

УДК 622. 831

М.В. Курленя, В.Е. Миренков, С.В. Сердюков

***ВЗГЛЯД НА ПРИРОДУ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ
И ТЕХНОГЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ****

Решение многих народно-хозяйственных задач опирается на фундаментальные и прикладные исследования структурных характеристик и физико-механических свойств геологических сред, напряжённо-деформированного состояния недр и сейсмической опасности регионов. В настоящее время такой подход в практике инженерной деятельности вполне очевиден. Он связан с решением актуальных вопросов, относящихся к обоснованию масштабов горного производства, вовлечению в разработку месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, строительству подземных сооружений различного назначения и градостроительству, выбору площадок под возведение таких крупных объектов как АЭС, ГЭС и других. Реализация знаний о недрах Земли лежит в основе расчётных схем инженерных сооружений, в изыскании способов прогноза опасных ситуаций и поиска управления геомеханическими процессами при освоении минерально-сырьевых баз, разработке безопасного строительства и эксплуатации промышленных и гражданских объектов.

В предлагаемой работе приводится краткий обзор литературы, в котором затронуты научные достижения скорее

ведущих отечественных и зарубежных научных школ, чем отдельных исследователей. В статье также нашли отражение многолетний опыт работы и результаты исследований научной школы Института горного дела СО РАН «Динамика техногенных процессов и явлений в геологической среде и эволюция техносферы».

Цель данной публикации – обсуждение направлений и методов исследований, их взаимоотношения при изучении напряжённого состояния массива горных пород, обобщение полученных научных результатов и использование их в практической деятельности.

Природные поля напряжений в верхних слоях земной коры

В основе представлений о природном напряжённо-деформированном состоянии недр Земли лежат гравитационная теория и тектонические процессы, изменяющие данное исходное состояние. Дрейф континентов, погружение фронтальных частей плит литосферы в верхнюю мантию, вертикальные движения земной коры являются главным механизмом изменения природного напряжённого состояния недр и отражают эволюцию этого природного феномена

* Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта № 02.515.11.5028.

[1-3]. Тектонические движения представляют единую динамическую систему перемещающихся объёмов горных пород, в которой геомеханические процессы зависят от масштаба вовлечённых объёмов земной коры и фактора времени. Они сопровождаются сжатием или растяжением массива горных пород и определяют сейсмичность и деформирование недр.

Фундаментальные работы в области геологии и геомеханики показали, что существует не только рост напряжений с глубиной, но и наблюдается повышенная концентрация их в окрестности неоднородностей различной природы: разрывов, блоков, включений, узлов складчатости и т.п. Крупные геологические нарушения происходят либо путём сдвига, либо путём отрыва и представляют собой зоны со сложным строением. Внутри разлома горные породы раздроблены, обладают повышенной трещиноватостью и пониженной прочностью, ведут себя как вязкая среда.

Нестационарные процессы в зонах тектонических разломов в настоящее время малоизучены. Вместе с тем они имеют важное значение при прогнозировании разрушения породных массивов, для расчёта движения массивов блочной структуры, формирования природного поля напряжений и контроля сейсмической активности геологической среды.

С середины XX и начала XXI веков для изучения напряжённо-деформированного состояния земной коры, получения качественных характеристик её состояния и выявления закономерностей изменения полей напряжений в пространстве и времени, широко используются натурные, лабораторные и экспериментально-аналитические методы. К ним относятся:

- непосредственное измерение напряжений методами разгрузки и гидроразрыва;
- восстановление полей напряжений по натурным геологическим и сейсмическим данным;
- лабораторные методы исследований моделей участков земной коры;
- методы математического моделирования;
- экспериментально-аналитические методы на основе связей между физическими свойствами горных пород и напряжениями.

Прямыми методами измерения напряжений – методами разгрузки и гидроразрыва определяют абсолютные напряжения в отдельных точках массива горных пород. Первый основан на измерении деформаций горных пород, второй – на оценке давления жидкости при разрыве среды в окрестности скважины. Стержнем геофизических методов являются измерения физических свойств горных пород массива или параметров физических полей в нём. Методы изучения напряжений в массиве, основанные на активном использовании различных физических полей и на пассивной регистрации изменений естественных физических полей применяются преимущественно для мониторинга изменения природного (исходного) состояния силового поля недр в результате техногенной деятельности.

Большой объём экспериментальных исследований напряжённого состояния массива горных пород в натурных условиях был выполнен в СССР, а позднее в России, который получил обобщение в ряде работ [4-19]. В них рассматриваются результаты определения абсолютных напряжений на рудниках и шахтах Кольского полуострова, Кривого Рога, Урала, Алтае-Саянского региона, Талнахско-Октябрьского рудного узла, Куз-

басса, Донбасса, Казахстана, Киргизии, Таджикистана. Аналогичные экспериментальные работы велись за рубежом в Западной Европе, Северной Америке, Австралии и на Африканском континенте [20-26]. К сожалению, в настоящее время масштаб натуральных экспериментальных исследований повсеместно резко сократился.

