

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫБОРА МОДЕЛЕЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРНО-ВЫЕМОЧНЫХ РАБОТ

А.В. Затонский<sup>1</sup>, П.А. Язев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники, Россия,

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

Обозначена важность планирования добычи для улучшения показателей эффективности горнодобывающего предприятия. Показана возможность использования имитационного моделирования для этой цели. Показано, что созданная модель имеет большое количество стохастических параметров. Исследовано, что существует проблема отсутствия исследований влияния выбора различных статистических распределений на результаты моделирования горных работ. Известно, что при увеличении стохастических отклонений от заданных параметров производительность систем массового обслуживания падает. **Цель исследования:** исследование влияния четырех статистических распределений случайной величины (равномерное, нормальное, отрицательное биномиальное и распределение Пуассона) для отдельных операций и их комбинаций. Кроме того, нужно определить, насколько сильно изменение одного конкретного параметра повлияет на общий результат работы модели. **Материалы и методы.** В созданную ранее имитационную модель ко времени отдельных операций добавляется стохастическая задержка. Исследуется добавление такой задержки с разным статистическим распределением, но с одинаковым математическим ожиданием. Результаты моделирования сравниваются между собой, для каждой отдельной операции показывается абсолютное и относительное отклонение результатов. Далее производится аналогичное моделирование при изменении всех выбранных параметров одновременно. **Результат.** Показано, что величина отклонения значительно различается между собой для всех отклонений. Для различных единичных изменений операций наибольшее и наименьшее отклонение могут дать разные статистические распределения. Для исследования совместного изменения всех параметров реализуются 3 сценария моделирования: все равномерные распределения (этот случай используется сейчас), сценарий с наименьшим отклонением и сценарий с наибольшим отклонением. Показано значительное изменение результатов моделирования при переходе к другому сценарию. **Заключение.** Делается вывод, что показано значительное влияние выбора использованных статистических распределений на точность моделирования работы комбайна, особенно при их совместном учете. Полученные результаты могут использоваться для уточнения влияния отдельных факторов в имитационной модели и улучшения планирования калийных горно-выемочных работ, в том числе для отдельных комбайнов.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, стохастическая модель, калийная руда, горно-выемочные работы, статистическое распределение, равномерное распределение, нормальное распределение, распределение Пуассона, отрицательное биномиальное распределение.

## Введение

Калийные удобрения имеют важное значение для мирового сельского хозяйства. На территории России добыча калийной руды выполняется компаниями АО «МХК «ЕвроХим» и ПАО «Уралкалий» на территории Верхнекамского месторождения. Важность калийных удобрений для мировой экономики показывает, в частности, тот факт, что эта отрасль ощутила на себе меньшие потери, чем другие добывающие отрасли, особенно нефтегазовая [1]. Планирование добычи является важной составляющей работы любого предприятия. Для уточнения планов добычи может быть использовано имитационное моделирование [2, 3], предлагаемая имитационная модель была описана ранее.

### Материалы и методы

Модель оснащена регламентными либо предельными временами технологических операций [4]. В реальности же все эти параметры имеют стохастический характер. При увеличении стохастических отклонений от заданных параметров результат имитационного моделирования значительно меняется [5, 6]. В созданной нами системе [7] определяется большое количество обусловленных человеческим фактором стохастических параметров, статистические распределения которых неизвестны и не могут быть определены из наблюдений. Описанные имитационные модели горной добычи [8–13] указывают на наличие таких случайных факторов, но либо используемое в них распределение не указывается, либо используется только одно распределение для всех параметров (чаще всего нормальное). Таким образом, ставится задача исследования влияния четырех выбранных статистических распределений случайных величин на результаты моделирования горно-выемочных работ. Для проведения эксперимента были выбраны 4 технологические операции комбайна, занимающие вместе с регламентированными остановками работы около 80 % времени работы комбайна в модели. Остальные 20 % времени приходятся на различные короткие остановки работы комбайна для вентиляционного бурения, переноса маркшейдерских точек и т. д. Для всех операций исследовались 4 статистических распределения: равномерное, нормальное, распределение Пуассона и отрицательное биномиальное распределение.

