К.Н.ТРУБЕЦКОЙ, С.Д.ВИКТОРОВ
Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Москва, Россия

СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД (ПО МАТЕРИАЛАМ НАУЧНЫХ РАБОТ, ПОДДЕРЖАННЫХ РОССИЙСКИМ ФОНДОМ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, И РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ ВЕДУЩИХ ИНСТИТУТОВ РОССИИ И НЕКОТОРЫХ СТРАН СНГ)

Проблема разрушения горных пород – одна из важнейших научных проблем в современной системе горных наук. Эффективность разрушения горных пород определяет эффективность работы всех последующих этапов горного производства. Мы предлагаем обзор современных научных исследований по разрушению горных пород, выполняемых в России и некоторых других странах СНГ.

Для выбора наиболее актуальных научных проблем лучше всего проанализировать проекты, которые поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ). В этом фонде, финансируемом Правительством Российской Федерации, разработана система научной оценки работ независимыми экспертами – ведущими специалистами нашей страны, позволяющая объективно выбирать исследования, наиболее важные в научном плане. Обзор грантов РФФИ служит объективной оценкой научного интереса к тем или иным аспектам этой проблемы. Выполнив обзор имеющихся грантов, мы выделили 76 из них, касающихся проблем разрушения горных пород, и с некоторым приближением разбили их на 10 групп по направлениям исследований.

Первое направление касается исследований свойств массива в целом. Рассматривается поведение горного массива различного масштаба: от структуры, сопоставимой с размерами земного ядра, до структур горного массива в пределах шахтного поля. В частности, в проекте 99-05-65537 (Е.А.Козлов, ВНИИГеофизика, Москва) рассматриваются процессы изменения напряженного состояния и трещиноватости горной породы в геологическом времени по данным структурной сейсмологии. Предлагается соответствующая теоретическая модель, позволяющая вести анализ этих процессов. В проекте 99-05-65464 (В.В.Адушкин, ИДГ РАН, Москва) выполняются очень интересные исследования изменения структуры Земли на границе внешнего и внутреннего ядер по данным замеров сейсмических волн от американских ядерных взрывов на наших антарктических станциях. В проекте 97-05-65395 (В.М.Цветков, ИДГ РАН, Москва) экспериментально исследованы механизмы дробления хрупкой среды при глубоком запредельном деформировании. Установлены механизмы разрушения и преобразования блочных структур на различных этапах деформирования. На основании анализа полей напряжений и распределения землетрясений высказаны предположения об основных причинах развития крупномасштабных деформационных процессов в земной коре.

Второе направление объединяет работы, в которых изучаются различные динамические явления в массиве горных пород. В проекте 97-05-64191 (А.М.Линьков, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург) разработаны теоретические основы решения задач о трещинах и блочных массивах горных пород на основе новых формулировок граничных интегральных уравнений и метода граничных элементов. В проекте 99-05-64263 (Ю.П.Шуплецов, ИГД УрО РАН, Екатеринбург) показано, что самые мощные динамические явления в массиве пород при разработке полезных ископаемых подразделяют на собственно горные удары и горно-тектонические толчки. Эти сейсмические явления имеют разные механизмы реализации энергии, которые определяются блочным строением массива и иерархической подчиненностью блоков по размерам. В проекте 99-05-64506 (А.В.Ловчиков, ГоИ КНЦ РАН, Апатиты) дан новый подход к построению систем инструментального мониторинга горных массивов в районах горных разработок, который основан на применении дискретной модели геофизической среды к деформированию массивов.

В проектах *третьего направления* изучались сейсмические явления начиная в основном с 2000 г. и поэтому говорить о результатах их выполнения пока преждевременно. Имеется только один проект 99-05-64663, начатый в 1999 г. В этом проекте (А.В.Курленя, ИГД СО РАН, Новосибирск) экспериментально обнаружены изменения свойств массива горных пород в монохроматическом сейсмическом поле наземного источника, которые свидетельствуют о существенно нелинейном характере взаимодействия горных пород с продолжительными знакопеременными динамическими воздействиями малой энергии.