Непосредственными измерениями напряжений в монолитных изверженных и метаморфизованных осадочных горных породах выявлена склонность их к аккумуляции упругой энергии и образованию областей, обладающих аномально высокой энергонасыщенностью. Такие породы относят к удароопасным в силу способности их к проявлениям динамических явлений при разработке месторождений полезных ископаемых. Природа этих явлений изучена недостаточно. Для массива горных пород, представляющих собой сложные многокомпонентные поликристаллические системы с существенными механическими и структурными неоднородностями, характерно неравномерное распределение напряжений. Экспериментально установлено, что в тектонически активных зонах горизонтальные напряжения значительны и в 3–5 раз превышают вертикальные [9, 12, 13, 15, 18, 27, 28]. Поле напряжений в горизонтальной плоскости анизотропно. На каждом месторождении полезных ископаемых отмечается связь величины и направлений максимального и минимального сжатия горных пород с геологическими структурами. Кроме того, в окрестности геологических нарушений, по которым происходят подвижки, наблюдается переориентация главных напряжений, возникают локальные области, где встречаются растягивающие напряжения [7, 9, 28, 29]. Оказывается, что иерархии полей напряжений и иерархии неустой-

чивости самоорганизующихся геодинамических систем имеют взаимную связь с блочной структурой, строением и неоднородностями массива горных пород.

Среди геофизических методов, применяемых для мониторинга геологической среды и оценки изменений напряжённого состояния, самыми распространёнными являются сейсмические. Они позволяют получать интегральную характеристику упругого состояния массива. Параметры распространения сейсмических волн несут в себе информацию о полях напряжений, действующих на месторождении. Такими параметрами являются величины скоростей продольных волн, поскольку они существенно зависят от напряжённого состояния горных пород; скорости распространения поперечных волн в большей мере характеризуют нарушенность сплошности породного массива. Сейсмические методы дают возможность также оценить соотношение двух главных нормальных напряжений в горизонтальной или субгоризонтальной плоскостях. Третья компонента главных напряжений почти всегда вертикальна и по своей величине близка к весу налегающих пород.

В 1970-е годы прошлого столетия большое внимание уделялось изучению природных полей напряжений, обусловленных различного рода неоднородностями в геологической среде, методами физического моделирования. Решение этой проблемы имеет важное значение для освоения рудных месторождений полезных ископаемых, так как 80 % их в мире приурочено к зонам разломов или узлам их пересечения. Характерно, что сдвиговым разрывным нарушениям принадлежит подавляющая часть структурных элементов земной коры. В работах [30, 31] приведены исследования динамических процессов, происходящих в недрах

Земли, и образования геологических структур и зон разрушения. Они основываются на оценке перемещений массивов горных пород в недрах. По ним определялись размеры зон разрушения и картины природных полей напряжений в приразломных зонах или в отдельных участках земной коры. Экспериментально установлено, что каждому региону присуще своё тектоническое развитие, которое определяется мощностью земной коры, её реологическими свойствами, степенью структурной однородности и скоростью деформаций. Вместе с тем применение этих исследований в практике разработки месторождений полезных ископаемых пока затруднено из-за отсутствия анализа связи размеров геологических трещин и создаваемых вокруг них изменённых напряжений.

Таким образом, современные знания о природном напряжённом состоянии недр Земли свидетельствует о неоднородности полей напряжений и изменении их под влиянием геологических процессов. Существует генетическая связь параметров полей напряжений с геологическими структурами, которым соответствует вполне определённая картина напряжённого состояния массива горных пород. Экспериментально установлено, что имеет место неравномерность и иерархичность распределения напряжений в пределах геологических структур и отдельных месторождений полезных ископаемых, а также внутри отдельных блоков, как по величине, так и по направлению их проявления [4, 7, 9, 13, 15]. Геомеханические и сейсмические исследования напряжённого состояния недр последних лет показали, что тектонические процессы оказываются активными в регионах со сложными геологическими структурами [27-29]. Роль других сил, таких как приливные и электромагнитные, на формирование

напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и гравитационное равновесие недр в настоящее время изучена слабо.

Многочисленные исследования и существующие представления о природном напряжённом состоянии недр Земли позволяют выделить две характерные составляющие. Первая – отвечает идеальному напряжённому состоянию земной коры, определяемому исключительно весом налегающей толщи горных пород, и вторая составляющая является следствием проявления тектонических процессов. При идеальном напряжённом состоянии главные напряжения – γH и горизонтальные – λH . Здесь γ – объёмный вес пород, H – глубина, λ – коэффициент бокового отпора. Для осадочных пород типа глин, слабых глинистых песчаных сланцев, каменной соли и слабых углей коэффициент бокового отпора близок к единице. В этом случае напряжённое состояние массива горных пород характеризуется законом гидростатики, т.е. главные напряжения в нём могут рассматриваться как $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Такая картина природного напряжённого состояния встречается на ряде угольных и соляных месторождений.

На нефтяных и газовых месторождениях на глубинах нескольких километров наблюдаются высокие пластовые давления, которые свидетельствуют об аномально больших природных напряжениях в массивах горных пород. При этом могут активно проявлять себя горизонтальные тектонические силы, в результате чего происходит движение породных блоков и срезание эксплуатационных колонн нефтедобывающих скважин.

