

УДК 622.01

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИКИ В УСЛОВИЯХ НОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УКЛАДА

В.Л.ТРУШКО, А.Г.ПРОТОСЕНЯ

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Показана роль геомеханики для прогнозирования развития геосистем и обеспечения безопасности эксплуатации горных предприятий в условиях перехода к новому технологическому укладу. Рассмотрено состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы, включая арктическую зону Российской Федерации. Представлены направления технологических прорывов и возможности трансформации промышленного производства на основе «сквозных» технологий и цифровой экономики. Выполнен анализ геомеханических проблем с учетом глубинных технологических изменений и стремительного роста требований к сохранению недр Земли и природных ландшафтов. Предложена концепция развития геомеханики и геодинамики для обеспечения рационального недропользования в условиях применения «прорывных» технологий и показана необходимость интеграции научного отраслевого взаимодействия в систему технического и профессионального образования.

Ключевые слова: минерально-сырьевой комплекс; геомеханика; концепция; приоритеты развития; новый технологический уклад

Как цитировать эту статью: Трушко В.Л. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада / В.Л.Трушко, А.Г.Протосеня // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162-166. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.162

Введение. Ежегодно из недр Земли извлекается более 200 млрд т горных пород и образуется более 17 млрд т техногенных отходов, что приводит к возрастанию геодинамической активности больших массивов горных пород и вызывает появление ранее неизвестных геомеханике процессов [1, 17, 19]. Масштабное техногенное воздействие на биосферу Земли с применением высокопроизводительных технологий в условиях ухудшения горно-геологических условий и роста глубины разработки месторождений приводит к ее негативному изменению и увеличивает риски возникновения глобальных катастрофических явлений.

Россия является одним из мировых лидеров по запасам и добыче многих видов полезных ископаемых (см. таблицу). Например, 32 % мировых запасов газа, 33 % никеля, 31 % калийных солей и 25 % железа сосредоточено в России [4, 7].

**Состояние минерально-сырьевой базы Российской Федерации
(по состоянию на 01.01.2016 г.)**

Полезное ископаемое	Запасы		Добыча из недр
	A+B+C ₁	C ₂	
Нефть, млн т	18 435,4	11 221,8	501,6
Конденсат, млн т	2 314,2	1 270,1	26,6
Газ, трл м ³	50,7	19,3	0,637
Уголь, млрд т	196,2	78,35	0,373
Железная руда, млрд т	58,4	51,6	0,334
Алюминиевое сырье, млн т			
Бокситы	1 124,8	282,4	5,661
Нефелин	4 189,4	779,6	31,4
Медь, млн т	69,6	28,2	0,87
Титан, млн т TiO ₂	261,4	339	0,663
Золото, т	8 159,6	5 657,8	286,6
Серебро, тыс. т	65	53,8	2,3
Платина, т	9 782,4	5 288,1	143,2
Алмазы, млн кар.	982,8	204,3	42,1

Ряд перспективных месторождений расположен в арктической зоне и требует особого подхода к их освоению. Территория континентальной арктической зоны России составляет 4,9 млн км², а шельфовые моря достигают площади в 4 млн км², что соизмеримо с территорией Канады [9].

Общий потенциал ресурсов топливно-энергетического сырья в недрах арктической зоны России превышает 1,3 трлн т условного топлива, в том числе 61 % составляет уголь [3].



Согласно данным геологической службы США за 2014 г. неразведанные запасы традиционных углеводородов в Арктике составляют порядка 13 млрд т нефти, 47 трлн м³ газа и 6,5 млрд т газового конденсата. Это около 13 % общего объема неразведанных запасов нефти в мире, 30 % природного газа и 20 % газового конденсата [8, 20].

Исследования. В течение ближайших 10-20 лет «сквозными» технологиями для всех видов производств станут автоматизация и роботизация, а также интеллектуализация производственных процессов. Именно эти технологии должны обеспечить функциональную эффективность, экологичность и ресурсоэффективность производства [10, 11, 14].

