

Академия горных наук: современные достижения китайских ученых в области геомеханики

А.С. Батугин ✉

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ as-bat@mail.ru

Резюме: В статье представлен обзор и анализ внедрения фундаментальных научных разработок в практику горного дела в Китае, которые способствуют развитию новых технологий и повышению безопасности труда шахтеров. Под руководством проф. Цяо Цзяньюна на удароопасных шахтах Китая проводились исследования по анализу причин и механизма геодинамических явлений, созданию модели взаимодействия геодинамических систем различного иерархического уровня в горнодобывающем районе, распределению напряжений в массиве пород вокруг горных выработок, совершенствованию схем бесцеликовой отработки угольных пластов. В основе результатов этих исследований лежат инновационные достижения Цяо Цзяньюна в области фундаментальной математики. В настоящей статье приводятся некоторые результаты этих исследований, получившие поддержку практиков и академического сообщества в Китае и за рубежом и отмеченные наградами различного уровня.

Ключевые слова: фундаментальная математика, геодинамическая модель, геомеханическая безопасность, напряженное состояние, бесцеликовая отработка, повышение эффективности

Для цитирования: Батугин А.С. Академия горных наук: современные достижения китайских ученых в области геомеханики. *Горная промышленность*. 2025;(6):72–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-72-75>

Academy of Mining Sciences: modern achievements of Chinese scientists in the field of geomechanics

A.S. Batugin ✉

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation

✉ as-bat@mail.ru

Abstract: The article presents an overview and analysis of implementing fundamental scientific developments into mining practice in China, which contributes to the development of new technologies and improving the safety of miners. Under the guidance of Prof. Qiao Jianyong, research was conducted in China's rock-bump hazardous mines to analyse the causes and mechanisms of geodynamic phenomena, create a model of the interaction of geodynamic systems of various hierarchy levels in a mining area, distribution of stresses in the rock mass around the mine workings, and improvement of pillarless systems of coal seam mining. The results of this research are based on Prof. Qiao Jianyong's innovative achievements in the field of pure mathematics. This article presents some of the results of this research, which have been supported by both practical experts and the academic community in China and abroad and have received various awards.

Keywords: fundamental mathematics, geodynamic model, geomechanical safety, stress state, pillarless mining, efficiency improvement

For citation: Batugin A.S. Academy of Mining Sciences: modern achievements of Chinese scientists in the field of geomechanics. *Russian Mining Industry*. 2025;(6):72–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-6-72-75>

Введение

Основным видом топлива в Китае является уголь, добыча которого в 2024 г. составила 4,76 млрд т. Добыча угля на шахтах ведется в условиях высокого уровня геомеханического и геодинамического рисков. Ведение горных работ сопровождается проявлениями горных ударов, внезапных выбросов, высокого горного давления, техногенной сейсмичностью. Усилия ученых и инженеров направлены на совершенствование технологий добычи, обеспечение безопасности, профилактику неблагоприятных геодинамических явлений. Большое внимание уделяется разработке и внедрению беспелликовых технологий, изучению закономерностей проявления геодинамических явлений. Ведутся теоретические исследования в области геодинамической и геомеханической безопасности.

В 2022 г. в Академию горных наук принят профессор Цяо Цзяньюн, работавший в 2008–2015 гг. ректором

Китайского горного университета (Пекин), а с 2015 по 2022 г. ректором Китайского университета связи и коммуникаций. Под руководством проф. Цяо Цзяньюн на удароопасных шахтах Китая проводились исследования по анализу причин и механизма геодинамических явлений, распределению напряжений в массиве пород и совершенствованию схем беспелликовой отработки угольных пластов. В настоящей статье приводятся некоторые результаты этих исследований, получившие поддержку практиков и академического сообщества в Китае и отмеченные наградой «CSIAM Applied Mathematics Landing Achievement» от Китайского общества промышленной и прикладной математики.