Техногенные геомеханические поля напряжений

Хозяйственная деятельность человека и вмешательство в эволюцию природных и техногенных геомеханических процессов, вызывает наведённую сейсмичность, появление тектонической активности, возрастание энергонасыщенности горных пород в окрестности горных выработок и очистных пространств в местах строительства гидростанций и других крупных инженерных сооружений. Существует физическая связь между природным напряжённым состоянием геологической среды, нарушением гравитационного равновесия с техногенными тектоническими полями напряжений.

Наведённая сейсмичность массива горных пород отмечалась там, где присутствовали аномально высокие горизонтальные напряжения, извлекались большие объёмы горной массы и нарушался геодинамический режим. В отдельных случаях она проявлялась в виде динамических явлений и горно-тектонических ударов. Такие явления происходили при разработке твёрдых полезных ископаемых в Донбассе, Кузбассе, Воркутинском, Сулюктинском, Сучановском, Ткибульском, Шурабском и других угольных месторождениях, на Кировском апатитовом руднике в Хибинах, Северо-Уральском бокситовом руднике СУБРа, Октябрьском медно-никелевом месторождении Таймыра, железорудном месторождении в Горной Шории в Алтае-Саянском регионе, урановом Чаткальском руднике (СССР, Россия), в Остраво-Карвинском угольном бассейне (Чехословакия) и на угольных шахтах Польши, на калийном месторождении «Верра» (Германия) и т.д. Горные удары, как правило, происходили на рудниках, где площади выработанных пространств достигали десятков квадратных километров, а вмещающие толщи пород были подвержены многочисленным тектоническим нарушениям. Энергия гор-

ных ударов составляла 10^9 - 10^{12} Дж и магнитуду равную 3,5-5,0 [5, 9-12, 18, 23, 28, 32-35].

Аналогичные явления имели место при разработке нефтяных и газовых месторождений: Рейнджли и Денвер (США), Газлийского (Узбекистан), Старогрозненского (Дагестан), Усть-Балыкского (Западная Сибирь) и др., на которых наблюдалось повышение уровня сейсмичности, рост напряжённого состояния в локальных участках верхней части земной коры, сдвиги горных пород и оседание дневной поверхности. Степень гравитационной неустойчивости и характер активизации тектонических процессов целиком зависят от масштабов добычи углеводородов и режима поддержания пластового давления [36-39].

Мировой опыт разработки удароопасных месторождений со всей очевидностью подтвердил необходимость введения дополнительного элемента в горные технологии – мониторинга геологической среды. Он основывается на знаниях геомеханики, геологии и тектоники месторождения, оценке распределения параметров напряжённого состояния недр, горнотехнической ситуации и использовании измерительно-вычислительных комплексов. Наиболее предпочтительным методом диагностики и контроля геофизических полей в процессе разработки месторождений полезных ископаемых является сейсмоакустический, регистрирующий наведённую сейсмичную активность пород. Анализ пространственно-временных распределений очагов акустической эмиссии даёт возможность оценить особенности и общий характер геомеханических и геодинамических процессов в массиве горных пород. Участки массива с высокой плотностью распределения очагов эмиссии образуют акустические активные зоны, которые отражают ло-

кализацию их и направление миграции очагов динамических явлений.

Результаты определения продольных и поперечных волн и их отношений в пределах месторождения или шахтного поля обычно оформляют в виде специальных карт. Они являются информационной основой системы мониторинга геологической среды. По ним на основании анизотропии распространения сейсмических волн выделяют границы опасных участков, выявляют критические ситуации и делают прогноз динамических явлений в массиве горных пород.

О природе и теории горных ударов

С середины XX века техногенные воздействия на недра стали одной из причин наведённой сейсмичности, главным образом, в результате горных работ, заполнения водохранилищ при строительстве ГЭС и взрывов большой мощности. Возникающие при этом предельные напряжённно-деформированные состояния массивов горных пород приводят к потере их устойчивости и становятся причиной динамических явлений – горных ударов. Теории горных ударов в строгом понимании, к сожалению, до сих пор нет. Есть ряд представлений и гипотез о процессах, формирующих горный удар, основанных на прогностических принципах или параметрах, которые не раскрывают физическое содержание данного явления и поэтому не позволяют построить теорию.

К прогностическим параметрам относятся: напряжения, деформации, электрическое сопротивление и плотность горных пород, акустическая и электромагнитная эмиссия и др. Согласно существующим воззрениям напряжённное состояние массива горных пород является важнейшей характеристикой, опре-

деляющей природную и наведённую сейсмичность и в целом геофизические поля. В настоящее время на основе отмеченных параметров разрабатываются модели возникновения и развития очага горного удара, делаются попытки связать сейсмичку с тектоникой и техногенными напряжениями.

Рассмотрим одну из моделей возникновения и развития горного удара, которая близка к модели землетрясения и составляет достаточно верное представление о природе динамического явления (рис. 1). Различают следующую последовательность процессов, определяющих собой «явление горный удар».

На первой стадии происходит сжатие массива горных пород и квазистатическое изменение напряжённного состояния, не достигающее критических значений. Предвестники различного рода динамических явлений по существу отсутствуют, так как физические свойства пород меняются слабо по всему объёму. Изменение энергонасыщенности среды не значительно.

