Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций

Волков М. Н.^{1*}, Половов Б. Д.¹, Прищепа Д. В.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru

Реферат

Введение. Результаты, полученные в отечественной и зарубежной практике, не гарантируют высокое качество оценивания состояния вмещающих массивов горных пород и достоверность обоснования рациональных геомеханических решений, что подтверждается фактическими уровнями травматизма и аварийности, в том числе форс-мажорами катастрофического характера. Таким образом, практикуемые методы геомеханического анализа нуждаются в кардинальном совершенствовании.

Цель работы – разработка компьютерных технологий комплексного детерминированно-вероятностного моделирования в рамках системы оценивания и обеспечения качества геомеханических решений – совокупности взаимосвязанных оценок и показателей, таких как оперативность, доступность, достоверность, надежность и достаточность информации о свойствах и состоянии вмещающих массивов горных пород; соответствие требованиям нормативных документов; уровни геомеханических рисков по факторам аварийности, травматизма и экологической опасности; потенциальные ущербы от последствий рисков, финансовые поступления и затраты, включающие функции влияния потенциальных ущербов и результативность мониторинга.

Методология. Исследования проведены на основе имитационного конструктора – базовой программы, предназначенной для конструирования, отладки и испытания новых комплексных детерминированно-вероятностных моделей геомеханических ситуаций, выполняющих исследовательскую, обучающую, демонстрационную функции, резервирование процесса и результатов моделирования, купирование погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. Главная особенность конструктора – наличие взаимосвязанных составляющих: детерминированной и имитационной. Такой комплекс дает исследователю важную взаимодополняющую информацию: детерминированный метод выполняет страхующие функции и определяет непротиворечие результатов анализа требованиям нормативной документации; вероятностный – обеспечивает объективную количественную оценку геомеханических рисков или надежностей с выходом на получение однозначной результативности по факторам экономической и социальной безопасности, исключает или существенно снижает вероятность внесения излишних затрат. Универсальность подхода к созданию компьютерных технологий моделирования геомеханических решений, реализующих детерминированно-имитационный комплекс на основе методов непараметрической статистики, подтверждается примерами моделирования в многовариантной постановке.

Область применения – горнотехнические сооружения строительной, подземной, открытой, комбинированных технологий горнодобывающих предприятий и специфических объектов освоения подземного пространства в различных отраслях народного хозяйства.

Выводы. Компьютерные технологии моделирования геомеханических ситуаций на основе комплекса детерминированных, имитационных методов и процедур непараметрической статистики малых выборок вносят решающий вклад в систему оценивания и обеспечения качества геомеханических решений. Отмечается универсальность формирования компьютерных технологий, доступность широкому кругу пользователей, простота и оперативность реализации.

Ключевые слова: компьютерные технологии; детерминированно-имитационное моделирование; непараметрическая статистика; качество; геомеханические решения; имитационный конструктор; генерация; случайные числа; риск; критерии.

Введение. Основу современного геомеханического анализа составляют мощная нормативная база, фонд аналитических разработок и бурно развивающиеся компьютерные технологии, обеспечившие несомненные достижения и прогресс в области геомеханики. Вместе с тем результаты, полученные в отечественной и зарубежной практике, не гарантируют высокое качество оценивания состояния вмещающих массивов горных пород и достоверность обоснования рациональных геомеханических решений, что подтверждается фактическими уровнями травматизма и аварийности, в том числе форс-мажорами катастрофического характера [1–4]. Главной причиной сложившейся ситуации является массовая реализация детерминированных геомеханических моделей, в которых нестабильность и изменчивость природных и технических условий учитывается страхующими коэффициентами или системами подобных показателей, в частности коэффициентами запаса, кратность которых может составлять до 10 и более единиц. Вероятностные методы геомеханического анализа имеют ограниченную область применения и не нашли должного отражения в действующих нормативных документах. Между тем экономические показатели предприятий и организаций из-за геомеханических рисков не всегда являются оптимальными, не исключается избыточность затрат, замедляются сроки выполнения работ, наблюдается их неритмичность и удорожание, снижаются доходы и запланированная прибыль. Таким образом, практикуемые методы геомеханического анализа, обеспечивающие высокое качество геомеханических решений, нуждаются в кардинальном совершенствовании.

Значительный объем исследований по этой теме был выполнен в Уральском государственном горном университете за последние 20 лет [2–4] по направлениям: «информация о свойствах и особенностях вмещающих массивов», «непараметрическая статистика», «имитационная геомеханика», представляющим прагматическую основу для разработки упорядоченной универсальной системы обеспечения качества геомеханических решений – совокупности взаимосвязанных оценок и показателей, таких как оперативность, доступность, достоверность, надежность и достаточность информации о свойствах и состоянии вмещающих массивов горных пород; соответствие требованиям нормативных документов; уровни геомеханических рисков по факторам аварийности, травматизма и экологической опасности; потенциальные ущербы от последствий рисков, финансовые поступления и затраты, включающие функции влияния потенциальных ущербов и результативность мониторинга.

Цель работы – разработка компьютерных технологий комплексного детерминированно-вероятностного моделирования, отражающая совокупность перечисленных направлений обеспечения высокого качества геомеханических решений, реализуется в два этапа: *первый* – создание имитационного конструктора комплексных детерминированно-вероятностных моделей; *второй* – исследование продуктивности новых компьютерных технологий.