Установление закономерности эволюционного взаимодействия между глобальной и локальной геодинамическими системами на глубокой угольной шахте

В 2010 г. профессор Цяо Цзяньюн организовал выполнение совместного российско-китайского проекта по изучению природы динамических явлений при отработке глубоких горизонтов (1000 м) угольной шахты Хуафэн, разрабатывавшей удароопасный угольный пласт мощностью 6 м и находящейся в районе пересечения зоны разломов Куньлунь и Таньлу (горнопромышленный район Синьвэнь, провинция Шаньдун, КНР) [1; 2]. Уникальность ситуации состояла в том, что при достижении глубин ведения горных работ 700 м на поверхности шахтного поля стали появляться протяженные трещины, чего не было замечено при меньших глубинах разработки. Одновременно увеличилась сила и частота горных ударов и сейсмических явлений в массиве. С развитием горных работ на глубину и движением фронта работ на северо-восток шахтная сейсмичность становилась все более выраженной, а протяженность и зияние (ширина) трещин на поверхности увеличились соответственно до 700 м и 1–1,5 м.

Целью исследований международной группы ученых было установление закономерности эволюционного взаимодействия между глобальной и локальной геодинамическими системами для раскрытия механизма феномена сложившейся на шахте ситуации. В результате выполнения работ по международному проекту (в работах участвовала проф. И.М. Батугина, основатель нового научного направления «Геодинамика недр») была разработана пятиступенчатая итерационная геодинамическая модель, которая объединила теорию геодинамического районирования и структурной устойчивости динамической системы. Новизна модели заключается в установлении закономерности

эволюционного взаимодействия между геодинамическими системами разных рангов и раскрытия механизма динамического феномена шахты. Согласно разработанной модели процесс сдвижения локализуется вдоль региональной геодинамической зоны, что приводит к образованию трещин на поверхности и смещению подработанного блока, т.е. реактивации этой зоны. Реактивация геодинамической зоны приводит к росту горного давления и проявлению сильных горных ударов с энергией до 10^7 Дж. Сильные горные удары вызывают сотрясение массива, что способствует дальнейшему развитию трещин и активизации сдвижения. Весь цикл повторяется, рис. 1.



Рис. 1
Модель эволюционного взаимодействия между геодинамическими системами разных рангов на шахте Хуафэн

Fig. 1
A model of evolutionary interaction between the geodynamic systems of different ranks at the Huafeng mine

В этом исследовании проф. Цяо Цзяньюн применил метод прогнозирования энергии динамических явлений на основе байесовской сети, что значительно повысило точность прогноза по сравнению с традиционным методом прогнозирования [3; 4]. В результате был предложен метод управления опасной ситуацией на шахте, предназначенный для защиты горных выработок от происходящих динамических явлений. Буквально в переводе с китайского это звучит как «есть динамическое явление в шахте, но нет катастрофических последствий в горных выработках». В течение длительного периода времени горнодобывающая компания «Xinwen Mining Group» постоянно продвигала и применяла эти результаты исследований. Эксперты в области геологии и горного дела как в Китае, так и за рубежом обратили внимание на эту научную разработку и признали использованный подход [5; 6]. Модель, названная «динамическая система горного массива и шахтного комплекса» (CGDSM), разработанная Цяо Цзяньюном и коллегами, и меры повышения безопасности в мае 2023 г. были удостоены награды Китайского общества промышленной и прикладной математики «CSIAM Applied Mathematics Landing Achievement» и отмечены как выдающееся достижение в междисциплинарных исследованиях в области горного дела и математики за последние годы.

Разработка и внедрение математической модели изменения напряжений в окрестности горных выработок на больших глубинах

Ежегодно в Китае сооружается более 12 000 км подготовительных и капитальных горных выработок, значительное их количество пройдено на больших глубинах. По статистике, в них происходит более 90% динамических явлений, включая горные удары, внезапные выбросы и техногенные землетрясения. Традиционно, распределение напряжений вокруг выработки представляют в виде концентрических зон предельного состояния, пиковой нагрузки и упругого состояния [7; 8]. Известно, что динамические процессы в массиве в процессе добычи и тектонические поля напряжений могут приводить к существенной анизотропии поля напряжений, что вызывает более сложное распределение напряжений вокруг выработки и вызывает многочисленные аварии. Важным средством контроля устойчивости выработки в таких условиях является определение геометрии упругопластической области во вмещающих породах. Для описания напряженного состояния в окрестности горной выработки в поле напряжений с произвольным отношением напряжений по главным осям и оценки величины смещений ее контуров путем решения обратной задачи Кастера была использована теория динамических фракталов Фату–Жюлиа [3; 4]. Результаты, полученные профессором Цяо Цзяньюном с использованием этой математической теории, показывают, что напряжения вокруг выработки при выраженной анизотропии внешнего поля напряжений имеют характерное лепестковое распределение с фрагментарным расположением пластической зоны вблизи контура выработки (рис. 2) Это распределение, названное по внешнему сходству лепестковой теоремой (Flower-petal Theorem), используется для раннего предупреждения динамических явлений и нарушения устойчивости кровли выработок.