Вторая стадия геомеханического состояния массива характеризуется активизацией тектонических и техногенных процессов, ростом напряжённного состояния. Эти процессы особенно ярко выражены при приближении горных работ к геологическим нарушениям и отработке месторождений встречными фронтами на уменьшающийся целик, образовании больших выработанных пространств в результате извлечения полезных ископаемых и других видов инженерной деятельности. Физико-механические свойства массива горных пород на этой стадии подвержены изменению: уменьшается сцепление и разрушаются связи в горных породах, разрушается сплошность массива и резко увеличивается трещиноватость его в некотором объёме, активизируется взаи-

модействие трещин и возрастает скорость деформаций. Наиболее интенсивно смещения горных пород по этим причинам происходят в окрестности горных выработок, наблюдаются медленные сдвиги больших массивов горных пород и оседание дневной поверхности. Энергонасыщенность среды возрастает и достигает критических значений в малых областях, не связанных друг с другом. При этом возникают быстропротекающие нелинейные процессы: вязкопластичность, дилатансия и другие, которые не всегда позволяют рассматривать массив линейно деформированной средой. В горных выработках отмечается интенсивное заколообразование, разрушение горных пород в динамической форме в виде стреляния отколовшихся кусков породы от поверхностей выработок со скоростью до 50 м/с. Происходит накопление трещин на разных масштабных уровнях.

Возрастанию деформационных процессов сопутствует эмиссия упругих колебаний, возникающих при динамической перестройке нагруженного массива. Она является не только функцией изменяющейся нагрузки, но и реакцией массива на технологические воздействия, особенно на взрывные работы. Воздействия транс-формируются в развивающийся процесс трещинообразования горных пород, приводящий к проскальзыванию и подвижкам, сдвиговым деформациям различной амплитуды и трению по контактам. Для эмиссии свойственен высокочастотный диапазон этих сигналов, характеризующих деформационную активность геологической среды. Периоды повышенного уровня акустической эмиссии напрямую

связаны с усилением процессов трещинообразования. По пеленгу шумов оказывается возможным выделить аномальные и спокойные зоны состояния массива и с некоторой вероятностью прогнозировать в ряде случаев эпицентр будущего горного удара. В настоящее время на некоторых рудниках для прогнозирования накопления упругой энергии в массиве также успешно используют метод электрометрии. Применение отмеченных методов для составления карт наведённой геодинамики позволяет повысить достоверность и точность прогнозов, оценку развития опасных состояний массива и возникающих в нём процессов, включая заколообразование и внезапные обрушения горных пород в выработках. Существует связь между крутизной кривой развития динамического явления и изменением прогнозных параметров горных пород (рис. 1). Поэтому вариации физико-механических свойств являются одним из важнейших предвестников горных ударов.

Вторая стадия состояния массива горных пород – период накопления упругой энергии за счёт природных длительно действующих сил и техногенных кратковременных возмущений. Особо опасными возмущениями являются массовые взрывы при отбойке руды. В отдельных случаях они вызывают в глубине массива толчки и микроудары небольшой энергетической мощности. Динамический характер потери устойчивости массива происходит вследствие разности между притоком энергии и её поглощением в процессе разрушения горных пород. В настоящее время эта стадия поведения горных пород изучена недостаточно.

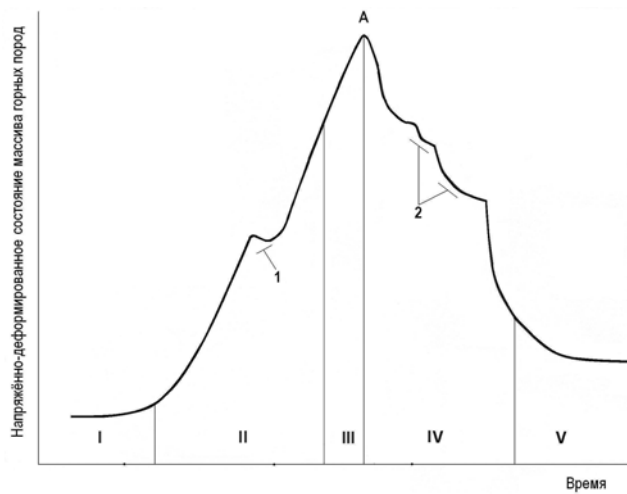


Рис. 1. Стадии состояний массива горных пород и типы проявлений динамических явлений: I – II – накопление упругой энергии; III – предельное напряжённо-деформированное состояние; IV – разгрузка массива; V – стабилизация напряжённого состояния; А – момент горного удара; 1, 2 – стреляние горных пород, толчки и микроудары

Третья стадия – предельное напряжённо-деформированное состояние массива горных пород, известное как катастрофическое, где формируются динамические явления: горный удар или техногенное землетрясение, стреляние горных пород, толчки и микроудары. На данной стадии наступает механическая неустойчивость значительного (сопоставимого с размером подземного сооружения) объёма горных пород, которая сопровождается резким ростом напряжений до критической величины с ускоряющейся деформацией и с последующим его падением (рис. 1).

Динамическое разрушение горных пород происходит на всех иерархических масштабных уровнях – от зарождения дислокаций до прорастания крупных трещин, образования трещин сдвига и отрыва и перехода в лавинное разрушение с объединением отдельных областей проявления динамических явлений в единую масштабную систему. В основе лавинного разрушения горных пород лежат вероятностные процессы, которые объясняются кинетической теорией прочности.