Уже на рубеже 2025-2035 гг. ожидается ряд технологических прорывов, отражающих глубинные технологические изменения, которые приведут к трансформации традиционного промышленного производства, в том числе [6, 12, 18]:

- сенсорная революция (биосенсоры, цифровые сенсоры, квантовые компьютеры и коммуникации, фотоэлектроника);
- управление на базе математических моделей и цифровых данных всеми технологическими объектами и процессами;
- новые решения в области информационно-коммуникационных технологий (новые медиа, блокчейн, технологии искусственного интеллекта, машинное обучение, переход к новым поколениям мобильной связи и др.);
- распространение роботизированных и автоматизированных систем, нетрадиционных методов обработки материалов (аддитивное производство, атомарно-точное производство и пр.);
- применение для аналитики и управления технологическими процессами дополненной, виртуальной реальности, искусственного интеллекта;
- широкое использование природоподобных технологий (бионика, био-инжиниринг, синтетическая биология, биотехнологическое производство и т. д.).

С учетом формирования нового технологического уклада и стремительного роста требований к сохранению недр Земли и безопасности освоения месторождений, существует очевидная потребность в максимальной активизации научно-исследовательской деятельности и оказания инжиниринговых услуг в области геомеханики для прогнозирования развития геосистем и обеспечения безопасной эксплуатации горных предприятий. Необходимо развитие технологий и геомеханических методов, способных обеспечить сохранение природных ландшафтов и комплексное последующее использование подземного пространства с минимальными экологическими последствиями.

Сегодня невозможно представить проектирование и эксплуатацию подземного сооружения или горного предприятия без геодинамического районирования месторождения, детального анализа физико-механических свойств пород, геофизического анализа геологического строения массива и построения геологических и геомеханических моделей.

Возникает ряд сложных геомеханических проблем при переходе с открытого на подземный способ разработки месторождений для предприятий. С этими проблемами уже столкнулись горные предприятия в России: ОАО «Апатит», ОАО «Олкон», ОАО «Алроса» и ряд других [5, 16].

Огромная социальная ответственность ложится на геомехаников при эксплуатации гидротехнических сооружений, метрополитенов, отработке месторождений под городами и водными объектами [21, 22]. Так, в районе Соликамской впадины при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей на глубине 600 м открыто и разрабатывается на глубинах от 2000 до 3000 м более 30 нефтяных и газовых месторождений [15]. С увеличением глубины возрастает напряженность массивов пород и склонность их к динамическим проявлениям горного давления. Все рудные месторождения на больших глубинах отнесены к удароопасным. Поэтому одной из основных проблем геомеханики является прогноз напряженно-деформированного состояния массива и обоснование безопасных способов и технологий разработки месторождений в условиях активизации динамических явлений.

Новые комплексные геомеханические и технологические решения требуются при строительстве многоуровневых пространственных сооружений больших поперечных сечений в транспортном и гидротехническом строительстве. Значительно возросла роль геомеханики для повышения эффективности разработки нефтегазовых месторождений, особенно с трудноизвлекаемыми запасами (сланцевая нефть и газ), создании крупных подземных хранилищ углеводородов и гелия.

Например, такие проблемы решаются при строительстве нового газопровода «Сила Сибири», освоении месторождений Баженовской свиты [2, 13]. В перспективе рост требований к сохранению недр Земли и комплексное использование минеральных ресурсов предопределяет развитие геомеханических методов целенаправленного воздействия на физические свойства минеральных сред и напряженно-деформированное состояние породных массивов.

Развитие цифровых технологий проектирования «интеллектуальных месторождений» и применение безлюдных технологий добычи с использованием роботизированных комплексов и дистанционное управление технологическими процессами требует развития новой концепции геомеханики и геодинамики и приоритетов развития минерально-сырьевого комплекса по направлениям:

