

УДК 622.274.36/44

РАЗВИТИЕ ГЕОМЕХАНИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ СОХРАНЕНИЯ ЗЕМНЫХ НЕДР



М. А. ИОФИС,
главный научный сотрудник,
проф., д-р техн. наук



Е. В. ФЕДОРОВ,
заведующий отделом,
канд. техн. наук



Е. Н. ЕСИНА,
старший научный сотрудник,
доцент, канд. техн. наук,
esina555@list.ru



Н. А. МИЛЕТЕНКО,
старший научный
сотрудник,
канд. техн. наук

*Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия*

Введение

Приход в науку и практику новых понятий «комплексное освоение недр», «ресурсовоспроизводство», «сохранение недр Земли» привел к радикальному изменению концепции горных наук. Их идейное содержание связывается теперь не только с решением проблем освоения недр, но и с новым аспектом – сохранением недр как видоизменяемого ресурса жизнеобеспечения общества [1, 2].

Изменение концепции наук затрагивает и горную геомеханику. В соответствии с проблемой сохранения недр в геомеханике естественным образом формируются новые научные направления – выявление экологически опасных техногенных геопроцессов в верхней части литосферы, разработка методов контроля и управления этими процессами; создание геомеханических основ ресурсосберегающих геотехнологий и природоохранных мероприятий; обоснование взаимосвязи геомеханики с другими фундаментальными и прикладными научными дисциплинами по сохранению окружающей среды и земных недр. В англоязычной литературе эти направления исследований относятся к защите окружающей среды и определяются как environmental geomechanics [3–8]. В России подобные области исследований геопроцессов сформировались как в самой геомеханике, так и в смежных дисциплинах, например в геологии, геодинамике, геофизике [9–12].

Рассматриваются новые направления геомеханических исследований при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. Обсуждаются особенности применения методов компьютерного моделирования, на базе которого развиваются междисциплинарные исследования в области природоохранной деятельности. Рассмотрены геомеханические аспекты применения скважинной гидродобычи, позволяющей снизить экологическую нагрузку и обеспечить безопасность горных работ в сложных газо- и гидрогеологических условиях.

Ключевые слова: геомеханика, сохранение недр Земли, междисциплинарные исследования, деформационные процессы, скважинная геотехнология, безопасность горных работ, экологическая нагрузка.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.03

Исследования экологической направленности развиваются в ИПКОН РАН по трем направлениям. Первое состоит в разработке инженерных методов, позволяющих прогнозировать деформационные процессы с опасными экологическими последствиями и управлять ими [13]. Эти методы опираются на базовые положения практической геомеханики, анализ соответствующих статистических данных и здравый смысл. С помощью этих методов во многих случаях можно достаточно быстро получить предварительный результат и обосновать геомеханические принципы ресурсосберегающей и экологически сбалансированной геотехнологии разработки месторождений полезных ископаемых. Второе направление предусматривает компьютерное (математическое) моделирование природно-техногенных процессов, позволяющее в рамках междисциплинарных исследований изучать нелинейные взаимосвязи в природно-технических геосистемах и оценивать возможные сценарии уменьшения вредных экологических последствий техногенного воздействия на геосреду [14]. Наконец, третье направление включает систему геомониторинга техногенного горного воздействия на геосреду [15]. Эта система основывается на инструментальном контроле деформационных процессов с учетом аппаратурных данных геофизических, геохимических, гидрогеологических и других исследований, а также на анализе динамики изменения текущего состояния изучаемых процессов.

Ниже рассмотрены некоторые результаты исследований, связанные со скважинной гидродобычей (СГД) минерального сырья.

Геомеханические аспекты скважинной гидродобычи

Скважинная гидродобыча является ресурсосберегающей геотехнологией освоения месторождений полезных ископаемых, исключая непосредственное присутствие человека в месте ведения добычных работ и позволяющая избежать отчуждения

значительных площадей на поверхности земли под промышленное строительство. Она является малоотходной и при соблюдении определенных требований может быть экологически безопасной [16].

Внедрение СГД перспективно при отработке высокозольных и обводненных угольных пластов. В ИПКОН РАН научно обоснован и разработан способ скважинной гидродобычи полезных ископаемых, позволяющий снизить экологическую нагрузку на окружающую среду путем подземной подготовки гидросмеси и оставления в недрах пустой породы. Еще одна сфера возможного применения ресурсосберегающей скважинной геотехнологии – это отработка угольных пластов, склонных к газодинамическим явлениям. Использование для разрушения полезного ископаемого собственной газо- и геодинамической энергии породного массива, являющейся негативным фактором при подземной геотехнологии, повышает эффективность освоения запасов минерального сырья [17].