Методология исследований. Имитационный конструктор представляет собой базовую программу, предназначенную для конструирования, отладки и испытания новых комплексных моделей. Наряду с этим в конструкторе предусмотрено выполнение следующих функций: исследовательской, демонстрационной, обучающей, резервирования процесса и результатов моделирования, купирования погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. В качестве базовой выбрана программа расчета нагрузок на подпорную стену, характеризу-

Таблица 1. Результаты комплексного моделирования по базовой версии
Table 1. Integrated modeling results according to a basic version

Исходные данные							
Постоянные							
Высота подпорной стены с заделкой 10 м. Глубина заделки 3 м							
Статистики							
Коэффициент надежности по нагрузке, одностороннее нормальное распределение: $M(1) = 1$; $S(1) = 0,067$. Удельный вес грунта, кН/м^3 , $M(2) = 22,38$, бутстреп-выборка: 23,4; 21,0; 20,8; 20,9; 21,4; 20,0; 19,7; 24,5; 32,4; 21,5; 25,0; 18,0. Угол внутреннего трения, рад, распределение Грамма–Шарлье: $M(3) = 0,4373$; $S(3) = 0,0709$; $ASI(3) = -0,605$; $EKS(3) = -1,451$							
Активная нагрузка, кПа				Пассивная нагрузка, кПа			
Результаты расчета по постоянным и средним значениям $M(1)$, $M(2)$, $M(3)$							
453,1854				248,6705			
Гистограммы плотности распределения нагрузок

Шкалы надежностей-рисков							
Нагрузка	Частота	Надежность	Риск	Нагрузка	Частота	Надежность	Риск
364,3	22	0,0873	0,9127	166,1	7	0,0278	0,9732
424,0	87	0,3452	0,6548	195,6	15	0,0595	0,9405
483,7	154	0,6111	0,3889	226,1	41	0,1627	0,8373
543,4	203	0,8056	0,1944	256,5	100	0,3968	0,6038
603,1	221	0,8770	0,1230	287,0	152	0,6032	0,3968
662,7	235	0,9325	0,0675	317,5	205	0,8135	0,1865
722,4	243	0,9643	0,0357	347,9	231	0,9167	0,0833
782,1	248	0,9841	0,0159	378,4	242	0,9603	0,0397
841,8	250	0,9921	0,0079	408,9	249	0,9881	0,0119
901,5	252	1,0000	0,0000	439,3	252	1,0000	0,0000
Проектные нагрузки DOP1, DOP2, DOP3 и риски R1, R2, R3							
DOP1 = 500, DOP2 = 600, DOP3 = 700				DOP1 = 300, DOP2 = 350, DOP3 = 400			
R1 = 0,325, R2 = 0,123, R3 = 0,0397				R1 = 0,278, R2 = 0,075, R3 = 0,0159			
Значимость случайных параметров DLT1, DLT2, DLT3							
DLT = 0,320, DLT2 = 0,308, DLT3 = 0,372				DLT = 0,399, DLT2 = 0,384, DLT3 = 0,216			
Нагрузки по доверительным вероятностям 0,85 и 0,95							
$EA_{0,85} = 570,4$; $EA_{0,95} = 685,2$				$EP_{0,85} = 325,5$; $EP_{0,95} = 366,5$			

Обозначения в таблице соответствуют обозначениям в имитационном конструкторе.

мая широкой областью использования, включающей горное дело, гидротехнику, гражданское, транспортное, энергетическое строительство и сооружения, размещаемые в подземном пространстве. Учтена простота алгоритмов расчета, наличие двух выходных случайных массивов активных и пассивных нагрузок.

Структура имитационного конструктора – 33 блока, 7 из которых изменяемых полностью или частично (объявление размерности массивов переменных, ввод исходной информации, детерминированная и имитационная модели, начало цикла обработки выходных случайных массивов, отбраковка по физическим условиям, форматы списка генераций в матричной форме) при создании новой модели и 26 блоков с неизменяемым содержанием (объявления 17 подпрограмм, открытия текстового файла, управления работой имитационного конструктора, ввода размерности бутстреп-генератора и ее синхронизации с количеством генераций других случайных параметров моделирования, генерации входных и выходных массивов, оценки степени влияния (чувствительности, значимости) случайных параметров, выведения результатов детерминированно-имитационного моделирования на экран и в текстовый файл, в частности *шкалы рисков–надежностей*).

Главная особенность конструктора – наличие взаимосвязанных составляющих: детерминированной и имитационной. Такой комплекс дает пользователю важную взаимодополняющую информацию: детерминированный метод выполняет страхующие функции и определяет непротиворечие результатов анализа требованиям нормативной документации, вероятностный – обеспечивает объективную количественную оценку геомеханических рисков или надежностей с выходом на получение однозначной результативности по факторам экономической и социальной безопасности, исключает или существенно снижает вероятность внесения излишних затрат. Важное достоинство комплексного метода – резкое снижение трудоемкости разработки программного обеспечения. Для подавляющего большинства геомеханических ситуаций программа детерминированного анализа элементарно трансформируется в имитационном блоке: достаточно детерминированные входные параметры $M(k)$ (здесь k – индекс параметра) заменить на $B1(k, j)$, где $j \in 1, N$ (N – заданное число генераций) и выполнить N вычислений в имитационном цикле.