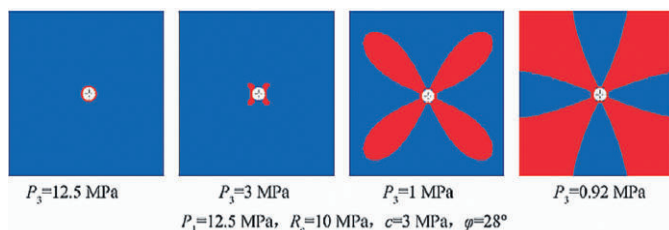


Рис. 2
Зоны развития пластических деформаций (красный цвет) вокруг выработки при изменении соотношения напряжений в массиве P_1/P_3

Fig. 2
Zones of plastic deformation (red) around the mine workings when the stress ratio in the rock mass changes from P_1 to P_3

Основываясь на полученном результате, Цяо Цзяньюн возглавил группу по разработке инженерного обеспечения разгрузки высоконапряженных зон. Были разработаны способ компоновки трехмерных разгрузочных щелей путем бурения скважин для охраны выработок и технология непрерывной разгрузки массива при разработке защитного пласта для предотвращения нелинейного смещения пород. Внедрение и долгосрочное применение разработанной технологии на шахте Баоде (Baode) компании «Shenhua Shendong Coal Group Corporation Limited» и на

шахте Донпан (Dongpan) компании «Jizhong Energy Group» в Китае дало положительные результаты по охране горных выработок. Это достижение получило первую премию в области естественных наук Министерства образования Китайской Народной Республики в 2022 г. и премию «За научные достижения» от Международного консорциума по уменьшению опасности геокатастроф в 2023 г. В известном международном научном журнале SCIENCE отмечено, что этот результат открывает новый путь для изучения динамики тоннелей [9].

Развитие технологий бесцеликовой отработки угольных пластов

Для обеспечения безопасной эксплуатации бремсбергов традиционно оставляют охранные целики шириной до нескольких десятков метров. Эта мера влияет на коэффициент извлечения угля, который на многих шахтах Китая составляет всего около 50%. Кроме того, целики являются концентраторами напряжений, что повышает опасность динамических проявлений горного давления. Также после отработки лавы возникает большой риск потери оборудования при его демонтаже из-за высокого горного давления. В последние несколько десятилетий исследование и разработка безлюдной технологии добычи полезных ископаемых стали одной из основных задач в области горной инженерии в Китае. Для решения этих задач необходимо устранить ряд фундаментальных научных проблем, связанных с пониманием законов перераспределения горного давления, особенно при разработке мощных угольных пластов.

Команда под руководством профессора Цяо предложила решение предельной теоремы о максимуме опорного давления для случая, когда мощность отрабатываемого пласта не превышает высоты выработки. Этот вывод дал важное теоретическое руководство для исследования и разработки новых методов бесцеликовой добычи. Была создана технология (метод добычи NNF), позволяющая на завершающем этапе отработки лавы отказаться от вспомогательных выработок, оставления целика и избежать работы в зоне высокого горного давления [10]. По сравнению с традиционной, эта технология отличается более низким геомеханическим риском при демонтаже оборудования, повышением коэффициента извлечения угля, снижением объема проходческих работ, снижением стоимости и времени перемещения оборудования к новому месту. Эта технология внедрена и применяется в течение многих лет в группе компаний Кайлуань (Kailuan).

Одной из новых технологий широко известного метода добычи 110/N00, созданного Государственной ключевой лабораторией геомеханики и глубокого подземного строительства в Китае [11], является технология инженерного разрезания кровли, разработанная с учетом математических инноваций команды проф. Цяо, направленных на снижение опорного давления. В основных угледобывающих регионах Китая метод добычи 110/N00 принес исключительные экономические выгоды и позволил повысить безопасность добычи.