Характерная особенность СГД – дистанционность процессов добычи полезных ископаемых предопределяет невозможность непосредственного контроля за динамикой отработки залежи. В связи с этим оценку полноты освоения запасов и расчет параметров выработанного пространства залежи (пласта) ведут на основе решения обратной геомеханической задачи: местоположение и размеры выработанного пространства определяют по наблюдаемым сдвигениям и деформациям земной поверхности с учетом установленных закономерностей геомеханических процессов [18].

Для прогноза развития этих процессов предложен специальный метод расчета ожидаемых деформаций земной поверхности, учитывающий особенности преобразования породного массива при СГД. Метод базируется на теоретических основах способа типовых кривых, но с определенными корректировками.

Особенность освоения свиты газоносных угольных пластов с применением скважинной геотехнологии состоит в формировании вокруг обрабатываемого по СГД пласта защищенной зоны, в которую попадают вышележащие и нижележащие пласты. В дальнейшем они обрабатываются либо тоже по скважинной геотехнологии, либо подземным способом, но уже без применения дорогостоящих и не всегда достаточно эффективных противобросных локальных мероприятий. Увеличение газопроницаемости определяется степенью разгрузки массива от действия сил горного давления. Данные об изменениях давления газа и режима его фильтрации важны для предупреждения внезапных выбросов и осуществления эффективной дегазации метанонасыщенных угольных пластов. При этом добычные скважины используются в качестве дополнительных дегазационных каналов.

Интенсивностью дегазационных процессов можно управлять на основе установленной взаимосвязи остаточного давления метана и горизонтальных деформаций опасного пласта:

$$\varepsilon = 1,2 \cdot 10^{-3} \frac{P_{np}}{P_0},$$

где P_{np} – природное давление метана до дегазационных мероприятий, P_0 – остаточное его давление после применения дегазационных мероприятий, атм.

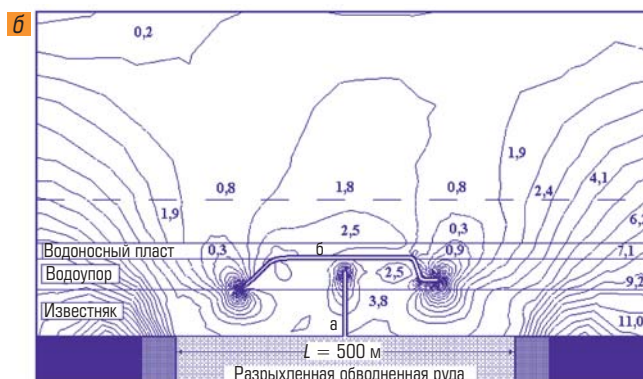
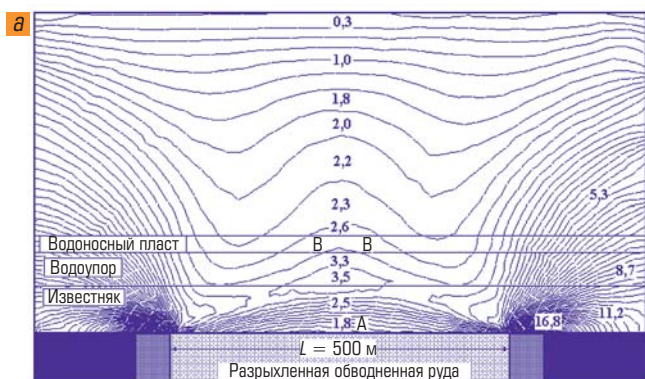
Степень дегазации верхних и нижних выбросоопасных пластов свиты зависит от интенсивности образования системы газопроводящих трещин, их размеров и местоположения, которые, в свою очередь, определяются параметрами деформаций горных пород. При этом эффективность дегазационных мероприятий существенно повышается за счет использования полостей разгрузки при условии расположения направленных скважин в зонах наибольшего скопления газа под экранирующими породами, но не ниже почвы подрабатываемого пласта.

Таким образом, комплексное геомеханическое обеспечение скважинной геотехнологии, учитывающее особенности формирования и развития выработанного пространства, позволяет определять оптимальные параметры разработки, качественно управлять технологическими процессами, что в целом обеспечивает безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых. При этом снижается вредное влияние горных работ на окружающую среду.

