

Сергеевские чтения. «Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе». 2014. Вып. 16. М.: РУДН. с. 639-645.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗУЧЕНИЯ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ИНФОРМАЦИОННОМУ КРИТЕРИЮ

В.Н. Широков

МГУ им. М.В.Ломоносова, геологический факультет, 119899, Москва, Ленинские горы, д. 1,
тел. (495) 939-2204, shirokov@geol.msu.ru

Под естественным напряженным состоянием массивов горных пород мы будем понимать совокупность напряжений, формирующихся в массивах вследствие комплексного воздействия как естественных (природных), так и техногенных факторов. В их число входят силы гравитации, вертикальные и горизонтальные движения земной коры, процессы денудационного среза и переотложения горных пород, температурное поле, взвешивающее и гидродинамическое воздействие подземных вод, геохимические процессы, а также дополнительные пригрузки массивов, искусственные выемки и т.п.

Изучение, оценка и прогноз напряженного состояния массивов горных пород на разных этапах их изучения осуществляется на различных масштабных уровнях с использованием методов, существенно отличающихся друг от друга, прежде всего, их физической основой. На стадии региональных исследований для первичной оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород широко используют анализ геологического строения района, включая изучение тектонических структур, сейсмической активности и распределения параметров геофизических полей. В ходе детальных работ оценка напряженного состояния массивов осуществляется по материалам либо изучения керна геологоразведочных скважин и результатам их каротажа, либо специальных исследований, выполняемых на обнажениях и в горных выработках. Она основывается на результатах изучения физических и физико-механических свойств пород, остаточных проявлений напряжений в образцах и в массиве, характере разрушения стенок скважин и дискования керна и т.п. Кроме того, в процессе изучения напряженного состояния массивов горных пород широко используются разнообразные методы математического и физического моделирования.

Все многообразие методов изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород может быть классифицировано по целому ряду критериев: положенным в основу физическим принципам [31,35], объектам исследований [1,7], стадиям изучения напряженного состояния пород [19,33] и т.п. С точки зрения дальнейшего использования информации

о напряженно-деформированном состоянии весьма важной является её оценка по следующим позициям: а) содержание получаемой информации, б) её источник, в) отражаемый ею масштабный уровень, г) её характер или её достоверность.

Анализируя **содержание информации**, получаемой в массивах, горных породах либо на их моделях, следует иметь в виду, что она может отражать как напряжения, действующие в изучаемом объекте в настоящее время, иначе говоря, современные напряжения, так и те напряжения, под влиянием которых данный объект находился в прошлом, т.е. палеонапряжения. Как современные, так и палеонапряжения должны характеризоваться двумя параметрами, а именно – ориентировкой в пространстве и величиной напряжений.

Источником информации о напряженном состоянии изучаемых объектов могут служить либо природные тела – массивы горных пород и собственно горные породы, либо их модели. Последние в соответствии со взглядами на теорию моделирования могут быть разделены на математические (или знаковые) и физические. Среди математических моделей принято выделять их аналитические (например, модели сплошных и дискретных сред, модели упругого и упруго-пластического деформирования и пр.) и численные (МКР, МКЭ, МГЭ и т.п.) разновидности. В свою очередь физическое моделирование может быть основано на использовании эквивалентных материалов, электрогидродинамических аналогий и т.д.

Для практического применения данных о напряженно-деформированном состоянии чрезвычайно важным является также их чёткая привязка к **масштабному уровню** объекта исследований. Таковыми, как известно [25], могут быть: кристалл, порода, зона влияния сооружения и, наконец, собственно массив.

Говоря о **характере информации**, мы имеем в виду, что в процессе экспериментов измеряемым параметром могут быть как напряжения, так и иные физические величины – деформации, скорости распространения упругих волн, электрическое сопротивление и прочие показатели. Это обстоятельство позволяет все экспериментальные методы разделить на две группы: прямые методы, в ходе которых осуществляется непосредственный *замер* напряжений, и косвенные методы, которые предусматривают *расчёт* величин напряжений по функциональным или эмпирическим зависимостям.

Именно этот набор признаков, по нашему мнению, может быть положен в основу систематизации методов изучения напряженного состояния горных пород и массивов по информационному критерию. Присвоение каждому из признаков определенного индекса позволит для любого метода составить своеобразный паспорт, отражающий и характеризующий его потенциальные возможности. Принципиальная структура систематизации может быть представлена в следующем виде (рис.).