Они подобны цепным реакциям в химической кинетике. Объём массива горных пород, в котором происходит разрушение их и высвобождение некоторой доли накопленной потенциальной энергии деформаций, называется очагом горного удара. К сожалению, в настоящее время изучение физических процессов, происходящих в очаге горного удара, с помощью прямых измерений – недоступно. Однако наблюдения за проявлениями динамических явлений на угольных шахтах и рудниках позволили выявить три характерные зоны в массиве с разной степенью нарушенности горных пород в очаге горного удара или техногенного землетрясения. Их можно представить следующим образом (рис. 2). В зоне А первичное разрушение массива происходит в окрестности геологического нарушения или неоднородностей, где достигнуто предельное упругое состояние горных пород. Оно сопровождается образованием единичных макротрещин, отрывом породных блоков под действием растягивающих напряжений вследствие генерации и отражения сейсмических волн от свободных поверхностей выработок. Горные породы претерпевают одновременно несколько видов деформаций: упругие, исчезающие после горного удара, и пластиче-



Рис. 2. Зональность состояния массива горных пород после горного удара или техногенного землетрясения: А – очаг горного удара, зона разрушения горных пород; Б – зона наведённой трещиноватости; В – природное состояние среды

ские деформации, не исчезающие после разгрузки массива.

Зона *Б* в массиве возникает в результате высокой скорости снятия напряжений в очаге горного удара и генерируемых им мощных низкочастотных сейсмических волн. По этой причине происходит активизация множества микротрещин в горных породах, генерация акустической эмиссии и образование активной геофизической среды наведённой трещиноватости. Массивам горных пород в зонах *А* и *Б* свойственны нелинейные эффекты.

Зона *В* представляет первоначальную упругую среду и является проводником низкочастотных сейсмических волн, исходящих из очага горного удара.

Количество выделяемой энергии при горном ударе зависит от размеров очага. Часть её переносится объёмными волнами. Изучение продольных и поперечных волн в этот период связано, главным образом, со скоростью разгрузки массива. По изучению упругих волн определяют энергию горного удара, которая необратимо расходуется на подвижки отдельных

элементов массива горных пород, локальное разрушение его, пластические деформации и выброс горных пород в выработанное пространство на шахтах и рудниках. Состояние и структура массива взаимосвязаны с характеристиками активного

воздействия. Поэтому они могут быть спрогнозированы по уровню воздействия, а также изменены и регулируются с учётом накопленной энергии, например, при разработке нефтяных и газовых месторождений. Таким образом, горный удар следует рассматривать как техногенное динамическое явление, которое наблюдается при ведении горных и строительных работ в виде быстропротекающего энергетического процесса, сопровождающегося изменением напряжённого состояния и физических свойств массива горных пород и излучением сейсмических волн. Он оказывает локальное воздействие на геологическую среду, приводит к весьма значительным необратимым проявлениям процессов в некотором объёме массива горных пород и выступает в роли неравновесных энергетических полей. Переход геологической среды в новое состояние сопровождается процессами высвобождения энергии. На этой стадии её состояние предопределяет определённое число механизмов неустойчивости геодинамической системы. Причиной возникновения негативных событий при добыче полезных ископаемых слу-

жит несогласованность техногенных воздействий на геологическую среду. В связи с этим имеется возможность выделить некоторое число прогностических параметров и использовать их для управления полем напряжений и свойствами массива горных пород.

Четвёртая стадия состояния массива характеризуется перераспределением напряжений и их спадом до фоновых. Одновременно с этим в результате нарушения связей между отдельными элементами массива горных пород происходит сдвигание их. Генерация высокочастотных сейсмических волн разной интенсивности и электромагнитных излучений является следствием преимущественно прерываемых подвижек отдельностей и блоков по трещинам. В процессе самоорганизации энергонасыщенной среды, испытывающей пластическое деформирование, возникают внутренние силы, сдерживающие рост дефектов. В этот период не исключены слабые проявления динамических явлений в виде стреляния пород и толчков.

Пятая стадия поведения массива горных пород – заключительная фаза последствия горного удара. Массив возвращается в стабильное близкое к исходному напряжённому состоянию.

В настоящее время существует качественная картина развития горного удара, которая удовлетворительно объясняет физические процессы, предшествующие данному динамическому явлению, характеризует геодинамику месторождения и оценивает сейсмический режим горнодобывающего предприятия. Однако она не позволяет выявить фазы устойчивого и неустойчивого состояния массива горных пород, объяснить и предсказать кинетические характеристики процесса развития горного удара и установить число и природу управляющих параметров напряжённно-деформированного со-

стояния массива. Поэтому, по-прежнему, остаются нерешёнными актуальные задачи, относящиеся к прогнозу места и силы горного удара, времени его проявления.

Главными факторами, сдерживающими развитие теории горного удара, является большая изменчивость геологической среды и форм появления динамических явлений, отсутствие глубоких знаний о механизме кинетики и природе разрушения горных пород при различных режимах нагружения. Отсутствие строгой теории горных ударов не позволяет решать такие важные практические задачи как снятие накопленных критических напряжений в зоне будущего очага горного удара за счёт заблаговременного вызова большого числа слабых толчков и интенсивных смещений горных пород, а также создавать новые технологии горных работ, основанные на использовании внутренней энергии массива горных пород.