Достаточно много проектов *четвертого направления* посвящено изучению свойств горной породы. В проекте 99-05-64300 (Е.И.Шемякин, ИГД, Люберцы) выполнен широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований основных закономерностей, количественных показателей механических свойств и критериев разрушения горных пород от их физического состояния: степени природной и техногенной нарушенности, напряженного состояния, температуры и водопоглощения при различных физических воздействиях. В проекте 99-05-64637 (В.И.Востриков, ИГД СО РАН, Новосибирск) выполнено физическое моделирование, натурные эксперименты и теоретический анализ особенностей совместного формирования акустических и электромагнитных волновых пакетов при импульсном возбуждении напряженных геосред. В проекте 99-05-64371 (О.А.Хачай, ИГФ УрО РАН, Екатеринбург) разработана система комплексного мониторинга напряженного состояния локальных неоднородных зон массивов горных пород с использованием геомеханических и геофизических методов.В этих и других проектах этого направления проявляется значительный интерес к изучению различных электромагнитных и сейсмических сигналов, сопровождающих процессы деформирования и разрушения горной породы.

В работах *пятого направления* изучено поведение горной породы в условиях мерзлоты. Рассмотрены различные аспекты поведения горной породы, содержащей газ или жидкость, влияние изменения напряженного состояния и разрушения горного массива на фильтрационные свойства горных пород. В проекте 97-05-64961 (Ю.Д.Зыков, МГУ, геологический факультет, Москва) на основе систематизированных материалов экспериментального изучения электрических и упругих свойств мерзлых грунтов начато создание банка данных, отвечающего требованиям информационных систем. Разработаны способы организации и представления данных. В проекте 97-05-65044 (Ю.Б.Горелик, ИГЗ СО РАН, Тюмень) выполнено теоретическое исследование гидропроводности мерзлых грунтов и показано, что при умеренном газосодержании гидропроводность есть функция универсального параметра, включающего отрицательную температуру и давление в жидкой фазе.

Шестое направление (горная порода, газ, жидкость) представлено следующими проектами. В проекте 98-05-65265 (Л.А.Назаров, ИГД СО РАН, Новосибирск) на основе объемной модели фильтрации газа в угольных пластах исследована эволюция полей напряжения и давления, формы зоны фильтрации. Предложен численно-аналитический метод решения одномерных задач связанной фильтрации в средах с неизвестной границей. В проекте 98-05-65572 (А.Г.Протосеня, СПГГИ, Санкт-Петербург) проведено теоретическое и экспериментальное моделирование процессов деформационного разупрочнения и разрушения неоднородных насыщенных горных пород при различных условиях и режимах нагружения. Выявлено влияние порового давления газа на деформирование и разрушение горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия. В проекте 97-05-64287 (С.В.Кузнецов, ИПКОН РАН, Москва) проведен анализ и теоретическое обобщение многолетних измерений давления газа в угольных пластах и результатов лабораторных исследований трещиноватости, деформационных и сорбционных свойств углей разной степени метаморфизма и тектонической нарушенности. Выявлено свойство усадки углей при десорбции газа, с которой связано раскрытие микротрещин и образование микрозазоров между отдельностями в угольном пласте.

Седьмое направление посвящено свойствам горной породы при горных работах. В проекте 99-05-65632 (А.С.Диманштейн, ИГД, Люберцы) выполнено обобщение результатов теоретических и экспериментальных (лабораторных и шахтных) исследований, а также математическое и физическое моделирование процессов поведения породных слоев вокруг полостей с од-

ной движущейся границей (например, концевых участков очистных забоев при разработке пластовых месторождений). В проекте 98-05-64547 (С.Б.Турунтаев, ИГД РАН, Москва) проведена систематизация данных по возбуждению техногенной сейсмичности в районах размещения предприятий добывающей промышленности, выполнен сравнительный статистический анализ параметров объектов, работы на которых привели к возбуждению сейсмических событий, с параметрами других объектов, оказывающих сходное воздействие, но не вызывающих изменения сейсмических режимов.