Детерминированная модель

$$W = 45 * \pi / 180$$

$$K1 = \tan(W - M(3) / 2)$$

$$EA = .5 * M(1) * M(2) * (H * K1) ^ 2$$

$$K2 = \tan(W + M(3) / 2)$$

$$EP = .5 * M(1) * M(2) * (HT * K2) ^ 2$$

Имитационная модель

$$\text{FOR } I = 1 \text{ TO } NN$$

$$K1 = \tan(W - B1(3, I) / 2)$$

$$EA = .5 * B1(1, I) * B1(2, I) * (H * K1) ^ 2$$

$$K2 = \tan(W + B1(3, I) / 2)$$

$$EP = .5 * B1(1, I) * B1(2, I) * (HT * K2) ^ 2$$

$$YA(1, I) = EA; YA(2, I) = EP$$

$$\text{NEXT } I$$

Консервативные результаты детерминированного блока служат для сопоставления с имитационной составляющей и исключения ошибок в ходе имитационного процесса точечным введением средних выборочных $M(k)$ в генерируемый массив имитируемой модели взамен $B1(k, j)$ с последующей временной остановкой программы. Детерминированные коэффициенты запаса, фиксированные нормативные доверительные вероятности, нагрузки смещения и другие показатели страхующего назначения, установленные на практике, составляют значительную долю в системе имитационных критериев оценок геомеханических рисков.

Имитационный конструктор содержит две части, управляемые блоком перехода, исполняющим собственно имитацию или дополнительно оценивающим

значимость δ_k случайных параметров по реализациям общей и частных сверток шкалы рисков–надежностей:

$$S_s = \sum_{sk=1}^m R_{sk} \cdot G_{sk} \text{ или } S_s = \sum_{sk=1}^m N_{sk} \cdot G_{sk}, S_s \in [1, m];$$

$$S_{ki} = \sum_{ki=1}^m R_{ki} \cdot G_{ki} \text{ или } S_{ki} = \sum_{ki=1}^m N_{ki} \cdot G_{ki}, S_{ki} \in [1, m]; ki \in [1, m],$$

$$\sigma_{ki} = S_s / \sum_{ki=1}^m S_{ki}; \quad S = \sum_{ki=1}^m \sigma_{ki}; \quad \sigma_k = \sigma_{ki} / S,$$

где S_s – свертка по шкале с учетом всех (m) случайных параметров: R_{sk} , N_{sk} , G_{sk} – риски или надежность, вычисленные по совокупности m случайных параметров; S_{ki} , R_{ki} , N_{ki} – риски или надежность, последовательно вычисленные по одному из m случайных параметров и ($m - 1$) случайных параметров, замененных на детерминированные значения $M(k)$.

Таблица 2. Результаты комплексного моделирования по «рабочей» версии
Table 2. Integrated modeling results according to the “working” version

Нагрузки, кПа	Исходное число генераций									
	200 000	100 000	50 000	25 000	12 500	6250	3000	1000	500	250
	Число генераций после отбраковки									
	72 811	39 684	20 600	11 810	5784	2764	1006	502	252	250
Риски										
700	0,040	0,039	0,039	0,040	0,040	0,040	0,034	0,034	0,033	0,028
600	0,125	0,123	0,124	0,125	0,127	0,126	0,116	0,112	0,103	0,096
500	0,343	0,341	0,340	0,337	0,334	0,338	0,034	0,334	0,333	0,320

Данные табл. 2 не позволяют сделать однозначного заключения об эффективности повышения числа генераций до уровней 100 000 и более. См. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. М.: Стандартинформ, 2012. 76 с. (дата актуализации 01.08.2013).

В имитационном конструкторе предусмотрено использование традиционных генераторов случайных чисел на основе законов нормального, одностороннего нормального, экспоненциального, Вейбулла распределений и нестандартных генераторов по распределению Грамма–Шарлье и бутстреп-тиражированию. Область безусловного применения нормального распределения ограничена вероятностью больше или равно 0,85 гипотезы нормальности, подтверждаемой непараметрическим W -критерием согласия Шапиро–Уилка, устанавливаемым программным путем. Вероятность выше 0,75 обеспечивает ориентировочные суждения о свойствах горных пород и горнотехнических условиях. Нормальное распределение с параметрами: выборочное среднее $\bar{x}$ и стандарт $S = 0,3\bar{x}$ для механических и $S = 0,15\bar{x}$ для физических характеристик – согласно пункту 5.5 актуализированной редакции ГОСТ 20522-2012 при полном отсутствии выборочной информации можно рекомендовать для использования в учебном процессе с соответствующими разъяснениями. Нормальное распределение безальтернативно, если в имитационную модель вводятся вероятностные трактовки норматив-

ных коэффициентов предельных состояний, полученных по данным обработки многочисленных экспериментов по принципу «трех сигм».