Имитационное моделирование производилось с добавлением стохастической задержки с одинаковым математическим ожиданием, но с разными статистическими распределениями последовательно к длительности одной технологической операции, в последнем эксперименте – к длительности всех выбранных технологических операций. В реальности математическое ожидание задержки также неизвестно, поэтому для проведения эксперимента оно было выбрано достаточно большим (30–50 % времени соответствующей операции). Ранее было показано, что разница между разными статистическими распределениями в модели значительно увеличивается по мере роста математического ожидания задержки [14].

### Результат и обсуждение

Для проведения эксперимента в существующей модели время основного состояния «Отбойка руды» было увеличено на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 3. Результат моделирования представлен на рис. 1.

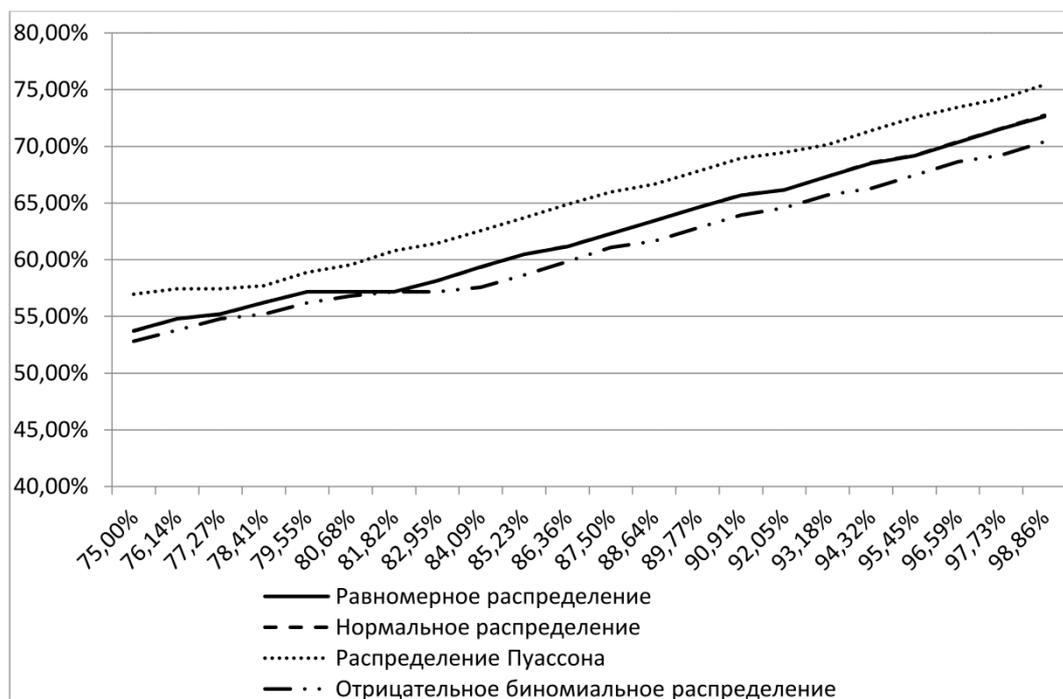


Рис. 1. Изменения параметра «отбойка руды»

Fig. 1. "Ore breaking" parameter changes

## Автоматизированные системы управления...

Как видно из графика, результаты моделирования для нормального и равномерного распределений очень близки, а для распределения Пуассона и отрицательного биномиального разница значительная. Эта разница увеличивается со временем, достигая значения 5 % в абсолютных значениях к концу моделирования длительностью 1 месяц. Другой технологической операцией, занимающей большой процент времени работы моделируемой системы, является отгрузка руды из бункера-перегрузателя комбайна на самоходный вагон. Для эксперимента эта величина была увеличена на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 2 минутам. Результат моделирования представлен на рис. 2.

