Ehlers, W. Porous media in the light of history / W. Ehlers // The History of Theoretical: Material and Computational Mechanics-Mathematics Meets Mechanics and Engineering. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – P. 211–227. DOI: 10.1007/978-3-642-39905-3_13
15. Fillunger, P. Der auftrieb in talsperren / P. Fillunger // Osterr. Wochenschrift für den offentl. – Baudienst, 1933. – P. 567–570.
16. Boudou, M. Analysis of major flood events: Collapse of the Malpasset Dam / M. Boudou, A. Moatty, M. Lang // Floods. – 2017. – P. 3–19. DOI: 10.1016/B978-1-78548-268-7.50001-8
17. Geomorphological impact, hydraulics and watershed-lake connectivity during extreme floods in mountain areas: The 1959 Vega de Tera dam failure, NW Spain / J. Santos-González [et al.] // Geomorphology. – 2021. – Vol. 375. – P. 107531. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107531
18. Brown, E.T. Fifty years of the ISRM and associated progress in rock mechanics / E.T. Brown // 12th ISRM Congress, October 16–21, 2011. – Beijing, China: ISRM, 2011. DOI: 10.1201/b11646-7
19. Müller, L. Fundamentals of rock mechanics: Lectures Held at the Department for Mechanics of Deformable Bodies / L. Müller. – Udine: Intern Centre for Mechanical Sciences, 1969. – 73 p.
20. Николаевский, В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред / В.Н. Николаевский. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
21. Болховитинов, Л.Г. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс / Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко, М.А. Садовский. – М: Наука, 1987. – 105 с.
22. Садовский, М.А. Естественная кусковатость горной породы / М.А. Садовский // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829–831.
23. Zhurkov, S.N. Principles of the kinetic approach of fracture prediction / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, V.A. Petrov // Theoretical and applied fracture mechanics. – 1984. – Vol. 1, no. 3. – P. 271–274. DOI: 10.1016/0167-8442(84)90007-7
24. Журков, С.Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 259, № 6. – С. 1350–1353.
25. Zonal disintegration of rocks around underground openings, part 1: Data of in situ observations / E.I. Shemyakin, G.L. Fisenko, M.V. Kurlenya [et al.] // J. of Mining Science. – 1986. – No. 3. – P. 3–15. DOI: 10.1007/BF02500863
26. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – Тула: ТПИ, 1992. – 252 с.
27. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, В.Н. Опарин [и др.]. – БИ, 1992. – № 1.
28. Курленя, М.В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I, II / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 1999–2000. – № 3–4. – DOI: 10.1007/BF02550237, 10.1023/A:1026673105750
29. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев [и др.] – Новосибирск: Наука, 1990. – 255 с.
30. Kadić, A. A gauge theory of dislocations and disclinations / A. Kadić, D.G.B. Edelen. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983. – 290 p. DOI: 10.1007/3-540-11977-9
31. Панин, В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22. DOI: 10.3103/S0025654410040023
32. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: в 2-х т. / под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995.
33. Мясников, В.П. О периодическом характере деформирования трещиноватых горных пород / В.П. Мясников, М.А. Гузев, В.В. Макаров // Тр. XI Российской конф. по механике горных пород, Санкт-Петербург, 9–11 сентября 1997 г. – СПб.: Изд-во ГАСУ, 1997. – С. 333–337.
34. Guzev, M.A. Non–Euclidean model of the zonal disintegration of rocks around an underground working / M.A. Guzev, A.A. Paroshin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2001. – No. 42. – P. 131–139. DOI: 10.1023/A:1018877015940
35. Модельные представления зонального деформирования и разрушения породного массива вокруг подземных выработок / М.А. Гузев, В.В. Макаров, А.А. Парошин [и др.] // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. междунар. конф., 2–4 октября 2001 г. – 2001. – С. 139–144.
36. Гольдин, С.В. Макро- и мезоструктуры очаговой области землетрясения / С.В. Гольдин // Физическая мезомеханика – 2005. – Т. 8, № 1. – С. 5–14. DOI: 10.1016/j.tafmec.2005.03.003
37. Нелинейная механика геоматериалов и геосред / П.В. Макаров [и др.]. – Новосибирск: Гео, 2007. – 235 с.
38. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок / В.Н. Опарин [и др.] // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – С. 278.
39. Проблемы геомеханики сильно сжатых горных пород и массивов // XIII Междунар. российско-китайская конф. по геомеханике больших глубин, 28 июля – 1 августа 2025 г. / под ред. проф. В.В. Макарова. – Владивосток: Изд-во Дальневосточн. фед. ун-та, 2025. – 192 с. DOI: 10.24866/7444-5951-2
40. Гузев, М.А. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок / М.А. Гузев В.В. Макаров. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – 232 с.
41. Макаров, В.В. Экспериментальное исследование периодических структур деформирования и разрушения горных пород в массиве вокруг подземных выработок и в образцах / В.В. Макаров // Строительство шахт и подземных сооружений: сб. – М.: Изд-во МГТУ, 1998. – С. 125–128.
42. Odintsev, V.N. Multilevel model of cleavage fracture in brittle rocks in compression / V.N. Odintsev, V.V. Makarov // Journal of Mining Science. – 2024. – Vol. 60, no. 2. – P. 320–331. DOI: 10.1134/S1062739124020133
43. Fairhurst, C. The maximum phenomenon of rock splitting parallel to the direction compression in the neighbourhood of a surface / C. Fairhurst, N.G.W. Cook // ISRM Congress. – ISRM, 1966. – P. ISRM-1CONGRESS-1966-115. DOI: 10.1007/s00603-006-0096-5
44. Hoek, E. Fracture initiation and propagation in intact rock – a review / E. Hoek, C.D. Martin // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2014. – Vol. 6, no. 4. – P. 287–300. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.06.001
45. Horii, H. Brittle failure in compression: splitting faulting and brittle-ductile transition / H. Horii, S. Nemat-Nasser // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1986. – Vol. 319, no. 1549. – P. 337–374. DOI: 10.1098/rsta.1986.0101
46. Одинцев, В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород / В.Н. Одинцев. – М.: Изд-во ИПКОН РАН, 1996. – 166 с.
47. Goldstein, R.V. About compression fracture / R.V. Goldstein, N.M. Osipenko // Physical Mesomechanics. – 2019. – Vol. 22, no. 6. – P. 439–455. DOI: 10.1134/S1029959919060018
48. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression / L.N. Germanovich [et al.] // Pure and Applied Geophysics. – 1994. – Vol. 143, no. 1. – P. 117–149. DOI: 10.1007/BF00874326
49. Fracture characteristics of sliding crack in brittle rock: Analysis based on an improved equivalent crack model / Y. Zhang, S. Cui, Z. Yu [et al.] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. – P. 893549. DOI: 10.3389/feart.2022.893549
50. Gol'dshtein, R.V. A model of the fracture of a slightly porous material under compression or tension / R.V. Gol'dshtein, V.M. Ladygin, N.M. Osipenko // Soviet Mining Science. – 1974. – Vol. 10, no. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1007/BF02501596
51. Hedayat, A. Numerical simulation of crack initiation and growth in rock specimens containing a flaw under uniaxial compression / A. Hedayat, F.A. Ochoa-Cornejo, Y. Khasawneh // ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – ARMA, 2015. – P. ARMA-2015-487. DOI: 10.1007/s00603-014-0627-4
52. Bobet, A. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material / A. Bobet, H.H. Einstein // International Journal of Fracture. – 1998. – Vol. 92, no. 3. – P. 221–252. DOI: 10.1023/A:1007460316400
53. Kolari, K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids / K. Kolari // International Journal of Solids and Structures. – 2017. – Vol. 115. – P. 27–42. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012
54. Experimental investigation and numerical simulation on the crack initiation and propagation of rock with pre-existing cracks / X. Xun, X. Wu, Q. Guo, M. Cai // Ieee Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 129636–129644. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009230
55. Nikitin, L. A dilatancy model of tensile macrocracks in compressed rock / L. Nikitin, V. Odintsev // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 1999. – Vol. 22, no. 11. – P. 1003–1009. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00232.x
56. Muskhelishvili, N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity / N.I. Muskhelishvili. – 1st ed. – Springer Dordrecht, 1977. DOI: 10.1007/978-94-017-3034-1
57. Marshak, S. Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics / S. Marshak, B.A. Van Der Pluijm. – WW Norton, 2004. – 656 p.