Проблемы создания системы мониторинга напряжённно-деформированного состояния массива горных пород при разработке нефтегазовых месторождений

Достоверное прогнозирование состояния геологической среды и, главное, природных катастроф – одна из важнейших проблем в горной науке. Создание системы мониторинга напряжённно-деформированного состояния массива горных пород для разрабатываемых месторождений полезных ископаемых, в том числе и для нефтяных и газовых требует новых подходов, методов и решений, отличных от уже воплощённых в существующие системы, применяемые на угольных шахтах и рудниках. В Институте горного дела СО РАН разрабатываются имитационные системы, состоящие из совокупности математических моделей тех процессов, которые

поддаются формализации [40]. Например, развиваются модели, позволяющие варьировать объёмами закачки в пласт воды и извлечения нефти, выбирать параметры пластового давления и таким образом изучить напряжённое состояние массива в окрестности добывающих скважин. С этой целью создаются алгоритмы вычислений и средств диалога с ЭВМ в зависимости от параметров пластового давления и методов управляющего воздействия на нефтегазоносный пласт.

Имитационная система даёт возможность экспериментировать с математическими моделями, формировать вопросы и гипотезы вычислительного эксперимента и получить ответы, отражающие состояние геологической среды и эксплуатации месторождения. Такой подход изучения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород нефтегазоносных месторождений целесообразно применять там, где нельзя провести контролируемые натурные эксперименты, или в условиях недостающих исходных данных и имеющей место неопределённости.

Посмотрим теперь с какими особенностями и проблемами приходится сталкиваться при построении мониторинга геологических сред в процессе разработки нефтегазовых месторождений. Геодинамическое состояние нефтепродуктивного пласта также как и для любых других месторождений полезных ископаемых определяется совокупностью явлений, связанных с изменением напряжённо-деформированного состояния фрагментированной среды, её внутренней структуры, а также с потоком энергии внешнего техногенного воздействия и обменом энергией между продуктивным пластом и вмещающими горными породами. Сложность объекта мониторинга нефтегазовых месторождений проявляется с одной стороны в недоста-

точной и неизвестной степени изученности их строения и свойств, а с другой в отсутствии физически обоснованных строгих математических описаний взаимосвязи состояния массива горных пород и наблюдаемых физических полей. Практическая польза известных упрощенных моделей, например, регулярной компоновки гранул, сводится к качественному обоснованию наблюдаемых опытным путём явлений изменения скорости и поглощения упругих волн, электропроводности пород и др.

Указанная проблема в геомеханике традиционно решается применением статистически значимых феноменологических моделей, основанных на длительных рядах повторяющихся наблюдений геодинамических событий на конкретном месторождении. Такой подход предполагает постоянное применение развёрнутой системы мониторинга, включающей в свой состав, как правило, сейсмологические наблюдения, различные инструментальные измерения в бортах подземных выработок и скважинах, просвечивание физическими полями, высокоточные геодезические наблюдения на дневной поверхности. Измерительную часть дополняет математическое моделирование, основной целью которого является пространственная экстраполяция точечных наблюдений на

Специфические особенности разработки нефтегазовых месторождений, сложные климатические условия и ограниченные возможности наземных наблюдений заставляют обратить внимание на скважинные методы контроля геодинамической обстановки. Известно, что наиболее изменённой частью продуктивного пласта, подвергнутого техногенному воздействию, является призабойная зона промысловых скважин, интенсивность геомеханических процессов в

которой маскирует геодинамическое состояние основного объёма горных пород. Это ограничивает инструментальные наблюдения низкочастотными методами, обладающими высокой глубиной исследования. Другая проблема состоит в конструкции нефтедобывающих скважин, обсаженных колонной стальных труб с цементированием пространства между горной породой и внешней поверхностью обсадных труб, что затрудняет использование электромагнитных полей. Кроме того, мониторинг предполагает многократные повторные измерения в близких условиях возбуждения и приёма сигналов, т.е. применение ненарушающих методов контроля объекта. Указанные причины ограничивают набор возможных способов контроля напряжённо-деформированного состояния. Например, не могут быть впрямую использованы известные методы деформационных измерений, разгрузки, измерения напряжений способом гидроразрыва, электромагнитные эмиссионные измерения, измерения электропроводности и ряд других.

Разрабатываемая в Институте горного дела СО РАН технология Мониторинга геодинамических процессов в продуктивном пласте основана на комплексировании методов сейсмического просвечивания, наведённой сейсмичности и оценке изменения напряжённого состояния горного массива по данным гидродинамических наблюдений с использованием существующего информационного обеспечения нефтяных месторождений. Применение указанных методов с одной стороны не зависит от сложных природных условий на дневной поверхности, а с другой обеспечивает непрерывное наблюдение за объектом с помощью физических процессов, чувствительных к различным временным масштабам изменения геодинами-

ческого состояния продуктивного пласта. Так, геомеханическая модель на основе гидродинамического мониторинга учитывает долговременную тенденцию в изменении геомеханической обстановки обусловленную извлечением из пласта нефти и нагнетанием вытесняющего агента. Сейсмическое просвечивание отражает текущее состояние объекта, а наведённая сейсмичность (изменение микросейсмического шума под действием внешнего сейсмического воздействия) - нестабильность, способность к дальнейшим изменениям контролируемой области пласта. Дополнительными средствами контроля самого мониторинга является проверка геомеханической обстановки с помощью единичных измерений деформации рельефа дневной поверхности и глубинных измерений напряжённого состояния горных пород.