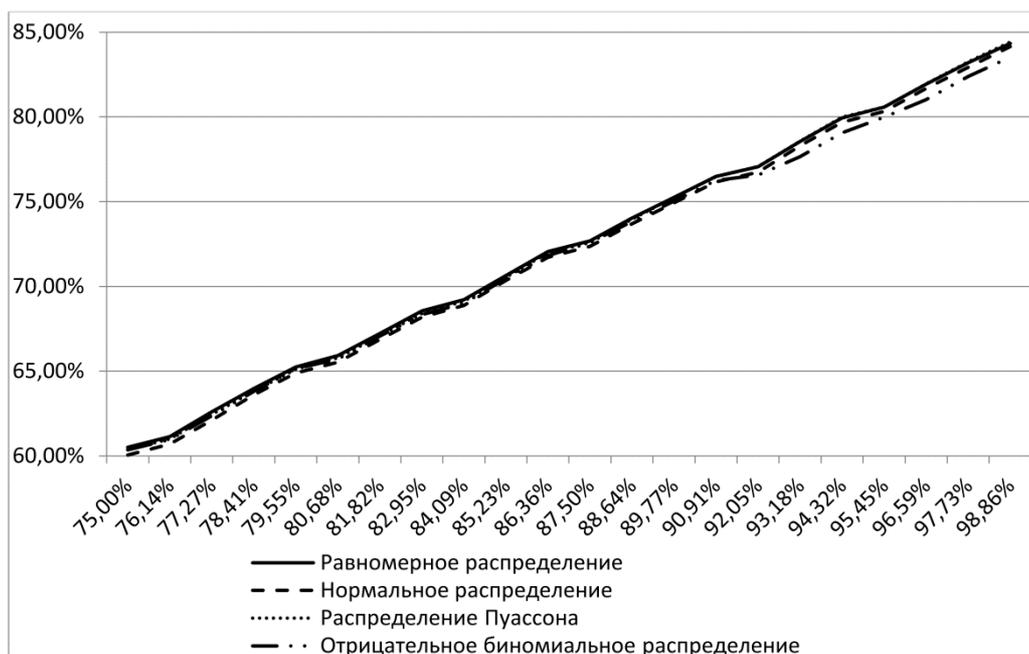


Рис. 2. Изменение параметра «Перегрузка руда»  
Fig. 2. “Ore loading” parameter changes

Для данной технологической операции выбор статистического распределения менее важен, чем для предыдущей, так как в данном случае все значения выработки ближе друг к другу, общая разница выработки не превышает 2 % в абсолютных значениях на диапазоне в 1 месяц, хотя и в этом случае отрицательное биномиальное распределение показывает наименьшее значение выработки.

Другим важным типом технологической операции является операция, наступающая редко, но занимающая длительное время. Наиболее значимой такой операцией для исследования влияния выбора статистического распределения является отгон комбайна – выполняется 1 раз для каждой проходки камеры, но общее время в работе модели составляет до 10 %. Данный параметр для экспериментов был увеличен на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным 5 часам. Результат моделирования представлен на рис. 3.

Изменение статистического распределения для технологической операции «Отгон» более важно, чем для предыдущей, однако в данном случае мы наблюдаем другую картину: абсолютная разница в объеме выработки может значительно колебаться от 1 до 10 %, что объяснимо для данной операции: за время отбойки одной камеры комбайн всегда добывает одно и то же количество руды, различается только время между отбойками камеры, различие в котором нарастает со временем. Ещё одной технологической операцией, время выполнения которой может значительно влиять на общий объем выработки, является выполнение длительного планового или внепланового ремонта [15]. Хотя для этой операции статистическое распределение должно соответствовать распределению Пуассона, в существующей модели для предприятия используется равномерное распределение, и мы должны понять, насколько это влияет на результат моделирования. Данный параметр для экспериментов был увеличен на значение стохастической задержки с математическим ожиданием, равным половине времени выполнения самого ремонта. Результат моделирования представлен на рис. 4.