58. Макаров, В.В. Структурная иерархия блочной геосреды / В.В. Макаров, В.Н. Одинцев // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 47–52. DOI: 10.15372/FPVGN2023100207

59. Мухамедиев, Ш.А. О дискретном строении геосреды и континуальном подходе к моделированию ее движения / Ш.А. Мухамедиев // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7, № 3. – P. 347–381. DOI: 10.5800/GT-2016-7-3-0213
60. Ломакин, В.А. Теория упругости неоднородных тел / В.А. Ломакин. – 2-е изд. – М.: Ленанд, 2014. – 367 с.
61. Рац, М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств / М.В. Рац. – М.: Наука, 1968. – 108 с.
62. Трусов, П.В. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения / П.В. Трусов, А. И. Швейкин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV
63. Panin, V.E. Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media / V.E. Panin, Y.V. Grinyaev, V.E. Egorushkin // Mechanics of solids. – 2010. – Vol. 45, no. 4. – P. 501–518. DOI: 10.3103/S0025654410040023
64. Nemat-Nasser, S. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials / S. Nemat-Nasser, M. Hori. – Elsevier, 2013. – Vol. 37.
65. Zhurkov, S.N. Micromechanics of the failure of polymers / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, A.I. Slutsker // Strength of Materials. – 1971. – Vol. 3, no. 2. – P. 162–167. DOI: 10.1007/BF01527988
66. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite / D. Lockner, J.D. Byerlee, V. Kuksenko [et al.] // Nature. – 1991. – Vol. 350, no. 6313. – P. 39–42. DOI: 10.1038/350039a0
67. Dyskin, A.V. Model of dilatancy of brittle materials with cracks under compression / A.V. Dyskin, R.L. Salganik // Mechanics of solids. – 1987. – Vol. 22, no. 6. – P. 165–173. DOI: 10.1016/0148-9062(93)90028-C
68. Bilby, B.A. Continuous distributions of dislocations: a new application of the methods of non-Riemannian geometry / B.A. Bilby, R. Bullough, E. Smith // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1955. – Vol. 231, no. 1185. – P. 263–273. DOI: 10.1098/rspa.1955.0171
69. Методика составления геоструктурных схем (моделей) скальных массивов в основаниях гидросооружений / Пособие к СНиП 2.02.02-85. – Л.: ВНИИГ, 1991. – 119 с.
70. Руппенейт, К.В. Введение в механику горных пород / К.В. Руппенейт, Ю.М. Либерман. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 356 с.
71. Myasnikov, V.P. Thermomechanical model of elastic–plastic materials with defect structures / V.P. Myasnikov, M.A. Guzev // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2000. – 33.3. – P. 165–171. DOI: 10.1016/S0167-8442(00)00011-2
72. Myasnikov, V.P. A geometrical model of the defect structure of an elastoplastic continuous medium / V.P. Myasnikov, M.A. Guzev // J Appl Mech Tech Phys. – 1999. – No. 40. – P. 331–340. DOI: 10.1007/BF02468531
73. Myasnikov, V.P. Geometric model of internal self-balanced stresses in solids / V.P. Myasnikov, M.A. Guzev // Dokl. Phys. – 2001. – No. 46. – P. 740–741. DOI: 10.1134/1.1415593
74. Myasnikov, V.P. Self-equilibrated stress fields in a continuous medium / V.P. Myasnikov, M.A. Guzev, A.A. Ushakov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2004. – No. 45. – P. 558–566. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000030334.32046.e6
75. Godunov, S.K. Elements of continuum mechanics and conservation laws / S.K. Godunov, E.I. Romenskii. – New York: Springer, 2003. – 258 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-5117-8
76. Novikov, S.P. Modern geometric structures and fields / S.P. Novikov, I.A. Taimanov. – Hardcover.
77. Kondo, K. On the geometrical and physical foundations of the theory of yielding / K. Kondo // Proc. 2nd Japan Nat. Congr. Applied Mechanics. – 1952. – Vol. 2. – P. 41–47. DOI: 10.1007/978-3-540-68360-5_17
78. Guzev, M.A. Structure of kinematic and force fields in the Riemannian continuum model / M.A. Guzev // J Appl Mech Tech Phy. – 2011. – No. 52. – P. 709–716. DOI: 10.1134/S002189441105004X
79. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука. 1996. – 240 с.