Поле оцениваемых параметров обеспечивает построение архитектуры регулятора с разделением критериального пространства на интегральную, потенциометрическую и дифференциальную составляющие, что позволяет совместно решать задачи мониторинга и управления геодинамическими процессами в нефтяном месторождении. Обработка данных сейсмического мониторинга реализуется в суперкомпьютерном центре с использованием трёх независимых моделей, одна из которых обеспечивает решение вспомогательной задачи определения азимутальной ориентации трёхкомпонентных пунктов приёма; две другие - решение задачи сейсмического мониторинга с оценкой поля скоростей продуктивного пласта при нерегулярной системе трассирования и задачи локации наведённой сейсмичности с определением распределённого шумоподобного источника в пространстве пласта и оценки спектральной плотности энергии наведённого излучения.

Связь контролируемых параметров с катастрофическими проявлениями геодинамических процессов устанавливается статистической обработкой непрерывных наблюдений сейсмических событий и оценке их энергии.

Возможность управления геомеханическим состоянием объекта реализуется через рекомендации по изменению поля пластового давления в опасной зоне продуктивного пласта, на основе которых служба эксплуатации месторождения разрабатывает комплекс геолого-технических мероприятий. В случае недостаточной эффективности разработки такое управление может быть использовано в обратных целях - для контролируемого повышения неустойчивости объекта и его чувствительности к внешнему сейсмическому воздействию. Такое воздействие реализуется одновременным несинхронным включением группы сейсмических источников. Масштабное сейсмическое воздействие позволяет использовать накопленную геомеханическую энергию для изменения фильтрационных свойств коллектора и повышения эффективности его разработки. Заметим, что локальное сейсмическое воздействие на призабойную зону скважин с установленными источниками осуществляется постоянно и является дополнительным аргументом разветвления создаваемого комплекса на действующих промыслах. Необходимость такой аргументации связана с безлюдными технологиями разработки нефтепродуктивных пластов и, как следствие, малыми социальными последствиями катастрофических проявлений геодинамических событий. В нефтедобывающей промышленности, в отличие от угольной, нет внешнего дав-

ления, направленного на внедрение систем мониторинга геодинамических процессов в практику разработки месторождений. И это несмотря на то, что по мере усложнения геологических условий разработки, ввода новых месторождений с более трудноизвлекаемыми запасами, введения более агрессивных методов воздействия на залежь (форсированные отборы, массивное применение гидроразрыва, горизонтальные скважины), значение контроля геодинамического состояния продуктивных пластов возрастает. Поэтому реальность масштабного внедрения в практику таких систем напрямую связана с параллельным решением задач интенсификации добычи нефти и контроля за состоянием разработки [41, 42].

Задача объединения мониторинга состояния продуктивного пласта, контроля его разработки и воздействий, интенсифицирующих добычу нефти, в единый технологический комплекс формирует крупное научно-техническое направление по созданию основ перехода к «интеллектуальному» способу освоения нефтегазовых месторождений.