Одна из особенностей СГД в отношении экологических последствий состоит в развитии нежелательных деформационных и гидрогеологических процессов в налегающей толще пород, что может иметь большое значение при добыче богатых железных руд КМА. Здесь по технологии СГД намечается отработка ограниченных запасов руды и неполное снятие напора в массиве рыхлых руд с тем, чтобы максимально использовать плавунные свойства обводненной рудной массы для ее смещения к добычным скважинам. Как полагается, поддержание определенного напора воды в рудной залежи не должно способствовать развитию опасных техногенных деформационных процессов в налегающей толще. Однако при разработке сильнообводненных богатых железных руд может быть нарушена гидрогеологическая система подземных вод, что может привести к потере источников питьевого водоснабжения населения региона [19].

Одно из следствий деформационных процессов – образование магистральных каналов для перетока подземных вод в налегающей толще пород и смешению питьевой воды верхних горизонтов и сильно минерализованной рудной воды. Для исследования различных сценариев возможного развития геопроцессов в налегающей толще была разработана компьютерная модель и осуществлено моделирование взаимодействия геомеханических, геодинамических и гидрогеологических процессов при добыче богатых железных руд для условий Шемраевского участка КМА.

В этой модели использована концепция природно-техногенного гидроразрыва породного массива [20–22] для анализа условий разрыва контакта пород на границе водоносного пласта. Показано, что при определенных условиях на границе водоносного пласта возможно расслоение контакта и заполнение его водой при гидростатическом давлении. Возникшая трещина природно-техногенного гидроразрыва может расти при взаимодействии двух силовых факторов: давления природной воды, проникающей в трещину, и действующего напряжения вблизи трещины. В самом простом случае условие гидроразрыва может быть записано в виде $|P| \geq |\sigma_{min}|$, где P – природное давление воды, σ_{min} – наименьшая главная компонента сжимающих напряжений.



Распределение наименьших напряжений сжатия в налегающей толще:

а – в отсутствие трещин; б – с учетом образовавшихся трещин

В проведенном исследовании рассматривалось напряженно-деформированное состояние рудной залежи на глубине 500 м и налегающей толще пород, представленной осадочными породами, глинистыми водоупорами, водоносными пластами. Непосредственно в кровле залежи рыхлых обводненных железных руд находится известняк мощностью около 75 м. При выемке некоторой части руды (до 20 %) оставшаяся ее часть разрыхляется, частично выработанное пространство заполняется рудной минерализованной водой, которая оказывает гидростатическое давление на известняк, равное 5 МПа. Напряженное состояние глинистого водоупора и известняка формируется под действием веса налегающих пород, горизонтального бокового сжатия, гидростатического давления рудной воды.

Процедура моделирования напряженно-деформированного состояния и процесса трещинообразования описана в [20]. На рисунке показаны некоторые результаты расчета поля напряжений в налегающей толще пород при пролете подработки известняка 500 м. В левой части рисунка (а) изображены изолинии минимальных сжимающих напряжений σ_{\min} , входящих в критерий гидроразрыва. В нижней части известняка (область А) напряжение σ_{\min} составляет 1,8 МПа. Это меньше гидростатического давления рудной воды (~5 МПа), поэтому здесь возможно образование трещины, растущей вертикально, т. е. в направлении, перпендикулярном направлению действия минимальных напряжений сжатия.

В областях В напряжение σ_{\min} составляет 2,8 МПа, что меньше природного давления воды в этом водоносном горизонте (~3 МПа). Здесь возможно образование трещины на контакте водоносного слоя и водоупора. Образование магистральной трещины, заполненной водой при давлении 3 МПа, вызовет перераспределение напряжений в зоне влияния трещины, что, как показано в расчетах, способствует дальнейшему развитию трещины.

В правой части рисунка (б) показана конфигурация трещин на момент окончания их роста. Отметим, что в расчетах можно определить лишь примерную конфигурацию трещин, поскольку на каждом шаге выбирается лишь одно из возможных направлений развития трещин, хотя и наиболее ожидаемое. Отсутствие симметрии в конфигурации верхней техногенной трещины отражает влияние различных вариаций в процедуре расчета траектории развития

трещины. Однако можно сделать общий вывод: при рассматриваемых условиях левый и правый концы трещины расслоения контакта должны расти вниз к рудной толще, но они не должны прорасти насквозь или соединиться с трещиной отрыва, растущей от рудной залежи вверх. Моделирование также показало, что активное действие воды в растущих трещинах является важным фактором: протяженность, ориентация и масштаб влияния этих трещин оказываются существенно иными, чем в случае модели «сухих» трещин, растущих только под действием горного давления.