80. Guzev, M.A. Modeling elastic behavior of compressed rock samples in the pre-failure zone / M.A. Guzev, V.V. Makarov, A.A. Ushakov // Journal of Mining Science. – 2005. – Vol. 41, no. 6. – P. 497–506. DOI: 10.1007/s10913-006-0012-0
81. Guzev, M.A. Non-classical solutions of a continuum model for rock descriptions / M.A. Guzev // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2014. – Vol. 6, no. 3. – P. 180–185. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.03.001
82. Guzev, M.A. Principals of geomechanics of highly stressed rock and rock massifs / M.A. Guzev, V.N. Odintsev, V.V. Makarov // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2018. – Vol. 81. – P. 506–511. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.018
83. Mesocracking structures of the 'source type'in highly stressed rocks / V.V. Makarov, L.S. Ksendzenko, A.M. Golosov [et al.] // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – P. 403–411. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_28_Makarov
84. Zonal failure structure near the deep openings / V.V. Makarov [et al.] // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – P. 423–432.
85. Makarov, V.V. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions / V.V. Makarov, M.A. Guzev, V.N. Odintsev // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8, no. 2. – P. 164–169. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.09.010
86. Guzev, M. Non-Euclidean model of high stressed rocks and rock masses / M. Guzev, V. Makarov, L. Ksendzenko // ISRM EUROCK. – ISRM, 2015. – P. ISRM-EUROCK-2015-160. DOI: 10.1016/B978-0-12-821205-9.00020-4
87. Tarasov, B.G. New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength / B.G. Tarasov, M.A. Guzev // Rockbursts and Seismicity in Mines. – 2013. – P. 31–40. DOI: 10.18303/2619-1563-2024-1-118
88. Tarasov, B. Shear fractures of extreme dynamics / B. Tarasov // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Vol. 49, no. 10. – P. 3999–4021. DOI: 10.1007/s00603-016-1069-y
89. Tarasov, B.G. Improved concept of lithospheric strength and earthquake activity at shallow depths based upon the fan-head dynamic shear rupture mechanism / B.G. Tarasov, M.F. Randolph // Tectonophysics. – 2016. – Vol. 667. – P. 124–143. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.11.016
90. Jaeger, J.C. Fundamentals of rock mechanics / J.C. Jaeger, N.G.W. Cook, R. Zimmerman. – 4th Ed. – Wiley-Blackwell, 2007. – 488 p.

References

1. Gillmor C.S. Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France. Princeton University Press, 2017, 328 p.
2. Coulomb Ch.A. Sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique présentés à l'Académie Royale des Sciences, par divers savons*. Paris, 1776, vol. VII, pp. 343-382. DOI: 10.1051/geotech/2023019
3. Gillispie C.C. Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: a life in exact science, 2018, 335 p.
4. Oldroyd D.R. Thinking about the earth: A history of ideas in geology. Harvard University Press, 1996, 410 p.
5. Werner A.G. Von den äußerlichen Kennzeichen der Fossilien. Crusius, 1774, 302 p.
6. Prony R. Recherches sur la poussée des terres, et sur la forme et les dimensions à donner aux murs de revêtement. De l'Imprimerie de la République, 1802, 55 p.
7. Timoshenko S. Istoriia nauki o soprotivlenii materialov [History of the science of strength of materials]. Moscow: GITTL, 1957, 536 p.
8. Das B.M., Sobhan K. Principles of geotechnical engineering. 5th Ed. Boston: CENGAGE Learning, 2017, 764 p.
9. Lokkas P. et al. Historical background and evolution of Soil Mechanics. *Wseas Transactions on Advances in Engineering Education*, 2021, vol. 18, pp. 96-113. DOI: 10.37394/232010.2021.18.10
10. Mohr O. Über die Darstellung des Spannungszustandes und des Deformationszustandes eines Körperelementes und über die Anwendung derselben in der Festigkeitslehre. Der Civilingenieur, 1882, vol. 28, no. 2, pp. 113-156.