Восьмое направление (свойства с точки зрения последующего обогащения) представлено проектами, в которых изучаются изменения свойств минералов, влияющие на эффективность последующих процессов обогащения. В проекте 98-05-64127 (Э.А.Трофимова, ИПКОН РАН, Москва) разработана методика классификации синтетических и природных алмазов по оценке гидрофильно-гидрофобного состояния поверхности и флотируемости. Установлена взаимосвязь между гидрофобностью и электроповерхностными свойствами синтетических алмазов. В проекте 99-05-65236 (В.А.Чантурия, ИПКОН РАН, Москва) теоретическое и экспериментальное изучение взаимосвязи полупроводниковых и электрохимических свойств сульфидных минералов различного генезиса с фрактальной структурой их поверхности направлено на решение фундаментальной проблемы разделения минеральных компонентов с близкими технологическими свойствами.

В *девятом направлении* (разрушение горной породы и грунтов) можно отметить следующие проекты. В проекте 99-05-64427 (А.А.Еременко, ИГД СО РАН, Новосибирск) рассмотрена возможность перераспределения зон концентрации напряжений в массиве горных пород на месторождениях при взаимном действии природных и техногенных факторов. Теоретическое и экспериментальное изучение характера распределения энергетического параметра взрыва, выражающегося через энергетический коэффициент, равный отношению сейсмической энергии взрыва к массе зарядов ВВ, позволит оценить удароопасное состояние массива горных пород и установить критерии удароопасности. В проекте 98-05-64082 (С.Д.Викторов, ИПКОН РАН, Москва) разработана методика и проведены эксперименты по проникновению струй жидкого натрия в гипсовые образцы, насыщенные водой. Использовались низконапорные струи с давлением торможения до 5 атм. Результаты экспериментов показали высокую эффективность процесса взаимодействия вещества струи с разрушаемым материалом. В проекте 98-05-64830 (М.Г.Зильбершмидт, МГГУ, Москва) предложен комплекс параметров, количественно характеризующих генетическое структурное состояние природных полиминеральных агрегатов, позволяющий рассматривать межзеренное разрушение геоматериалов как процесс преобразования их дефектной структуры под действием различных полей с учетом состояния иерархических систем дефектов и напряжений на различных масштабных уровнях.

Десятое направление (катастрофы и экология) представлено разработкой систем моделей и методов, обеспечивающих с использованием геомеханического мониторинга решение задач прогнозирования аварийных и катастрофических событий в породном массиве. В проекте 97-05-65270 (А.В.Леонтьев, ИГД СО РАН, Новосибирск) разработаны имитационная и аналитическая модели процессов самоорганизации иерархической структуры блоков. Получены аналитические выражения для оценки параметров случайных процессов консолидации блоков, в частности: для распределения вероятностей длительности пребывания каждого блока в неконсолидированном состоянии, для интенсивностей переходов блоков из одних состояний в другие, для распределения вероятностей состояния блочной геофизической среды в целом. В проекте 97-05-64155 (Б.Д.Христофоров, ИДГ РАН, Москва) проводилось экспериментальное и математическое моделирование крупномасштабных природных и техногенных процессов взрывного типа. Исследовалось их воздействие на окружающую среду и экологические последствия. Разработанная база данных содержит показатели по 700 событиям, в том числе 529 ядерным взрывам, проведенным в СССР, США, Англии, Франции и Китае, 57 наземным химическим взрывам массой от 1 т до 5 кт, 137 аварийным взрывам за рубежом, по подводным взрывам глубинных бомб и исследовательским взрывам ВВ в мелких водоемах с различными типами дна в СССР, подводным взрывам США в Тихом и Атлантическом океанах, а также по ряду

природных катастрофических явлений взрывного типа. Разрабатывались методы прогноза дестабилизирующего воздействия взрывного типа на геоэкологическое равновесие окружающей среды, а также новые типы взрывных кумулятивных источников высокоскоростных струй.

Далее представим краткий обзор тематики исследований по проблеме разрушения горных пород ведущих институтов России (в основном академических) и некоторых стран СНГ.