- Дистанционные, в том числе лазерно-космические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых с выявлением новых генетических типов месторождений.
- Технологии газификации угля с получением синтетических топлив, продуктов химии и агрохимии.
- Системы комплексной глубокой переработки твердых природных и техногенных материалов, в том числе углеродсодержащие, для увеличения коэффициента извлечения полезных компонентов и производства топлив и продуктов широкого хозяйственного назначения.
- Технологии повышения нефтеотдачи пластов на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами, включая «тяжелые нефти», газогидраты, сланцевый газ и др.
- Биотехнологии подземного выщелачивания.
- Обеспечение комплексной безопасности освоения месторождений на континентальном арктическом шельфе.
- Цифровые технологии экологического мониторинга и управления экологическими рисками на объектах минерально-сырьевого комплекса.
- Цифровые системы моделирования и проектирования роботизированных комплексов освоения месторождений с использованием искусственного интеллекта («Умное месторождение» – «Smart fields»).
- Технологии получения электроэнергии из нетрадиционных источников: энергии ветра, солнца, моря, тепла Земли, биомассы и твердых бытовых отходов.
- Интеллектуальные системы энергосбережения и хранения энергии.
- Интеллектуальные активно-адаптивные системы гарантированного энергообеспечения технологических процессов.
- Системы и оборудование для предварительного обогащения руд в карьере или шахте, работающего на различных физических принципах (гравитационном, магнитном, электрическом, флотационном, импульсном, радиационном и радиационно-термическом).

Например, проект «умная шахта», финансируемый Евросоюзом, ставит целью разработку комплекса технологий и ноу-хау, позволяющих создавать автоматизированные подземные шахты с минимальным присутствием человека и нулевым воздействием на окружающую среду (см. рисунок).





Сложные геомеханические проблемы, возникающие при разработке месторождений и освоении подземного пространства, невозможно решить без межотраслевой и междисциплинарной интеграции научных коллективов. Поэтому вызовом времени становится необходимость обеспечения постоянной кооперации специалистов разного профиля для решения комплексных задач. Укрепление международного научно-образовательного сотрудничества для разработки обоснованной политики в сфере высшего образования и научной деятельности поможет мировому сообществу успешно перейти к новому научно-технологическому укладу.

Важнейшей проблемой является подготовка специалистов в области геомеханики и геодинамики. Возможно формирование новой системы географических центров, в том числе вокруг ведущих университетов, объединяющих исследователей и разработчиков прорывных технологий, а также создателей и потребителей передовых продуктов и услуг; переход на экспериментально-ориентированное образование путем создания и распространения учебных фабрик и лабораторий (FABLAB).

В Санкт-Петербургском горном университете открыт Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО, на базе которого происходит объединение ведущих мировых ученых и специалистов для плодотворного обмена опытом и выработки обоснованной политики в сфере высшего образования и отраслевой науки.

В прогнозе научно-технологического развития мирового минерально-сырьевого комплекса учитывается необходимость создания условий для объединения усилий мирового сообщества для решения следующих проблем геомеханики и геодинамики:

- Развитие наукоемких технологий для дистанционного зондирования и геофизических исследований недр Земли.
- Развитие нелинейной геомеханики насыщенных неоднородных пористых трещиноватых массивов.
- Создание теории формирования естественного поля напряженного состояния массива и выявление механизмов тектонических процессов и циклических геодинамических движений верхней части литосферы.
- Выявление геомеханических закономерностей развития геосистем для безопасного освоения земных недр.
- Создание компьютерных геопространственных моделей массива, учитывающих временное изменение напряженно-деформированного состояния горных пород при освоении месторождений и подземного пространства.
- Развитие методов геодинамического районирования породных массивов.
- Развитие методов геомеханики при разработке нетрадиционных месторождений углеводородов (тяжелые нефти, сланцевый газ и др.) и повышении нефтегазоотдачи (методы ГРП).
- Создание новых технических средств и цифровых автоматизированных систем гидрогеомеханического мониторинга состояния горного массива и прогнозирования динамических процессов и явлений
- Прогноз напряженно-деформированного состояния и динамических явлений на основе учета свойств реального горного массива, имеющего блочное, слоистое и сложное строение, тектонические разломы и нарушения сплошности в условиях действия тектонических сил и подвижек.
- Исследование геомеханических, геодинамических и гидродинамических процессов в техногенно-изменяемых массивах горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых и освоении подземных пространств городов и промышленных агломераций.
- Развитие комплексного геомеханического инжиниринга при освоении месторождений полезных ископаемых и подземного пространства.
- Создание экспресс-методов определения физико-механических свойств и оценки напряженного состояния массива с использованием эффекта «памяти» горных пород.
- Развитие методов обеспечения устойчивости и управления напряженно-деформируемым состоянием породного массива.
- Создание новых материалов и технологий крепления подземных сооружений.