Итак, в статье были проанализированы природа напряжённо-деформированного состояния недр Земли, роль техногенных процессов в формировании динамических явлений, развитие теории горных ударов и мониторинг геологической среды при разработке месторождений полезных ископаемых. Между этими направлениями исследований существует устойчивая связь. В мировой литературе идёт активное обсуждение этой проблемы, порождённой прогрессом науки и народнохозяйственной деятельностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сила тяжести и тектоника*/Под ред. К.А. Де Джонга и Р. Шолтена. – М.: Мир, 1976. - 504 с.
2. *Косыгин Ю.А.* Тектоника. – М.: Недра, 1983. - 536 с.
3. *Артюшков Е.В.* Физическая тектоника. – М.: Наука, 1993. - 454 с.
4. *Каспарьян Э.В., Козырев А.А., Иофис М.А., Макаров А.Б.* Геомеханика. – М.: Высшая школа, 2006. - 503 с.
5. *Курленя М.В.* Геомеханика и техносфера. – Новосибирск: Наука, 2004. – 130 с.
6. *Макаров А.Б.* Практическая геомеханика. – М.: Горная книга, 2006. – 392 с.
7. *Айтматов И.Т.* Геомеханика рудных месторождений Средней Азии. – Фрунзе: Илим, 1987. – 246 с.
8. *Айтматов И.Т.* Проблемы техногенной геодинамики недр в горных регионах. // Напряжённое состояние породного массива и наведённая геодинамика недр. – Бишкек: ИФимГПИ, НАН КР, 2006. С. 13–30.
9. *Влох Н.П.* Управление горным давлением на подземных рудниках. – М.: Недра, 1994. – 207 с.
10. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
11. *Булат А.Ф., Хохолов В.К.* Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 168 с.
12. *Зубков А.В.* Геомеханика и геотехнология. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 335 с.
13. *Марков Г.А., Савченко С.Н.* Напряжённое состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. – Ленинград: Наука, 1984. – 138 с.
14. *Курленя М.В.* Результаты экспериментальных исследований напряжённого состояния угольных массивов Кузбасса // Напряжённое состояние земной коры. – М.: Наука, 1973. С. 128-134.
15. *Курленя М.В., Ерёменко А.А., Шрепп Б.В.* Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. - Новосибирск: Наука, 2001. – 184 с.
16. Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры. – Апатиты: АН СССР, 1982. – 146 с.
17. *Джеггер Ч.* Механика горных пород и инженерные сооружения. – М.: Мир, 1975. – 472 с.
18. *Управление горным давлением в тектонически напряжённых массивах.* – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. Части: I – 159 с., II – 162 с.
19. *Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г.* Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: Недра, 2001. – 414 с.
20. *Введение в механику скальных пород* (под ред. Х. Бока). – М.: Мир, 1983. – 276 с.
21. *Tectonic stresses in the Alpine Mediterranean region* // Rock Mechanics. – 1980. № 9. – 255 p.
22. *Linder Ernest N., Halpern Jack A.* In situ stress in North America // A compilation International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomech. Abstr. – 1978. – V. 15. -№ 4. – P. 183 – 203.
23. *Herget G.* Ground stress determination in Canada // Rock Mechanics. – 1974. - № 7. - P. 53 – 64.
24. *Worotnicki G., Denkam D.* The state of stress in the upper of the earth's crust in Australia according to measurements in tunnels and mines and from seismic observations. Investigation of Stress in rock – Advances in stress measurement // Preprint, Int Soc. Rock Mech. Symp., Sydney. – 1976. – P. 71 – 82.
25. *Brown E.T., Hock E.* Trends in relationships between measured in situ stresses and depth // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Geomechanics Abstracts. – 1978. - V.15. - № 4. - P. 211 – 215.
26. *Global patterns of tectonics stress nature* / Zoback M.L., Zoback M.D., Adams J. // Nature. – 1989. – V. 341. - № 6240. - P. 291 – 298.
27. *Hast N.* The Measurement of Rock Pressure in Mines. – Sveriges Geologiske Uhdersokning, Serie C. Arsbok, 1958. – 52. - №3. - P. 183.
28. *Мюллер Л.* Инженерная геология, механика скальных массивов. М.: Мир, 1971. – 256 с.
29. *Модели изменения напряжённо-деформированного состояния массивов пород в приложении к прогнозу землетрясений.* – Апатиты: АН СССР, 1982. – 152 с.
30. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.

31. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 112 с.
32. Курленя М.В., Серяков В.М., Ерёмко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
33. Егоров П.В., Петров А.И., Егоршин В.В. Предупреждение горных ударов в шахтах Кузбасса. Кемерово. Кемеровское книжное издательство, 1987. – 144 с.
34. Kurlenya M.V., Jeromenko A.A. Features of mining in Siberia under conditions of seismic-active folded region // Dynamic rock mass response to mining. The 5-th International Symposium on Roc burst and Seismicity in Mines. – Johannesburg. 2000. - P. 355 – 358.
35. Kurlenya M.V., Jeromenko A.A. Dynamic phenomena in mining iron – ore deposits in Siberia // “Mining in the 21st-Century – Quo Vadis?” 19th world Mining Congress. New Delhi, 2003. - P. 1597 – 1606.
36. Николаев Н.И. О состоянии изучения проблемы возбуждённых землетрясений, связанных с инженерной деятельностью. Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. – М., 1977. – С.8 – 21.
37. Plotnikova L.M., Flyonova M.G., Machmudova V.I. Induced seismicity in the Gazly gas field region // Garlands Beitrage Zur Geophysik. – 1990. – V. 99. - № 5 – P. 389 – 399.
38. Смирнова М.Н. Возбуждение землетрясения в связи с разработкой нефтяных месторождений (на примере Старогрозненского землетрясения) // Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. – М., 1977. – С. 128 – 141.
39. Кашиников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. - М.: Недра, 2007. – 468 с.
40. Курленя М.В., Красновский А.А., Миренков В.Е. Математическое моделирование деформирования массива пород, вмещающего нефтегазоносный пласт // ФТПРПИ. – 2007. - № 5. – С. 3 – 10.
41. Сердюков С.В., Курленя М.В. Механизм сейсмического воздействия на нефтепродуктивные пласты // Геология и геофизика. – 2007. - № 11. – С. 959 – 966.
42. Сердюков С.В., Курленя М.В. Механизм стимуляции добычи нефти сейсмическими полями малой интенсивности // Акустический журнал. – 2007, - Т. 53. - № 5. – С. 703 – 714. **ГИАН**

Коротко об авторах

Курленя Михаил Владимирович – академик РАН,
 Миренков Валерий Егорович – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Механика горных пород»,
 Сердюков Сергей Владимирович – доктор технических наук, член-корреспондент РАЕН, заведующий лабораторией «Волновые технологии добычи нефти»,
 Институт горного дела Сибирского отделения РАН.

Статья представлена семинаром научной школы «Динамика техногенных процессов и явлений в геологической среде и эволюция техносферы».