Институт проблем комплексного освоения недр РАН. Выполнен анализ распределения энергии взрыва заряда ВВ в горном массиве у обнаженной поверхности. В отличие от известной схемы распределения энергии при камуфлетном взрыве, в него включены энергия дробления и перемещения отбиваемого объема горной массы, энергия разлетающихся кусков породы, энергия пылегазового облака и энергия воздушной ударной волны. Выполнены оценки коэффициента полезного использования энергии взрыва на дробление и дан новый подход к его определению в геотехнологии. Проведены теоретические и экспериментальные исследования особенностей работы параллельно-сближенных зарядов, результаты которых позволили обосновать, разработать и развить способ управления взрывным разрушением горных пород и технологию его применения при подземной разработке месторождений.

Институт динамики геосфер РАН. Проведено исследование влияния глубины подрыва заряда (от контактного до камуфлетного) на интенсивность разрушения горной породы. Установлен коэффициент полезного действия малозаглубленного взрыва по отношению к камуфлетному, характеризующий изменение размера зоны разрушения и степень измельчения среды. Показано качественное отличие контактного взрыва от камуфлетного по характеру разрушения.

Горный институт КНЦ РАН. Разработана компьютерная технология автоматизированного расчета и проектирования подземных массовых взрывов любой сложности, основанная на моделировании объектов горной технологии, интерактивной графике, компьютерных средствах обработки результатов моделирования и рабочего проектирования.

Институт горного дела УрО РАН. В процессе обоснования ресурсосберегающей технологии буровзрывных работ выявлены факторы, влияющие на эффективность принудительного разрушения горных пород. Установлено, что физические параметры, характеризующие прочность горных пород, изменяются в зависимости от структурных особенностей пород, а также масштабов нагружения. Разработаны способы регулирования чувствительности к детонации водосодержащих смесей из невзрывчатых компонентов, которые позволяют прогнозировать взрывчатые свойства вновь разрабатываемых смесевых ВВ.

Институт горного дела СО РАН. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований установлено, что в массиве горных пород при взрывании вертикальных зарядов ВВ большого диаметра на одну, две, три и четыре свободные поверхности увеличиваются зоны разрушения при максимальных растягивающих напряжениях. Установлено, что уровень воздействия на окружающий массив, вызванный реакцией среды на производство промышленных взрывов, определяется конструкцией вертикальных зарядов ВВ большого диаметра в технологических блоках, которая включает чередование в шахматном порядке по колонкам удлиненных полостей зарядов ВВ и инертных промежутков различной плотности.

Институт горного дела ДВО РАН. Завершена разработка одномерной математической модели взаимодействий в системе «взрывчатое вещество – массив горных пород – демпфирующий щит». Модель является этапом в создании новой технологии взрывного разрушения горных пород на открытых горных работах горизонтальными скважинными зарядами под мобильным укрытием. Адекватность модели подтверждена полигонными взрывами на полноразмерном макете демпфирующего щита.

Национальный научный центр горного производства – Институт горного дела им. А.А.Скочинского МИНТОПЭНЕРГО РФ И РАН. Выполнена работа, целью которой является интенсификация подготовки запасов угля за счет увеличения объема породы, перемещаемой в выработанное пространство энергией взрыва, на основе разработки новых методов направленного взрывания, обеспечивающих необходимое качество дробления и рациональную

форму развала взорванной горной массы. Выполнены исследования механизмов разупрочнения горных пород в электромагнитных полях (ЭМ). Определены режимы воздействия ЭМ, обеспечивающие низкоэнергоемкие процессы дезинтеграции.

Институт горной механики им. Г.А.Цулукидзе АН Грузии. Путем теоретических и экспериментальных исследований установлено влияние промежуточной среды между ВВ и зарядной камерой на параметры поля напряжений и направленных трещин в породе. С целью создания направленных трещин и упрочнения металлов взрывом разработаны рациональные конструкции зарядов ВВ.