Повышение качества имитационного моделирования достигается многоступенчатой отбраковкой выбросов, ошибок и погрешностей методом Монте-Карло (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011) [6, 7]:

– *первая ступень* реализует в стадии подготовки исходной информации парадигму непараметрической статистики малых выборок [5] по схеме «локализация выбросов по неравенству Бьенеме–Чебышева – проверка выборки на случайность по критерию Вальда–Вулфовица – бутстреп-генерация – гистограммная оценка плотности распределения». Последняя позволяет судить о целесообразности подгонки распределений или бутстреп-тиражирования исходной выборки в целях генерации исходных параметров;

– *вторая ступень* выполняется непосредственно в подпрограммах генерации случайных чисел по Бьенеме–Чебышеву, очевидным физическим условиям, кадастровым границам литологических разностей с восстановлением начального количества генераций NN в цикле DO ... LOOP UNTIL NN;

– *третья ступень*: отбраковка ведется в блоке обработки выходных случайных массивов по Бьенеме–Чебышеву и допустимым физическим уровням;

– *четвертая ступень*: фильтрация выходных массивов по критерию серий.

Таблица 3. Результаты детерминированно-имитационного моделирования
Table 3. Results of deterministic simulation modeling

$X, м$	n_3	Доверительная вероятность	$X, м$	n_3	Доверительная вероятность
7	1,00	0,517	15	1,91	0,956
9	1,26	0,723	17	2,09	0,974
11	1,51	0,864	19	2,27	0,982
13	1,72	0,918	21	2,45	0,992

Базовая версия имитационного конструктора общего назначения насыщена большим количеством потребителей ресурсов операционной памяти, в силу чего предельное количество генераций не может превышать уровни, равные 250–500. Этот недостаток устраняет «рабочая» версия, формируемая из базовой, обеспечивающая N_{og} генерацию от 1000 до 100 000 и более моделируемых случайных чисел. Для ординарного бытового компьютера такие генерации реализуются последовательным генерированием случайных чисел в цикле из серий: $k_m = N_{og} / NN$, здесь NN – число случайных чисел, генерируемых за один цикл, составляющее от 250 до 500. В программе отключаются операторы PRINT, контрольные точки, демонстрационные и обучающие строки, блоки, подпрограммы, корректируются объявленные размерные массивы, имитируется только один выходной массив (активная нагрузка). Общее число генераций задается в количестве от 250 до 200 000. Во всех рассмотренных вариантах используется одна и та же последовательность случайных чисел от постоянного первого равномерного случайного числа. Табл. 1, 2 поясняют особенности и результативность обеих версий.

Проблема генерации входных случайных чисел и последующих вычислений в сложных геомеханических моделях (например, включающих 10 и более последовательно вычисляемых случайных массивов или 4 и более взаимно связанных случайных массивов) радикально решена переходом на версию имитационного моделирования на языке PHP в среде Cloud Computing (100 000 генераций в минуту).

Рассмотренные материалы являются универсальным инструментом для создания компьютерных технологий моделирования геомеханических решений, реализующих детерминированно-имитационный комплекс на основе методов непараметрической статистики. Целесообразность и преимущества такого подхода демонстрируют три обобщенных примера в многовариантной постановке.

Рис. 1. Вариант расчетной схемы и результатов расчета МКЭ
Fig. 1. A variant of analytic model and FEM results

Моделирование столбчатых целиков по методу Турнера–Шевякова с оптимизацией коэффициента запаса прочности. Модель включает три выделенных случайных параметра $\sigma_{сж}$, γ_0 , γ – сопротивление пород целика сжатию, удельный вес пород в целике, средний удельный вес столба пород соответственно:

$$X = A(1 + B/L) / \left(\frac{\sigma_{сж} K_{\phi} K_c K_t}{n_3 \gamma H K_{\alpha} K_H} - \frac{\gamma_0 h_0}{\gamma H} - (1 + B/L) \right),$$

где X – ширина целика; A , B – допустимые пролеты обнажений; L – длина целика; K_{ϕ} – коэффициент формы и особенностей контакта целика с вмещающими породами; K_c – коэффициент структурного ослабления пород; K_t – коэффициент длительной прочности пород; h_0 – высота целика; n_3 – коэффициент запаса прочности целика; K_{α} – коэффициент влияния угла падения пласта или залежи; K_H – коэффициент влияния мощности налегающих пород, создающих давление на целик; H – высота столба пород, воздействующих на целик.

Исходные данные: $\sigma_{сж} = 50\,000$ кПа; $M(1) = \sigma_{сж}$; $\gamma_0 = 28$ кН/м³; $M(2) = \gamma_0$; $\gamma = 27$ кН/м³; $M(3) = \gamma$; $S(I) = 0,3M(I)$; X – варьируемая от 7 до 21 м ширина целика; $A = 6$ м; $B = 6$ м; $L = 15$ м; $h_0 = 12$ м; $K_c = 0,8$; $K_t = 0,8$; $K_{\alpha} = 0,979$; $K_H = 0,7$; $H = 500$; n_3 , K_{ϕ} – вычисляемые параметры по варьируемым значениям X .

Результаты, полученные при 500 генерациях случайных чисел, трех случайных параметрах, восьми случайных массивах, приведены в табл. 3.