Анализ литературы, посвящённой изучению напряжённого состояния в тектонофизике, горном деле, инженерной геологии, петрологии и гидротехники, показал, что в этих областях геологии используется около 30

методов исследований, позволяющих получать информацию о напряжённом состоянии горных пород и слагаемых ими массивов. Их характеристика представлена в таблице.

- 1. Содержание информации [I, II; 1, 2]**
 - 1.1. Возраст напряжений [I, II]
 - 1.1.1. Современные [I]
 - 1.1.2. Палеонапряжения [II]
 - 1.2. Параметры структуры поля напряжений [1, 2]
 - 1.2.1. Ориентировка напряжений [I₁, II₁]
 - 1.2.2. Величины напряжений [I₂, II₂]
- 2. Источник информации (изучаемый объект) [А, Б; 1, 2; 1¹, 2¹, 3¹, 4¹]**
 - 2.1. Природные объекты [А]
 - 2.1.1. Массивы [А₁]
 - 2.1.2. Горные породы (образцы) [А₂]
 - 2.2. Модели [Б]
 - 2.2.1. Математические [Б₁]
 - 2.2.1.1. Аналитические [Б₁¹]
 - 2.2.1.2. Численные (МКР, МКЭ, МГЭ и т.п.) [Б₁²]
 - 2.2.2. Физические [Б₂]
 - 2.2.2.1. Эквивалентные материалы [Б₂¹]
 - 2.2.2.2. Электроинтеграторы [Б₂²]
 - 2.2.2.3. Фотоупругие материалы [Б₂³]
 - 2.2.2.4. Тензометрическая сетка [Б₂⁴]
- 3. Масштабный уровень информации [1, 2, 3, 4]**
 - 3.1. Кристалл [1]
 - 3.2. Порода [2]
 - 3.3. Зона влияния [3]
 - 3.4. Массив [4]
- 4. Характер информации или её достоверность [а, б; 1, 2]**
 - 4.1. Прямые данные (измерение напряжений) [а]
 - 4.2. Косвенные данные [б]
 - 4.2.1. Механические (измерение деформаций) [б₁]
 - 4.2.2. Физические (измерение скоростей, сопротивлений и т.п.) [б₂]

Рис. Систематизация методов изучения напряжённого состояния по информационному критерию

Условия применения названных выше методов и имеющиеся ограничения в их применении рассмотрены в монографии «Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах» [21].

Таблица. Характеристика методов изучения напряжённого состояния горных пород и массивов с учётом получаемой информации