По результатам моделирования можно сделать ряд выводов в отношении сохранения горизонтов питьевой воды при СГД. В частности, если пролет подработки известняка не превышает 300 м, то магистральные трещины на границе келловей-батского водоносного горизонта и водоупора не образуются. В этом случае возможно образование единичных трещин, приуроченных к возможным областям локализации техногенных деформаций [22] и развивающихся в известняке от его нижней границы в направлении водоносного пласта, но не достигающих этого пласта. Технологическое снижение напора рудной воды не должно превышать 0,5 МПа. В противном случае даже при пролете подработки известняка 300 м может начаться процесс роста трещин на границе водоносного пласта и водоупора.

В процессе моделирования роста трещин определялись смещения пород налегающей толще. Установлено, что при образовании горизонтальных трещин на границе водоносного пласта и водоупора смещения пород резко возрастают (более чем на порядок). Следовательно, резкий рост смещений пород может служить индикатором расслоения массива налегающей толще и процесса образования трещин гидроразрыва. Эту закономерность следует учесть при организации деформационного геомониторинга скважинной гидродобычи.

Кроме того, как показало моделирование, картина взаимодействия техногенных геопроцессов сильно зависит от геодинамических условий, в частности от величин природных напряжений в налегающей толще пород. К сожалению, в отношении величин этих напряжений для региона КМА в литературе приводятся противоречивые данные. Приведенные выше результаты получены для условия, при котором напряженное состояние массива

определяется весом налегающих пород. Это условие является благоприятным для развития техногенных водопроявляющих трещин. Если природные горизонтальные напряжения примерно равны по величине напряжениям, обусловленным весом пород (что характерно для геодинамически активных регионов), то развитие магистральных каналов для перетока воды в налегающей толще маловероятно. Следовательно, разработка конкретных экологических рекомендаций по совершенствованию СГД требует проработки вопросов геодинамики региона КМА.

Заключение

Таким образом, развитие геомеханических исследований экологической направленности показывает, что на их основе могут быть обоснованы и разработаны инновационные ресурсосберегающие скважинные геотехнологии, позволяющие вовлекать в разработку запасы месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях. Несомненным преимуществом скважинных геотехнологий является обеспечение безопасного ведения горных работ за счет вывода людей из очистных пространств и снижение экологической нагрузки на окружающую среду. При

этом разработанные принципы комплексного геомеханического обеспечения скважинной геотехнологии определяют эффективность реализации предложенных технологических решений.

Вместе с тем, как показали исследования, при скважинной гидродобыче в налегающей толще пород могут развиваться техногенные геопроцессы с опасными экологическими последствиями. Поэтому в рамках междисциплинарных исследований необходимо использовать расширяющиеся возможности компьютерного моделирования природно-техногенных геопроцессов. Это может способствовать выявлению важных деталей и ключевых моментов в общей картине пространственно-временных изменений природно-техногенной системы и созданию научных основ для разработки адекватных природоохранных мероприятий. По результатам моделирования с учетом выявленных деталей геопроцессов могут быть разработаны требования к организации системы геомониторинга и установлены допустимые пределы происходящих изменений.

Библиографический список

См. англ. блок. [\[X\]](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 18–21
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.03

Advancement of geomechanics toward mineral wealth preservation

Information about authors

M. A. Iofis¹, Leading Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences

E. V. Fedorov¹, Head of Department, Candidate of Engineering Sciences

E. N. Esina¹, Senior Researcher, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, esina555@list.ru

N. A. Miletenko¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹ Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

In the context of preservation of mineral wealth in the course of mining, the article addresses the geomechanical research trends involving engineering methods and computer-aided modeling. The scope of the discussion embraces some geomechanical research findings on hydraulic borehole mining that allows abating environmental impact of mining and ensures mine safety in complicated gas- and hydrological conditions.

To study scenarios of geomechanical and hydrogeological behavior of superincumbent rock, the model of the natural-and-induced hydraulic fracturing is constructed. Using this model, it is shown that under certain conditions, large-scale cleavage of rocks is possible at the boundary of an aquifer in the overlying formations, with filling of the formed space with water and with fracturing oriented from the water-filled space toward rock mass areas with low induced stresses. An approximate layout of fractures by the moment when they stop growing is calculated. On the whole, the implemented ecology-oriented geomechanical researches show the capacity to make a background for the substantiation and development of innovative resource-saving borehole geotechnologies to develop mineral resources under complicated geological conditions.