11. Gross D. Some remarks on the history of fracture mechanics. *The History of Theoretical, Material and Computational Mechanics-Mathematics Meets Mechanics and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 195-209. DOI: 10.1007/978-3-642-39905-3_12
12. Terzaghi K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Vienna, Deuticke, 1925, 399 p.
13. Terzaghi K. Principles of soil mechanics: a summary of experimental studies of clay and sand. McGraw-Hill, 1926, 98 p.
14. Ehlers W. Porous media in the light of history. *The History of Theoretical: Material and Computational Mechanics-Mathematics Meets Mechanics and Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 211-227. DOI: 10.1007/978-3-642-39905-3_13
15. Fillunger P. Der auftrieb in talsperren. *Osterr. Wochenschrift für den offentl*. Baudienst, 1933, pp. 567-570.
16. Boudou M., Moatty A., Lang M. Analysis of major flood events: Collapse of the Malpasset Dam. *Floods*, 2017, pp. 3-19. DOI: 10.1016/B978-1-78548-268-7.50001-8
17. Santos-González J. et al. Geomorphological impact, hydraulics and watershed-lake connectivity during extreme floods in mountain areas: The 1959 Vega de Tera dam failure, NW Spain. *Geomorphology*, 2021, vol. 375, 107531 p. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107531
18. Brown E.T. Fifty years of the ISRM and associated progress in rock mechanics. *12th ISRM Congress, October 16-21*, 2011. Beijing, China: ISRM, 2011. DOI: 10.1201/b11646-7
19. Müller L. Fundamentals of rock mechanics: Lectures Held at the Department for Mechanics of Deformable Bodies. Udine: Intern Centre for Mechanical Sciences, 1969, 73 p.
20. Nikolaevskii V.N. Mekhanika poristykh i treshchinovatykh sred [Mechanics of porous and fractured media]. Moscow: Nedra, 1984, 232 p.
21. Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F., Sadovskii M.A. Deformirovanie geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess [Deformation of the geophysical environment and the seismic process]. Moscow: Nauka, 1987, 105 p.
22. Sadovskii M.A. Estestvennaia kuskovatost' gornoi porody [Natural lumpiness of rock]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1979, vol. 247, no. 4, pp. 829-831.
23. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Principles of the kinetic approach of fracture prediction. *Theoretical and applied fracture mechanics*, 1984, vol. 1, no. 3, pp. 271-274. DOI: 10.1016/0167-8442(84)90007-7
24. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovaniia mekhanicheskogo razrusheniia [Physical principles of predicting mechanical failure]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1981, vol. 259, no. 6, pp. 1350-1353.
25. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. et al. Zonal disintegration of rocks around underground openings, part 1: Data of in situ observations. *J. of Mining Science*, 1986, no. 3, pp. 3-15. DOI: 10.1007/BF02500863
26. Bulychev N.S. Mekhanika podzemnykh sooruzhenii [Mechanics of underground structures]. Tula: Tul'skii politekhnicheskii institut, 1992, 252 p.
27. Shemiakin E.I., Kurlenia M.V., Oparin V.N. et al. Otkrytie № 400 SSSR. Iavlenie zonal'noi dezintegratsii gornykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok [USSR Discovery No. 400. The phenomenon of zonal disintegration of rocks around underground workings.]. BI, 1992, no. 1.
28. Kurlenia M.V., Oparin V.N. Problemy nelineinoi geomekhaniki. Chast' I, II [Problems of Nonlinear Geomechanics. Parts I, II]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1999-2000, no. 3-4. DOI: 10.1007/BF02550237, 10.1023/A:1026673105750
29. Panin V.E., Griniaev Iu.V. et al. Strukturnye urovni plasticheskoi deformatsii i razrusheniia [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk: Nauka, 1990, 255 p.
30. Kadić A., Edelen D.G.B. A gauge theory of dislocations and disclinations. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1983, 290 p. DOI: 10.1007/3-540-11977-9
31. Panin V.E. Osnovy fizicheskoi mezomekhaniki [Fundamentals of physical mesomechanics]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 5-22. DOI: 10.3103/S0025654410040023
32. Fizicheskaia mezomekhanika i komp'iuternoe konstruirovanie materialov [Physical mesomechanics and computer-aided design of materials]. Ed. V.E. Panin. Novosibirsk: Nauka, 1995.