Доверительная вероятность по второй группе предельных состояний составляет 0,85, см. СП 22.13330.2016. Этому требованию отвечает целик шириной 13 м. Вместе с тем оптимальность полученного геомеханического решения должна подтверждаться экономическим сопоставлением потерь полезного ископаемого с потенциальным ущербом – произведением выделенных надежностей и составляющих (неполучение плановой прибыли, увеличение условно-постоянных расходов в себестоимости добычи, убытки от простоев, затраты на локализацию опасной ситуации). Эти составляющие могут оказаться весьма влиятельными, если деформация целика вызывает цепную реакцию последующих разрушений в камере.

Рис. 2. Схема комбинированной разработки рудного месторождения:

1 – отработанный карьер; 2 – поверхность скольжения борта карьера; 3 – водоносный пласт; 4 – зоны тампонажа; 5 – гидроизоляция из перемятой утрамбованной глины; 6 – барьерный целик; 7 – рудная залежь; 8 – водоотводящая штольня и насосная станция; 9 – вентиляционный ствол с функциями водоотведения и запасного выхода; 10 – контрольные скважины; 11 – клетевой ствол; 12 – скиповый ствол; 13 – выработки горизонтов; 14 – водоотливный комплекс подземного рудника

Fig. 2. Flow sheet of integrated development of an ore field:

1 – abandoned pit; 2 – pit edge glide surface; 3 – water-bearing stratum; 4 – zones of tamping; 5 – waterproofing layer of broken paddled clay; 6 – safety pillar; 7 – ore chute; 8 – drainage adit and pumping plant; 9 – air shaft with the function of water discharge and emergency exit; 10 – observation well; 11 – cage shaft; 12 – skip shaft; 13 – level workings; 14 – underground mine drainage

Принцип обеспечения качества геомеханических решений методами конечных элементов, имитационного моделирования и непараметрической статистики, поясняемый схемой рис. 1, предусматривает: генерацию исходных физико-механических параметров с фиксацией от 8 до 24 случайных величин для каждого параметра с формированием групп вариантных расчетов; детерминированные вариантные конечно-элементные решения по авторитетным программным продуктам; формирование малой выборки из вариантных результатов; тиражирование малой выборки методами «бутстреп» или «складной нож»; имитационное моделирование.

На рис. 1 представлен один из вариантов условий проходки перегонного тоннеля под плотиной городского пруда и результаты расчета мульт сдвижения по

программе PLAXIS 3D TONNEL. Случайная выборка сформирована по оценкам смещений в 10 детерминированных вариантах: 0,0226; 0,0095; 0,0138; 0,0124; 0,0119; 0,0145; 0,0165; 0,0196; 0,0144; 0,0120. Объем тиража составляет 1000 генераций. В имитационную составляющую комплексного моделирования введены нормативные коэффициенты условий работы 1,8 и надежности по ответственности 1,2. Уровни рисков по критериям оседаний 0,02, 0,03, 0,04 м составляют соответственно: 0,032; 0,000; 0,000.

Комплексное моделирование сложной геомеханической ситуации для комбинированной системы разработки месторождения «карьер–подземный рудник», представленной на рис. 2, включает следующие последовательно выполняемые этапы, рассматриваемые в адаптированной форме.

Проверка устойчивости борта карьера. Детерминированная проверка выполняется по формулам, задающим семейство поверхностей скольжения из двух сопряженных дуг «биарков» и оценивающим коэффициенты запаса:

$$R_1 = \frac{(x_B - x_A) \sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2}\right) - (y_B - y_A) \cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)};$$

$$R_2 = \frac{(x_A - x_B) \sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2}\right) - (y_A - y_B) \cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2}\right)}{2 \sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)};$$

$$\left. \begin{aligned} x_{O1} &= x_A - R_1 \sin \varphi_1 \\ y_{O1} &= y_A + R_1 \cos \varphi_1 \\ x_{O2} &= x_D - R_2 \sin \varphi_2 \\ y_{O2} &= y_D + R_2 \cos \varphi_2 \\ x_S &= R_1 \sin \varphi_0 + x_{O1} \\ y_S &= y_{O1} - R_1 \cos \varphi_0 \end{aligned} \right\},$$

$$n_3 = \left(\sum_{i=1}^{m1} \operatorname{tg} \rho_i N_i + \sum_{j=1}^{m2} c_j L_j \right) \left(\sum_{i=1}^{m1} T_i \right)^{-1},$$

где R_1 и R_2 – радиусы сопряженных дуг; x_{O1} , y_{O1} , x_{O2} , y_{O2} – координаты центров вращения; x_S , y_S – координаты точки сопряжения B двух дуг с радиусами R_1 и R_2 (рис. 3); $\varphi_1 = \alpha - 45^\circ + \rho/2$; $\varphi_2 = 45^\circ + \rho/2$ или $\varphi_2 = \delta - \theta$; $\varphi_0 = (\varphi_2 - \varphi_1) n^{-1}$; x_A , y_A , x_D , y_D – координаты начальной и конечной точек криволинейного участка поверхности скольжения; α – угол наклона откоса; ρ – угол внутреннего трения; δ – угол падения поверхности ослабления; θ – угол «встречи» криволинейного участка поверхности скольжения с поверхностью ослабления; n_3 – коэффициент запаса устойчивости; N_i – интеграл нормальной составляющей нагрузки по поверхности скольжения; c_j – сцепление; L_j – интеграл длины поверхности скольжения; T_i – интеграл касательной составляющей нагрузки по поверхности скольжения; m_1 , m_2 – величины, характеризующие особенности расположения поверхностей скольжения и условия залегания горных пород.