Заключение. Рост требований к сохранению недр Земли и безопасности освоения месторождений полезных ископаемых и подземного пространства значительно повышает роль геомеханики для прогнозирования развития геосистем и обеспечения рационального недропользования.



Интеграция научного отраслевого взаимодействия в систему технического и профессионального образования, подготовки специалистов-геомехаников будет способствовать формированию оптимальных систем управления процессами поиска, разведки, добычи, транспортировки и переработки полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В.В. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы) / В.В.Адушкин, С.Б.Турунтаев. М.: ИНЭК, 2005. 252 с.
2. Белозеров В.Б. Открытая трещиноватость Баженовской свиты и перспективы ее разработки // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 150-158.
3. Богоявленский В.И. Нефтегазодобыча в Мировом океане и потенциал российского шельфа. ТЭК стратегии развития // Морской сборник. 2012. № 6. С. 44-52.
4. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016-2017 годах». М.: Минприроды России. 2018. 370 с.
5. Демидов Ю.В. Комбинированная открыто-подземная отработка прибортовых запасов апатит-нефелиновых руд / Ю.В.Демидов, А.Ю.Звонарев, А.А.Леонтьев // Горный журнал. 2009. № 9. С. 39-42.
6. Иванов В.В. Цифровая экономика: мифы, реальность, перспективы / В.В.Иванов, Г.Г.Малинецкий. М.: РАН, 2017. 63 с.
7. Козловский Е.А. Минерально-сырьевые ресурсы в экономике мира и России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 47-54.
8. Ларичкин Ф.Д. Проблемы изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Арктического региона / Ф.Д.Ларичкин, А.М.Фадеев, А.Е.Череповицын // Арктика: экология и экономика. 2012. № 1(5). С. 8-16.
9. Мельников Н.Н. Роль Арктики в инновационном развитии экономики России // Горный журнал. 2015. № 7. С. 23-28.
10. Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017. № 1632-р.
11. Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России: Экспертно-аналитический доклад. М.: Центр стратегических разработок, 2017. 136 с.
12. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016. № 642.
13. Подземное хранение гелия / С.А.Хан, А.И.Игошин, В.А.Казарян, А.С.Скрябина, В.Б.Сохранский. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. 272 с.
14. Садовая Е.А. Цифровая экономика и новая парадигма рынка труда // Мировая экономика и международные отношения. 2018. Т. 62. № 12. С. 35-46.
15. Сейсмографическое обоснование возможности совместной разработки месторождений минеральных солей и углеводородного сырья / И.А.Санфиоров, А.И.Никифорова, М.В.Калашникова, А.А.Жикин // Вестник Пермского научного центра. 2017. № 1. С. 76-79.
16. Технология отработки подкарьерных запасов полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях / А.А.Коваленко, М.В.Тишков, С.А.Неверов, А.А.Неверов, А.М.Никольский // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т.1. № 3. С. 305-311.
17. Трубецкой К.Н. Перспективы инновационного развития горной промышленности // Горный журнал. 2015. № 7. С. 19-22.
18. Цифровая экономика – различные пути к эффективному применению технологий / А.П.Добрынин, К.Ю.Черных, В.П.Куприяновский и др. // International Journal of Open Information Technologies. 2016. № 1 (4). С. 4-10.
19. Чантурия В.А. Перспективы устойчивого развития горно-перерабатывающей индустрии России // Горный журнал. 2007. № 2. С. 30-33.
20. Шафраник Ю.К. Нефтегазовый комплекс России: проблемы и задачи развития // Горный журнал. 2015. № 7. С. 55-58.
21. Protosenya A.G. Procedure of geomechanically safe development of megalopolis underground space / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, N.A.Belyakov // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Iss. 22. P. 10857-10866.
22. Trushko V.L. Geomechanical Models and Prognosis of Stress-strain Behavior of Rock Ore in Development of Unique Deposits of Rich Iron Ores Under Water-bearing Formations / V.L.Trushko, A.G.Protosenya // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Vol. 12. Iss. 3. P. 2879-2888.

Авторы: В.Л.Трушко, д-р техн. наук, профессор, trushko@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.Г.Протосеня, д-р техн. наук, профессор, kaf-sgr@spti.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 27.01.2019.

Статья принята к публикации 13.03.2019.