Команда Цяо Цзяньюна придает также большое значение пропаганде и внедрению научных достижений в учебный процесс в горных вузах Китая. За последнее время она была удостоена четырех национальных и провинциальных наград за достижения в области преподавания.

Заключение

Внедрение фундаментальных научных разработок в практику горного дела в Китае способствует развитию новых технологий и повышению безопасности труда шахтеров. Проведение подобных исследований поощряется на различных уровнях, что способствует пропаганде достижений и внедрению их в практику и учебный процесс в университетах. На примере исследований научной группы под руководством проф. Цяо Цзяньюна можно видеть, как фун-

даментальные научные разработки в области математики, доказательства теорем в области динамических фрактальных множеств Фату–Жюлиа могут вывести на прикладные разработки в такой сложной области, как технологии безопасной и эффективной добычи угля и создание моделей взаимодействия геодинамических систем различного иерархического уровня.

Список литературы / References

1. Цяо Ц., Чжао Ц., Батугина И.М., Батугин А.С., Юй Л., Сунь Ч., Ань Б.И. Активизация блоков земной коры под влиянием горных работ как фактор геологических нарушений на шахте Хуафэн в Китае. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(12):132–137.
Qiao J., Zhao C., Batugina I.M., Batugin A.S., Yu L., Sun C., An B.I. Activation of the earth crust blocks under the impact of mining operations as a factor in geo-environmental disturbances at the Huafeng mine in China. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2012;(12):132–137. (In Russ.)
2. Цяо Ц., Батугин А.С., Батугина И.М. Юй Л., Чжао Ц. Условия проявления геодинамических явлений на шахте Хуафэн в Китае. М.: Спутник +; 2016. 144 с.
3. Qiao J., Wang Z., Li T., Zhao Y. Mathematical principle and engineering application of end-mining technology with non-pillar. *Earth Energy Science*. 2025;1(1):85–97. <https://doi.org/10.1016/j.ees.2024.08.003>
4. J. Qiao Research on pure mathematical problems in mining engineering and their applications. *Scientia Sinica Technologica*. 2023;53(10):1747–1762. (In Chinese). <https://doi.org/10.1360/SST-2022-0378>
5. Batugin A.S., Kolikov K.S., Odintsev V.N., Hotchenkov E.I. Dynamical destruction of rock mass due to excavation of a coal seam. In: Litvinenko V.S. (ed.) *Geomechanics and geodynamics of rock masses: Proceeding of the 2018 European Rock Mechanics Symposium, Saint Petersburg, 22–26 May 2018*. Taylor & Francis Group, London, UK; 2018, pp. 593–598.
6. Wang A., Chen Y.-T. A method of determination of the internal friction characteristics within the Earth's crust through conjugate earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*. 2021;64(10):3442–3451. (In Chinese). <https://doi.org/10.6038/cjg2021P0286>
7. Kastner H. *Statik des Tunnel-und Stollenbaues*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag; 1962.
8. Петухов И.М., Сидоров В.С., Раевская Г.Г. О зоне опорного давления. *Труды ВНИМИ*. 1968;46:208–212.
Petukhov I.M., Sidorov V.C., Raevskaya G.G. On the bearing pressure zone. *Trudy VNIMI*. 1968;46:208–212. (In Russ.)
9. Li Z. Recommendations for Scientific Breakthroughs of Chinese Universities in 2020. *ScienceCareers*. 2020;370(6523):2–3. Available at: <https://www.science.org/cms/asset/125216bd-e537-4d1f-bd11-63fc521cb9f6/classifiedads.pdf> (accessed: 27.03.2025).
10. Qiao J., Wang Z., Li T. Research on limitation of peak points of ground pressure and technology in non-pillar final mining method. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) / Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2023;54(3):880–894. (In Chinese). <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2023.03.008>
11. Wang Y., Wang Q., He M., Hou S., Yang J., Gao Y. Stress and deformation evolution characteristics of gob-side entry retained by the N00 mining method. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021;7(3):84. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00279-w>

Информация об авторе

Батугин Андриан Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Горный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: as-bat@mail.ru

Information about the authors

Andrian S. Batugin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mining Institute, National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation; e-mail: as-bat@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.09.2025
Поступила после рецензирования: 27.10.2025
Принята к публикации: 12.11.2025

Article info

Received: 09.09.2025
Revised: 27.10.2025
Accepted: 12.11.2025