Поверхности скольжения задаются двумя циклами Y (количество «пучков» биарков) и J (количество биарков в пучке). Для каждой поверхности скольжения вычисляется коэффициент запаса устойчивости и находится расчетная поверхность с минимальным коэффициентом запаса (рис. 3).

Исходные данные: удельный вес пород $2,5 \text{ тс/м}^3$; угол внутреннего трения 30° ; сцепление 100 тс/м^2 ; высота борта 500 м ; генеральный угол погашения борта 45° . На рис. 3 и в табл. 4 приведены результаты детерминированных вычислений, поверхность с минимальным запасом $1,398$ выделена жирным шрифтом.

Для выделенной поверхности с минимальным запасом устойчивости имитационным методом устанавливаются надежность и риск объекта. Надежность N определяется отношением количества случайных чисел в выходном массиве с запасами больше единицы ко всему прогенерированному с учетом отбраковки объема: $N = 881/996 = 0,881$; риск $R = 0,119$. Результат детерминированного расчета $n_3 = 1,398$ превышает нормативный коэффициент запаса, составляющий $1,3$. Надежность $N = 0,881$ больше доверительной вероятности $0,85$ по второй группе предельных состояний.

Рис. 3. Построение поверхностей скольжения
Fig. 3. Glide surfaces building

Оценка качества противифльтрационной завесы по остаточному водопри току $Q_{\text{сум}}$, сопровождающемуся непроизводительными затратами и, главное, при больших дебитах – возможностью провоцировать форс-мажор затопления для подземного рудника: формирование шкалы границ (радиусов инъекции) и соответствующих им интервалов и поинтервальных рисков; вариантное определение числа тампонажных скважин; определение суммарной длины «окон» (незатампонируемых участков завесы) в соответствии с числом интервалов и границами интервалов; генерация массива вероятных водопри токов через «окна»; генерация массива вероятных водопри токов через тело завесы; суммирование водопри токов (табл. 5); фиксация составляющих ущербов от водопри тока.

В состав мероприятий по предотвращению затопления подземного рудника входят возведение гидроизоляционного слоя 5 (см. рис. 2) над барьерным целиком 6, строительство шахтного водоотливного комплекса 8, проходка вентиляционного ствола 9 с функцией запасного выхода и с размещением ставов труб для

карьерного водоотлива (хорошей альтернативой классическому шахтному водоотливу может стать дренажный узел, оснащенный погружными насосами по типу дренажных узлов Североуральского бокситового бассейна, успешно эксплуатируемых в течение нескольких десятков лет). Особое значение приобретает оценка состояния степени разрушенности пород в предельном контуре карьера на контакте с гидроизоляцией 5 как зоны потенциальной опасности прорыва карьерных вод в подземные горные выработки.

Таблица 4. Коэффициенты запаса устойчивости борта
Table 4. Open pit was stability factor

Цикл Y	Цикл J	n_s	Цикл Y	Цикл J	n_s	Цикл Y	Цикл J	n_s	Цикл Y	Цикл J	n_s
1	1	1,423	2	1	1,398	3	1	1,445	4	1	1,547
	2	1,428		2	1,407		2	1,445		2	1,549
	3	1,433		3	1,413		3	1,457		–	–
	4	1,436		4	1,416		–	–		–	–

Ширина призмы скольжения на верхней берме карьера 40 м.

Обеспечение геомеханического качества барьерного целика выполняет совмещенный детерминированно-имитационный расчет барьерного целика б, выполненный с варьированием его мощности в долях от полупролета с внешней нагрузкой от высоты столба воды, сформировавшегося в карьере при форс-мажорной интенсивности дождя, остаточного водопритока и мощности изолирующего слоя 5.

Таблица 5. Оценка остаточных водопритоков через
противофильтрационную завесу
Table 5. Residual influx evaluation through the grouting

Радиус инъекции R_j , м	Число скважин N_c	Водоприток на объект, м³/сут		
		через «окна» Q_{1c}	через завесу Q_{2c}	общий $Q_{сум}$
–	–	276,60	–	276,60
1,709	390	–	84,08	84,08
2,352	282	3,36	83,07	86,43
2,975	224	22,50	77,25	99,75
3,909	171	68,93	63,14	132,07

Принимая для однородной завесы вероятность $P_1 = Q_{сум1} / 276,6$, для двухрядной линейной завесы показатели надежности W_2 и риска P_2 составят: $W_2 = 2(1 - 0,477) - (1 - 0,477)^2 = 0,772$; $P_2 = 1 - 0,772 = 0,228$. Остаточный водоприток через двухрядную завесу составит: $Q_{сум2} = 276,6 \cdot 0,228 = 63,1$ м³/сут. Аналогично для трехрядной завесы: $W_3 = 0,891$, $P_3 = 0,109$; $Q_{сум3} = 276,6 \cdot 0,109 = 30,1$ м³/сут.