33. Miasnikov V.P., Guzev M.A., Makarov V.V. O periodicheskom kharaktere deformirovaniia treshchinovatykh gornykh porod [On the periodic nature of deformation of fractured rocks]. *Trudy XI Rossiiskoi konferentsii po mekhanike gornykh porod, Saint Petersburg, 9-11 September 1997*. Saint Petersburg: GASU, 1997, pp. 333-337.

34. Guzev M.A., Paroshin A.A. Non-Euclidean model of the zonal disintegration of rocks around an underground working. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2001, no. 42, pp. 131-139. DOI: 10.1023/A:1018877015940
35. Guzev M.A., Makarov V.V., Paroshin A.A. et al. Model'nye predstavleniia zonal'nogo deformirovaniia i razrusheniia porodnogo massiva vokrug podzemnykh vyrabotok [Model representations of zonal deformation and destruction of rock mass around underground workings]. *Geodinamika i napriazhennoe sostoianie nedr Zemli. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii, 2-4 October 2001*. Novosibirsk, 2001, pp. 139-144.
36. Gol'din S.V. Makro- i mezostruktury ochagovoi oblasti zemletriaseniia [Macro- and mesostructures of the earthquake focal zone]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 5-14. DOI: 10.1016/j.tafmec.2005.03.003
37. Makarov P.V. et al. Nelineinaia mekhanika geomaterialov i geosred [Nonlinear mechanics of geomaterials and geoenvironments]. Novosibirsk: Geo, 2007, 235 p.
38. Oparin V.N. et al. Zonal'naia dezintegratsiia gornykh porod i ustoichivost' podzemnykh vyrabotok [Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings]. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2008, 278 p.
39. Problemy geomekhaniki sil'no szhatykh gornykh porod i massivov [Advances in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Masses]. *XIII Mezhdunarodnaia rossiisko-kitaiskaia konferentsiia po geomekhanike bol'shikh glubin, 28 July - 1 August 2025*. Ed. professor V.V. Makarov. Vladivostok: Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2025, 192 p. DOI: 10.24866/7444-5951-2
40. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatykh gornykh porod vokrug vyrabotok [Deformation and destruction of highly compressed rocks around workings]. Vladivostok: Dal'nauka, 2007, 232 p.
41. Makarov V.V. Eksperimental'noe issledovanie periodicheskikh struktur deformirovaniia i razrusheniia gornykh porod v massive vokrug podzemnykh vyrabotok i v obraztsakh [Experimental study of periodic structures of deformation and destruction of rocks in the massif around underground workings and in samples]. *Stroitel'stvo shakht i podzemnykh sooruzhenii. Sbornik trudov*. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi gornyi universitet, 1998, pp. 125-128.
42. Odintsev V.N., Makarov V.V. Multilevel model of cleavage fracture in brittle rocks in compression. *Journal of Mining Science*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 320-331. DOI: 10.1134/S1062739124020133
43. Fairhurst C., Cook N.G.W. The maximum phenomenon of rock splitting parallel to the direction compression in the neighbourhood of a surface. *ISRM Congress*. ISRM, 1966, p. ISRM-1CONGRESS-1966-115. DOI: 10.1007/s00603-006-0096-5
44. Hoek E., Martin C.D. Fracture initiation and propagation in intact rock - a review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 6, no. 4, pp. 287-300. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.06.001
45. Horii H., Nemat-Nasser S. Brittle failure in compression: splitting faulting and brittle-ductile transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1986, vol. 319, no. 1549, pp. 337-374. DOI: 10.1098/rsta.1986.0101
46. Odintsev V.N. Otryvnoe razrushenie massiva skal'nykh gornykh porod [Detached destruction of a rock massif]. Moscow: Institut problem kompleksnogo osvoeniia nedr Rossiiskoi akademii nauk, 1996, 166 p.