Keywords: geomechanics, mineral wealth preservation, interdisciplinary investigations, deformation processes, borehole geotechnology, mining safety, environmental pressure.

References

- Mining sciences: mastering and saving the Earth interiors. Ed.: K. N. Trubetskiy. Moscow: Izdatelstvo Akademii gornykh nauk, 1997. 475 p.
- Trubetskiy K. N. Interdisciplinary ways and tasks of mining sciences for solving the Earth interior mastering problems in the XXI century. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2008. No. 4. pp. 7–12.
- Vulliet L., Laloui L., Schrefler B. *Environmental Geomechanics*. Lousanne: EPFL PRESS, 2002. 423 p.
- Schrefler B., Delage P. *Environmental Geomechanics*. London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc, 2010. 513 p.
- Vintró C., Sanmiquelb L., Freijoc M. Environmental sustainability in the mining sector: evidence from Catalan companies. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 84. pp. 155–163.

- Faulting, Fracturing and Igneous Intrusion in the Earth's Crust. Ed. by D. Healy, R. W. H. Butler, Z. K. Shipton, R. H. Sibson. London: The Geological Society, 2012. Special publication No. 367. 253 p.
- Blake K. Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western united states: a study in stress heterogeneity. *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford: Stanford University, 2013. 12 p. Available at: <http://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Blake.pdf> (accessed: 15.04.2017).
- Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*. 2014. No. 5. pp. 1123–1149.
- Vikulin A. V., Ivanchin A. G. Modern concept of block hierarchy in the structure of geomedium and its implications in geosciences. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013. No. 3. pp. 67–84.
- Freydin A. M., Neverov S. A., Neverov A. A., Kunurin A. I. Geomechanical assessment of geotechnology at a project stage of underground ore mining. *Gornyy Zhurnal*. 2016. No. 2. pp. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.08
- Trofimov V. T., Ziling D. G. *Ecological geology: tutorial*. Moscow: Geoinformmark, 2002. 415 p.
- Trofimov V. T., Kharkina M. A., Grigoreva I. Yu. *Ecological geodynamics*. Moscow: KDU, 2008. 472 p.
- Development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies of complex mastering of mineral deposits. Ed.: K. N. Trubetskiy. Moscow: IPKON RAN. 2012. 205 p.
- Odintsev V. N. Interdisciplinary research in mining science with the leading role of geomechanics. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2016. Special issue No. 1. Proceedings of international scientific symposium "Miner's Week-2016". pp. 195–214.
- Methodical guidance for complex mining-ecological monitoring during the construction and exploitation of transport tunnels. Moscow: URAN IPKON RAN, NIPII "Lenmetrogiprotrans", 2009. 68 p.
- Britan I. V., Leyzerovich S. G. Prospects for borehole geotechnologies in mineral mining in the Belgorod Region. *Gornyy Zhurnal*. 2014. No. 8. pp. 49–53.
- Trubetskiy K. N., Iofis M. A., Esina E. N. Geomechanical service in mining under gas-and-dynamic phenomena. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 3. pp. 64–71.
- Nazarov L. A., Nazarova L. A., Usoltseva O. M., Kuchay O. A. Estimation of state and properties of various-scale geomechanical objects using solutions of inverse problems. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014. No. 5. pp. 33–44.
- Kramchaninov N. N., Petin A. N., Pogoreltsev I. A. Analysis of the state of underground waters in the mining industrial region of KMA (Belgorod oblast). *Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennyye nauki*. 2011. No. 9, Iss. 15. pp. 166–172.
- Odintsev V. N., Miletenko N. A. Water inrush in mines as a consequence of spontaneous hydrofracture. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015. No. 3. pp. 3–16.
- Odintsev B. H., Miletenko I. V., Miletenko N. A. Geomechanical measurement of overlying rock hydrogeological conditions change during hydraulic borehole mining of iron ore. *Marksheyderiya i nedropolzovanie*. 2010. No. 5. pp. 51–54.
- Iofis M. A., Odintsev V. N., Blokhin D. I., Sheynin V. I. Experimental investigation of spatial periodicity of induced deformations in a rock mass. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2007. No. 2. pp. 21–27.