На завершающем этапе моделирования геомеханических решений для компонентов комбинированной системы разработки месторождения на основе версий имитационного конструктора формируются компьютерные технологии устойчивых обнажений, прочности опорных и междукamerных целиков. Постановка, структура и реализация этих геомеханических решений для объектов подземных очистных выработок идентичны изложенным материалам по оптимизации столбчатого опорного целика.

Область применения – горнотехнические сооружения строительной, подземной, открытой, комбинированных технологий горнодобывающих предприятий и

специфических объектов освоения подземного пространства в различных отраслях народного хозяйства.

Выводы. Компьютерные технологии моделирования геомеханических ситуаций на основе комплекса детерминированных, имитационных методов и процедур непараметрической статистики малых выборок вносят решающий вклад в систему оценивания и обеспечения качества геомеханических решений, не имеющую аналогов [8–11]. Отмечается универсальность формирования компьютерных технологий с использованием имитационного конструктора – базовой программы, предназначенной для конструирования, отладки, испытания новых детерминированно-вероятностных моделей, предусматривающей выполнение демонстрационной, обучающей, исследовательской функций, резервирования процесса и результатов моделирования, купирования погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. Предлагаемые программные разработки доступны широкому кругу пользователей, поскольку не нуждаются в специальных продуктах типа ANYLOGIC, ARENA, ARIS, GPSS, ITHINK [12–14] и функционируют в среде стандартизированных языков Q-BASIC, QB-64, PHP на рядовых ЭВМ с тактовой частотой 2,1 ГГц без существенных утрат в оперативности. Основная версия имитационного конструктора в интерактивном режиме выполняется в течение 6 мин, рабочая версия с 200 000 генераций – в течение 35 мин, для непараметрической подготовки исходных выборок необходимо от 1,5 до 3 мин, геомеханические решения в подавляющем большинстве требуют до 5–12 мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипов А. Последний путь рудника «Мир»: исследование причин катастрофы 4 августа 2017 г. СПб: Политехника, 2019. 264 с.
2. Половов Б. Д., Волков М. Н. Имитационная геомеханика // Известия Уральского государственного горно-геологического академии. 2002. Вып. 14. С. 107–123.
3. Волков М. Н., Половов Б. Д., Романов Д. А. Непараметрическая оценка физико-технических свойств грунтов на стадии проектирования // ГИАБ. Строительная геотехнология. 2010. Отд. вып. 6. С. 112–123.
4. Половов Б. Д., Волков М. Н., Михайлов Д. В., Романов Д. А., Токарев П. К., Харченко Д. И. Геомеханический анализ горнотехнических объектов: точки роста // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 7. С. 40–50.
5. Половов Б. Д., Валиев Н. Г. Геомеханический анализ горнотехнических объектов на основе методов непараметрической статистики. Екатеринбург: УГТУ, 2015. 272 с.
6. Фалин Г. И. Метод Монте-Карло в теории риска. URL: <https://www.math/msu.su.htm/> (дата обращения: 23.09.16).
7. Гильванова Г. А. Анализ риска инновационного проекта методом имитационного моделирования (метод Монте-Карло) // Материалы конференции КазНИТУ. 2015. № 12(34). С. 157–161.
8. Власов М. В. Имитационное моделирование. Новочеркасск: Политехника, ЮРГУУ (НПИ), 2016. 60 с.
9. Vasilii V. Simoviev, Aleksey N. Starodubov, Mixail U. Dorofeev, Victor V. Okolnishkov. Simulation Application for evaluation of efficiency of mining systems automatization // WSEAS Transactions on Systems. 2015. Vol. 14. Art. 24. P. 261–267.
10. Кравчук С. В., Стародубов Ф. Р. Разработка системы имитационного моделирования очистных горных работ // Россия молодая: сб. матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 18–21 апреля 2017. Кемерово, 2017. С. 1–5.
11. Норникель создал систему имитационного моделирования для планирования подземных горных работ. URL: <https://lenta.ru/articles/2019/10/10/nornikel/> (дата обращения: 22.11.2019).
12. Discrete event simulation software. URL: <https://www.arenasimulation.com> (дата обращения: 22.11.2019).
13. Simulink. URL: <https://matlab.ru/produtsimulink> (дата обращения: 22.11.2019).
14. Почему Anylogic? URL: <https://www.anylogic.ru/features> (дата обращения: 22.11.2019).

Поступила в редакцию 26 декабря 2019 года

Сведения об авторах:

Волков Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент, декан горно-технологического факультета Уральского государственного горного университета. E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru
Половов Борис Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Уральский государственный горный университет. E-mail: boris.polovov.37@yandex.ru

Прищепа Дмитрий Вячеславович – ассистент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: dmitriy.prishchepa@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

Information technologies of geomechanical events integrated simulation

Maksim N. Volkov¹, Boris D. Polovov¹, Dmitrii V. Prishchepa¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Neither national nor foreign practice can guarantee high-quality assessment of enclosing rock mass state and reliable substantiation of rational geomechanical solutions. It is confirmed by actual accident and breakdown rates including catastrophic force majeure. So, current methods of geomechanical analysis need principal improvement.