№№ п/п	Методы	Индекс	Область применения	Источник
1	Анализ микроструктурных ориентировок в кристаллах	П ₁ -А ₂ -1-б	Тектонофизика, петрология	19, 22
2	Рентгеноструктурный анализ	П ₂ -А ₂ -1-б	Тектонофизика, инженерная геология, петрология	37, 38
3	Анализ разрывной тектоники (метод вторичных нарушений)	П ₁ -А ₁ -4-б	Тектонофизика	16, 19, 22, 27, 34, 36
4	Кинематический анализ плоскостей разрушения	И ₁ -А ₁ -4-б	Тектонофизика, инженерная геология	4, 19, 22, 27
5	Метод М.В. Гзовского	П ₁ -А-4-б	Тектонофизика	19, 22
6	Метод П.Н. Николаева		Тектонофизика	19, 22
7	Дистанционные наблюдения сети линейментов	П ₁ -А ₁ -4-а	Тектонофизика	19, 22
8	Анализ состояния (дискования) керна скважин	И ₂ -А ₂ -2-б	Горное дело, инженерная геология	10, 19
9	Анализ разрушения стенок и естественного искривления скважин (метод удлинения ствола)	И ₁ -А ₁ -4-б	Горное дело, инженерная геология	17, 19, 34, 36
10	Визуальное обследование характера разрушений на контуре горных выработок	И _{1,2} -А ₁ -4-б	Горное дело, инженерная геология	19, 36, 38
11	Свободная разгрузка образцов керна	И _{1,2} -А ₂ -2-б ₁	Горное дело, инженерная геология	3, 11, 30
12	Испытания образцов при статическом нагружении	П ₂ -А ₂ -2-а	Горное дело, инженерная геология	12, 35, 38
13	Метод акустической эмиссии	П ₂ -А-1,2-а	Горное дело, инженерная геология	15, 24, 31, 36, 38, 39
14	Метод естественной электромагнитной индукции	И _{1,2} -А ₁ -3-б ₂	Горное дело, инженерная геология	2
15	Наземные методы сейсмоакустики и гравиразведки	И ₂ -А ₁ -4-б ₂	Тектонофизика, инженерная геология	19
16	Метод разгрузки: варианты полной и частичной разгрузки	И _{1,2} -А ₂ -2-б ₁	Горное дело, инженерная геология, гидротехника	9, 19, 36, 38
17	Метод разгрузки: вариант восстановления или компенсационной нагрузки	И _{1,2} -А ₁ -3-а	Горное дело, инженерная геология, гидротехника	9, 19, 38
18	Скважинные варианты метода разгрузки с использованием различных схем	И _{1,2} -А-2-б ₁	Горное дело, инженерная геология, гидротехника	9, 19, 28, 29, 36, 38
19	Скважинные варианты метода возмущений	И _{1,2} -А-2-б ₂	Горное дело	38
20	Метод гидроразрыва	И _{1,2} -А ₁ -3-а	Инженерная геология, горное дело, нефтяная геология	19, 36, 38
21	Сейсмоакустические и ультразвуковые исследования в скважинах	И _{1,2} -А _{1,2} -2,4-б ₂	Инженерная геология, горное дело, гидротехника	19, 28, 34, 36, 38
22	Сейсмоакустический вариант метода разгрузки	И _{1,2} -А ₁ -3-б ₂	Инженерная геология, гидротехника	13, 34
23	Метод шахтной сейсморазведки	И ₁ -А ₁ -4-б ₂	Горное дело	19, 34
24	Метод эквивалентных материалов	И _{1,2} -Б ₂ ¹ -3,4-б	Инженерная геология, горное дело	7, 28, 32
25	Метод фотоупругости (поляризационно-оптический)	И _{1,2} -Б ₂ ³ -3,4-б	Инженерная геология, горное дело	5, 7, 28, 32, 36
26	Метод тензосетки	И _{1,2} -Б ₂ ⁴ -3,4-б	Инженерная геология	7, 28
27	Аналитические методы	И ₂ -Б ₁ ¹ -3,4-б	Инженерная геология, горное дело	14, 32
28	Численные методы	И _{1,2} , П _{1,2} -Б ₁ ² -3,4-б	Инженерная геология, горное дело, гидротехника, тектоника, петрология	14, 18, 20, 23

Литература

1. *Ардашев К.А., Ахматов В.И., Катков Г.А.* Методы и приборы для исследования проявлений горного давления. Справочник. – М., Недра, 1981. 128 с.
2. *Безродный К.П., Басов А.Д., Романевич К.В.* Контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород при строительстве тоннелей методом ЕЭМИ // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2011. №1. С.227-234.
3. *Берон А.И., Чирков С.Е.* Методические указания по определению напряженности горных пород по деформациям обратной ползучести. М.: ИГД им. Скопинского, 1973.
4. *Гущенко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М., 1979. С. 7-25.
5. *Зайцев А.В.* 3D модель напряженного состояния района Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2008. №4. С. 20-25.
6. *Иванов В.И., Турчанинов И.А.* Концентрация напряжений на забое скважины в условиях объемного сжатия. – Сб. Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1979. С. 26-35.
7. Изучение напряженного состояния массивов пород в инженерно-геологических целях. Научн. редакторы Г.С. Золотарев, С.Н. Максимов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1968. - 138 с.
8. *Ильюшин А.А.* Пластичность. Ч. 1. Упруго-пластические деформации. М.-Л., Гостехиздат, 1948. 376 с.
9. Инструкция по инженерным изысканиям в горных выработках, предназначенных для размещения объектов народного хозяйства. СН 484-76. М.: Стройиздат, 1977. 40 с.
10. *Исаев А.В., Запругаев А.П.* Оценка напряженного состояния массива пород по дискванию зерна при выбуривании скважин // В сб. Геомеханическая интерпретация результатов натурального эксперимента. / Сб. статей. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983.96 с.
11. *Калинин Э.В., Ковалко В.В., Могилевцев В.А., Панасьян Л.Л., Сим Л.А., Широков В.Н.* Комплексное изучение напряженного состояния массивов горных пород при разведке месторождений полезных ископаемых. // Вестн. Моск. ун-та, Сер. 4. Геология. 1995. №2.
12. *Карташов Ю.М., Ильинов М.Д., Проскураков Н.М.* Определение тензора напряжений горных пород в массиве по деформациям образцов // Диагностика напряженного состояния породных массивов. / Отв. ред. М.В.Курленя.- Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1980, С.67-70.
13. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений. / Под ред. А.И. Савича, Б.Д. Куюнджича. М.: Недра, 1990. 462 с.
14. *Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А.* Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск, Наука, 2005. 264 с.
15. *Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л.* Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. 456 с.
16. *Лукьянов А.Е.* Формирование современной гидрогеодинамической структуры петропавловского рудного поля (Южный Урал). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». Екатеринбург. 2008. 16 с
17. *Марысюк В.П.* Методика оценки напряженного состояния краевой части рудного массива при отработке глубоких рудников Талнаха. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт – Петербург. Санкт-Петербургский

государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (технический университет). 2009. 20 с.

18. *Мелешко А.В.* Методика расчета напряженно-деформированного состояния неоднородного слоистого массива при отработке пологих угольных пластов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный горный университет. 2012. 22 с.
19. Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород на различных стадиях геологоразведочного процесса (МР 41-06-079-86). М.: ВНИИгеоинформсистем, 1987. 116 с.
20. Методические указания по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный горный университет. 2011. 50 с.
21. Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах / Э. Калинин, Л. Панасьян, В. Широков и др. — Издательство Московского университета, 2003. — 261 с.
22. *Николаев П.Н.* Методика тектонодинамического анализа. / Под ред. Н.И. Николаева. — М.: Недра, 1992. 295 с.
23. *Оловянный А.Г.* Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб. ФГУП «Межотраслевой научный центр» ВНИМИ, ООО «Стресс». 2003. 234 с.
24. *Панасьян Л.Л., Петровский М.А., Колегов С.А.* Определение напряжений в горных породах методом акустической эмиссии // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций / Отв. ред. М.В. Курленя. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1985, с.7-11.
25. *Панасьян Л.Л., Широков В.Н.* Комплексное изучение напряженного состояния массивов по результатам испытания образцов (тезисы). - В сб. Всероссийская конференция "Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых". 23.05-25.05.1994. Новосибирск-Екатеринбург, 1994. С. 37-38.
26. *Рац М.В., Чернышев С.Н.* Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 195 с.
27. *Сим Л.А.* Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации). // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. №10.
28. Теоретические основы инженерной геологии. Механико-математические основы. / Под ред. акад. Сергеева Е.М. — М.: Недра, 1986. С.45-52.
29. Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах / Отв. ред. чл.-корр. АН СССР В.В.Ржевский. Л.: Наука, 1978. 229 с.
30. *Трушин А.В., Парамонов В.А., Федосова В.М., Торчинский В.М.* Определение напряженно-деформированного состояния массивов по образцам керна глубоких скважин. — В сб.: Изучение и прогноз гидрогеологических и инженерно-геологических условий глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986. С.78-82.
31. *Трушин А.В., Федосова В.М., Парамонов В.А.* Экспериментальное обоснование определения напряжений в массивах скальных пород по образцам на основе изучения акусто-эмиссионных эффектов при повторном нагружении // Прогнозная оценка гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых / Отв. ред. Г.Н. Кашковский. - М.: ВСЕГИНГЕО, 1992, С.39-57.
32. *Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В.* Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1977. 503 с.
33. *Турчанинов И.А., Панин В.И.* Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве. Л.: Наука, 1976. 163 с.

34. Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах. Часть 1. Под ред. М.В Курлени. Апатиты, КНЦ РАН, 1996. 161 с.
35. Широков В.Н. Новый подход к определению показателей физико-механических свойств скальных грунтов. - В сб.: Новые идеи в инженерной геологии. / Тр. научной конференции. 17-18 сентября 1996 г., г. Москва. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. С.109-110.
36. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. М.: МГУ, 2012. 111 с.
37. Шлыков В.Г. Рентгеновские исследования грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1991. 183 с.
38. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства. М.: Недра, 1989. С.143-265.
39. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Лыков К.Г. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти // ФТПРПИ.- 1990. - №2.
40. Haimson B.C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. – Int. journal. Rock Mech. and Mining Sciences Geomech. Abstr., 1978, v.15, №4, 167-178.