47. Goldstein R.V., Osipenko N.M. About compression fracture. *Physical Mesomechanics*, 2019, vol. 22, no. 6, pp. 439-455. DOI: 10.1134/S1029959919060018
48. Germanovich L.N. et al. Mechanisms of brittle fracture of rock with pre-existing cracks in compression. *Pure and Applied Geophysics*, 1994, vol. 143, no. 1, pp. 117-149. DOI: 10.1007/BF00874326
49. Zhang Y., Cui S., Yu Z. et al. Fracture characteristics of sliding crack in brittle rock: Analysis based on an improved equivalent crack model. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, 893549 p. DOI: 10.3389/feart.2022.893549
50. Gol'dshtein R.V., Ladygin V.M., Osipenko N.M. A model of the fracture of a slightly porous material under compression or tension. *Soviet Mining Science*, 1974, vol. 10, no. 1, pp. 1-9. DOI: 10.1007/BF02501596
51. Hedayat A., Ochoa-Cornejo F.A., Khasawneh Y. Numerical simulation of crack initiation and growth in rock specimens containing a flaw under uniaxial compression. *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. ARMA, 2015, ARMA-2015-487 p. DOI: 10.1007/s00603-014-0627-4
52. Bobet A., Einstein H.H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material. *International Journal of Fracture*, 1998, vol. 92, no. 3, pp. 221-252. DOI: 10.1023/A:1007460316400
53. Kolari K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, vol. 115, pp. 27-42. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.02.012
54. Xun X., Wu X., Guo Q., Cai M. Experimental investigation and numerical simulation on the crack initiation and propagation of rock with pre-existing cracks. *Ieee Access*, 2020, vol. 8, pp. 129636-129644. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3009230
55. Nikitin L., Odintsev V. A dilatancy model of tensile macrocracks in compressed rock. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1999, vol. 22, no. 11, pp. 1003-1009. DOI: 10.1046/j.1460-2695.1999.00232.x
56. Muskhelishvili N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. 1st ed. Springer Dordrecht, 1977. DOI: 10.1007/978-94-017-3034-1
57. Marshak S., Van Der Pluijm B.A. Earth structure: An introduction to structural geology and tectonics. WW Norton, 2004, 656 p.
58. Makarov V.V., Odintsev V.N. Strukturnaia ierarkhiia blochnoi geosredy [Structural hierarchy of block geomedium]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 47-52. DOI: 10.15372/FPVGN2023100207
59. Mukhamediev Sh.A. O diskretnom stroenii geosredy i kontinual'nom podkhode k modelirovaniiu ee dvizheniia [On discrete structure of geologic medium and continual approach to modeling its movements]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 347-381. DOI: 10.5800/GT-2016-7-3-0213
60. Lomakin V.A. Teoriia uprugosti neodnorodnykh tel [Theory of elasticity of inhomogeneous bodies]. 2nd ed. Moscow: Lenand, 2014, 367 p.
61. Rats M.V. Neodnorodnost' gornykh porod i ikh fizicheskikh svoistv [Heterogeneity of rocks and their physical properties]. Moscow: Nauka, 1968, 108 p.
62. Trusov P.V., Shveikin A. I. Mnogourovnevye modeli mono- i polikristallicheskikh materialov: teoriia, algoritmy, primery primeneniia [Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms, applications]. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 605 p. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV
63. Panin V.E., Grinyaev Y.V., Egorushkin V.E. Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media. *Mechanics of solids*, 2010, vol. 45, no. 4, pp. 501-518. DOI: 10.3103/S0025654410040023
64. Nemat-Nasser S., Hori M. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials. Elsevier, 2013, vol. 37.
65. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Slutsker A.I. Micromechanics of the failure of polymers. *Strength of Materials*, 1971, vol. 3, no. 2, pp. 162-167. DOI: 10.1007/BF01527988
66. Lockner D., Byerlee J.D., Kuksenko V. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 1991, vol. 350, no. 6313, pp. 39-42. DOI: 10.1038/350039a0
67. Dyskin A.V., Salganik R.L. Model of dilatancy of brittle materials with cracks under compression. *Mechanics of solids*, 1987, vol. 22, no. 6, pp. 165-173. DOI: 10.1016/0148-9062(93)90028-C
68. Bilby B.A., Bullough R., Smith E. Continuous distributions of dislocations: a new application of the methods of non-Riemannian geometry. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1955, vol. 231, no. 1185, pp. 263-273. DOI: 10.1098/rspa.1955.0171
69. Metodika sostavleniia geostrukturnykh skhem (modelei) skal'nykh massivov v osnovaniiakh gidrosooruzhenii. Posobie k SNiP 2.02.02-85 [Methodology for compiling geostructural diagrams (models) of rock masses at the foundations of hydraulic structures. Guide to SNiP 2.02.02-85]. Leningrad: VNIIG, 1991, 119 p.