Research aim is to develop information technologies of integrated deterministic stochastic modeling within the system of assessing and ensuring the quality of geomechanical solutions, which is the set of interconnected estimates and indicators, such as efficient, available, reliable and adequate information on enclosing rock mass properties and state, compliance with the requirements of normative documents, geomechanical risks rates by the factors of breakdown, accident and environmental hazard factors, potential damage from risk aftermath, financial receipts and expenses which include dominant functions of potential damage and monitoring effectiveness.

Methodology. Research has been carried out based on the simulation builder, basic software aimed at design, checkout and probation of new integrated deterministically stochastic models of geomechanical events. The models fulfill research, training and demonstration functions, reserve modeling process and output, simulation errors and drawbacks elimination by Monte Carlo method. The main feature of the builder is the availability of interconnected components, determination and simulation. Such complex provides the researcher with important complementary information: deterministic method fulfills safety functions and determines analysis results non-contradiction to the requirements of normative documentation; probabilistic method ensures objective evaluation of geomechanical risks or safe features with the possibility to obtain clear effectiveness by the factors of economic and social security, eliminates or significantly reduces the probability of unnecessary expenses. The universality of the approach to creating information technologies of geomechanical solutions simulation which implement the deterministic simulation complex based on the methods of nonparametric statistics is confirmed by the instances of simulation in multivariate statement.

The scope of the investigation includes mine engineering structures of construction, open, integrated technologies of mining enterprises and specific underground development targets in various sectors of national economy.

Summary. Information technologies of geomechanical events simulation based on the complex of deterministic and simulation methods and the procedures of nonparametric microstatistics make decisive contribution in the system of assessment and ensuring the quality of geomechanical solutions. The universality of IT development is noted together with their availability for a wide range of users, their simplicity and implementation efficiency.

Key words: information technologies; deterministic simulation modeling; nonparametric statistics; quality; geomechanical solutions; simulation builder; generation; random numbers; risk; criteria.

REFERENCES

1. Arkhipov A. *Research into the causes of catastrophe at the Mir mine*, 4 August 2017. St. Petersburg: Politekhnik Publishing; 2019. (In Russ.)
2. Polovov B. D., Volkov M. N. Simulation geomechanics. *Izvestiya Uralskoi gosudarstvennoi gornogo-logicheskoi akademii = Proceedings of Ural State Mining and Geological Academy*. 2002; 14: 107–123. (In Russ.)
3. Volkov M. N., Polovov B. D., Romanov D. A. Nonparametric estimate of physical and technical properties of soils at the stage of design. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). Stroitelnaia geotekhnologiya = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Construction Geotechnology*. 2010; Fascicle 6: 112–123. (In Russ.)
4. Polovov B. D., Volkov M. N., Mikhailov D. V., Romanov D. A., Tokarev P. K., Kharchenko D. I. Geomechanical analysis of mining facilities: points of growth. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 7: 40–50. (In Russ.)
5. Polovov B. D., Valiev N. G. *Geomechanical analysis of mine technical facilities based on the methods of nonparametric statistics*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2015. (In Russ.)
6. Falin G. I. *Monte Carlo method in a theory of risk*. Available from: www.math/msu.su.htm [Accessed 23 November 2016]. (In Russ.)
7. Gilvanova G. A. Innovative project risk analysis by the method of simulation modeling (Monte Carlo method). In: *Satbayev University conference proceedings*. 2015; 12(34): 157–161. (In Russ.)
8. Vlasov M. V. *Simulation modeling*. Novocherkassk: SRSPUU (NPI) Publishing; 2016. (In Russ.)

9. Vasily V. Simoviev, Aleksey N. Starodubov, Mixail U. Dorofeev, Victor V. Okolnishkov. Simulation Application for evaluation of efficiency of mining systems automatization. *WSEAS Transactions on Systems*. 2015; 14 (24): 261–267.

10. Kravchuk S. V., Starodubov F. R. Developing the system of stoping simulation modeling. In: *Young Russia: proceedings of the 9th All-Russian sci.-pract. conf. with international participation, 18–21 April 2017*. Kemerovo: 2017. p. 1–5. (In Russ.)

11. *Nornikel has created a system of simulation modeling for mine planning*. Available from: lenta.ru/articles/2019/10/10/nornikel [Accessed 22 November 2019]. (In Russ.)

12. Discrete event simulation software. Available from: www.arenasimulation.com [Accessed 22 November 2019].

13. *Simulink*. Available from: <https://matlab.ru/produtsimulink> [Accessed 22 November 2019].

14. *Why Anylogic?* Available from: <https://www.anylogic.ru/features> [Accessed 22 November 2019].

Received 26 December 2019

Information about authors:

Maksim N. Volkov – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Mining Technology Faculty, Ural State Mining University. E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru

Boris D. Polovov – DSc (Engineering), Professor, Ural State Mining University. E-mail: boris.polovov.37@yandex.ru

Dmitrii V. Prishchepa – assistant lecturer, Department of Shaft Construction, Ural State Mining University. E-mail: dmitriy.prishchepa@m.ursmu.ru

Для цитирования: Волков М. Н., Половов Б. Д., Прищепа Д. В. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 40–53. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

For citation: Volkov M. N., Polovov B. D., Prishchepa D. V. Information technologies of geomechanical events integrated simulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 40–53 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53