Институт геотехнической механики НАН Украины. Разработаны научные основы способов управляемого разрушения напряженных горных пород при проведении выработок, как опасных, так и неопасных по газу, исходя из параметра кривизны забоя, который характеризуется степенью напряженности горного массива, а также местом и временем образования врубовой полости. Разработаны новые типы ВВ на основе простейших компонентов с включением конверсионных материалов, позволяющие обеспечить широкий диапазон нагружения горных пород, что является основой для создания эффективных взрывных технологий разрушения. Получен диплом на открытие № 123 «Закономерность разрушения пористых газонасыщенных тел при циклическом гидродинамическом воздействии».

Московский государственный горный университет. Получены значения удельной поверхностной энергии горных пород при различных процессах разрушения. Установлено, что в зависимости от режима разрушения они отличаются на 1-2 порядка. Разработана новая методика определения предела прочности горных пород в условиях чистого растяжения. Установлены параметры физико-технических характеристик горных пород, определяющие вязкость.

Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В.Плеханова (технический университет). Разработана конструкция зарядов ВВ и запирающих устройств, обеспечивающая повышение эффективности дробления, уменьшение выхода пылевых фракций разрушенной горной массы и ядовитых газов. В результате комплексных исследований, проведенных при промышленной отработке пиритсодержащих колчеданных руд, установлена область образования высокодисперсных пылевых фракций с учетом удельных показателей взрывных процессов. Предложены и обоснованы добавки ингибиторов в промышленные составы ВВ и установлены эффективные взрывоподавляющие компоненты (галоиды, бикарбонаты) для материалов забойки шпуровых зарядов, флегматизирующие взрывоопасную смесь. На основе газодинамических исследований разработана профилированная забойка, обеспечивающая, за счет увеличения задержки выброса из шпура газообразных продуктов детонации, выжигание основной массы взрывоопасных фракций образующейся сульфидной пыли и, как следствие, исключение возможности ее взрыва. Получены зависимости, позволяющие прогнозировать прочностные и упругие характеристики горных пород в зависимости от скорости деформации при разных видах напряженного состояния. Разработана и экспериментально проверена расчетная методика оценки энергетического баланса при разрушении горных пород. Названные выше методики определяют основы технологии бурения и крепления скважин различного назначения, проходки и крепления горных выработок и скважин в сложных горно-геологических условиях, в том числе и при динамических проявлениях горного давления.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова. В полигонных и промышленных условиях произведена оценка распределения энергии взрыва скважинного заряда по формам механической работы. Установлено, что максимальное значение КПД взрывного дробления достигается при рациональной энергонасыщенности массива, определяемой совокупностью геометрических и энергетических факторов: величины ЛНС, сетки скважин, теплоты взрыва и массы заряда ВВ. Разработана методика выбора рационального типа ВВ для взрываемого массива по максимальному КПД взрывного дробления.

Тульский государственный университет. Выполнена работа по моделированию разрушения горной породы тангенциальной дисковой шарошкой. Ведется работа по созданию комплекта оборудования для реализации технологии водоструйной резки носителя катализатора. В ходе разработки выполнен проект технологической оснастки, обеспечивающей одновре-

менную обработку трех блоков носителей пятью струями высоконапорной воды давлением до 150 МПа, что позволит повысить безопасность труда, увеличит комфортность работы обслуживающего персонала и обеспечит повышение производительности на 10 %.

Киргизско-Российский славянский университет. Исследованиями механизма детонации низкоплотных и сверхнизкоплотных взрывчатых смесей установлено, что впереди фронта детонационной волны распространяются самофокусирующиеся световые пучки, параметры которых зависят от состава взрывчатой смеси и плотности заряда и могут изменяться под действием внешних электрических полей. Обнаружено, что наличие внешнего электрического поля подавляет химическую активность продуктов газификации пенополистирола. Полученные результаты позволяют установить связь между различными эффектами, сопровождающими детонацию, которые до сих пор не находили своего объяснения.

Таким образом, проблема разрушения горных пород действительно актуальна и в настоящее время есть много новых интересных научных работ, направленных на ее решение.