70. Ruppeneit K.V., Liberman Iu.M. Vvedenie v mekhaniku gornykh porod [Introduction to Rock Mechanics]. Moscow: Gosgortekhizdat, 1960, 356 p.
71. Myasnikov V.P., Guzev M.A. Thermomechanical model of elastic-plastic materials with defect structures. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2000, 33.3, pp. 165-171. DOI: 10.1016/S0167-8442(00)00011-2
72. Myasnikov V.P., Guzev M.A. A geometrical model of the defect structure of an elastoplastic continuous medium. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1999, no. 40, pp. 331-340. DOI: 10.1007/BF02468531
73. Myasnikov V.P., Guzev M.A. Geometric model of internal self-balanced stresses in solids. *Dokl. Phys.*, 2001, no. 46, pp. 740-741. DOI: 10.1134/1.1415593
74. Myasnikov V.P., Guzev M.A., Ushakov A.A. Self-equilibrated stress fields in a continuous medium. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2004, no. 45, pp. 558-566. DOI: 10.1023/B:JAMT.0000030334.32046.e6
75. Godunov S.K., Romenskii E.I. Elements of continuum mechanics and conservation laws. New York: Springer, 2003, 258 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-5117-8
76. Novikov S.P., Taimanov I.A. Modern geometric structures and fields. Hardcover.
77. Kondo K. On the geometrical and physical foundations of the theory of yielding. *Proc. 2nd Japan Nat. Congr. Applied Mechanics*, 1952, vol. 2, pp. 41-47. DOI: 10.1007/978-3-540-68360-5_17
78. Guzev M.A. Structure of kinematic and force fields in the Riemannian continuum model. *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2011, no. 52, pp. 709-716. DOI: 10.1134/S002189441105004X
79. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. Ostatochnye napriazheniia v deformiruemykh tverdykh telakh [Residual stresses in deformable solids]. Moscow: Nauka, 1996, 240 p.
80. Guzev M.A., Makarov V.V., Ushakov A.A. Modeling elastic behavior of compressed rock samples in the pre-failure zone. *Journal of Mining Science*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 497-506. DOI: 10.1007/s10913-006-0012-0
81. Guzev M.A. Non-classical solutions of a continuum model for rock descriptions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 180-185. DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.03.001
82. Guzev M.A., Odintsev V.N., Makarov V.V. Principals of geomechanics of highly stressed rock and rock massifs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 81, pp. 506-511. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.018
83. Makarov V.V., Ksendzenko L.S., Golosov A.M. et al. Mesocracking structures of the 'source type'in highly stressed rocks. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 403-411. DOI: 10.36487/ACG_rep/1704_28_Makarov
84. Makarov V.V. et al. Zonal failure structure near the deep openings. *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 423-432.
85. Makarov V.V., Guzev M.A., Odintsev V.N. Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 164-169. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.09.010
86. Guzev M., Makarov V., Ksendzenko L. Non-Euclidean model of high stressed rocks and rock masses. *ISRM EUROCK*. ISRM, 2015, ISRM-EUROCK-2015-160 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-821205-9.00020-4
87. Tarasov B.G., Guzev M.A. New insight into the nature of size dependence and the lower limit of rock strength. *Rockbursts and Seismicity in Mines*, 2013, pp. 31-40. DOI: 10.18303/2619-1563-2024-1-118
88. Tarasov B. Shear fractures of extreme dynamics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, no. 10, pp. 3999-4021. DOI: 10.1007/s00603-016-1069-y
89. Tarasov B.G., Randolph M.F. Improved concept of lithospheric strength and earthquake activity at shallow depths based upon the fan-head dynamic shear rupture mechanism. *Tectonophysics*, 2016, vol. 667, pp. 124-143. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.11.016
90. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R. Fundamentals of rock mechanics. 4th Ed. Wiley-Blackwell, 2007, 488 p.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.