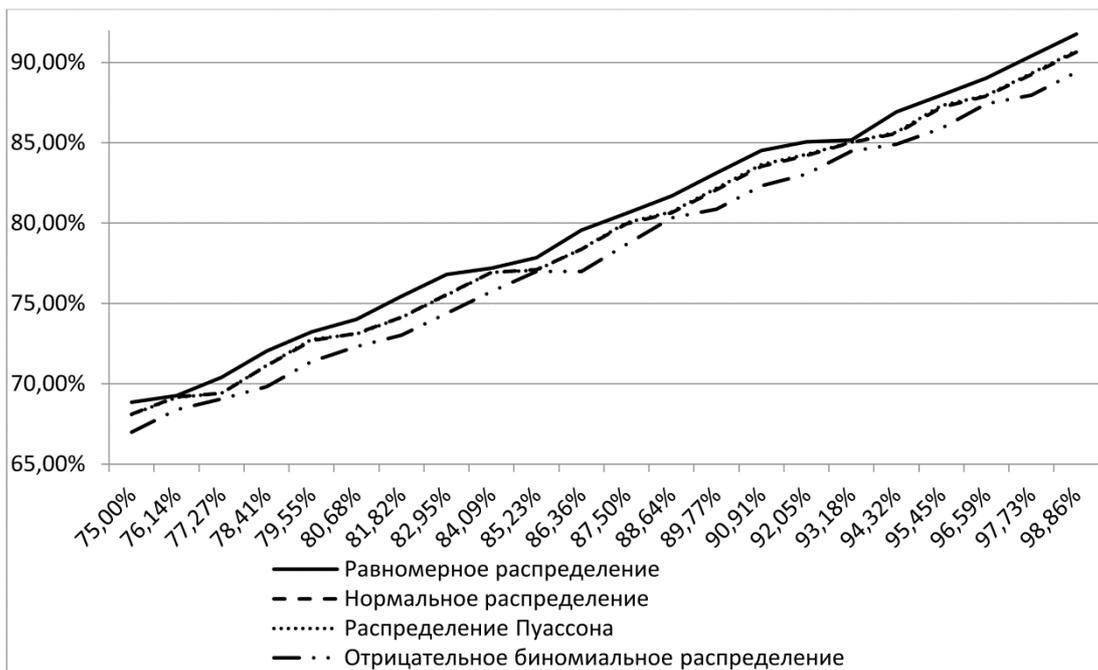


Рис. 3. Изменение параметра «Огон»  
Fig. 3. “Mining machine passage” parameter changes

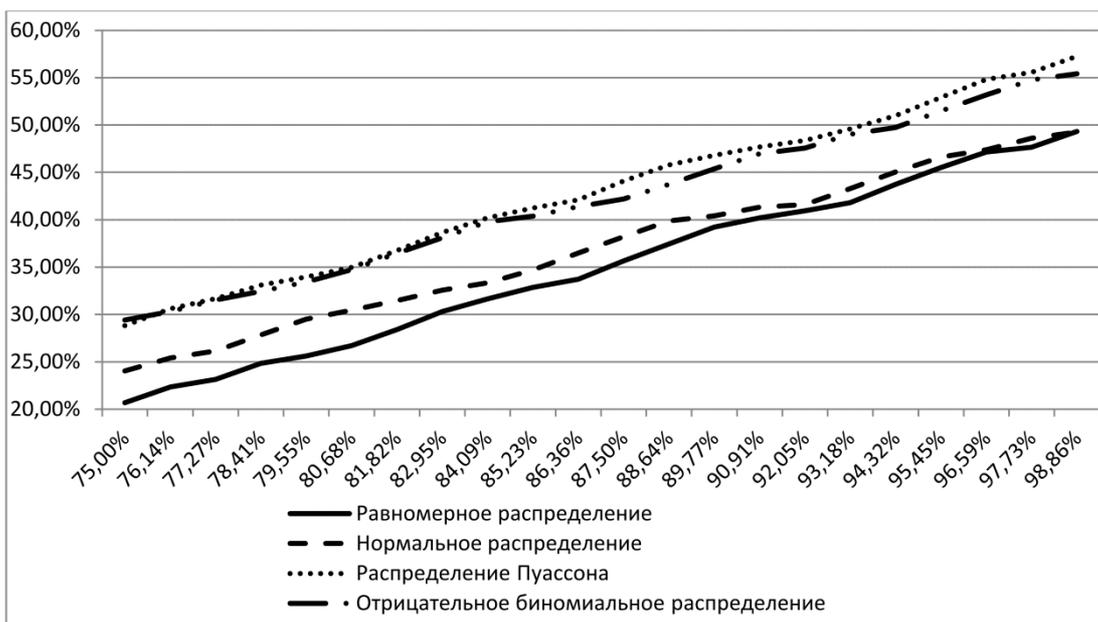


Рис. 4. Изменение параметра «Время выполнения ремонта»  
Fig. 4. “Maintenance time” parameter changes

Отклонение для распределения Пуассона для данной операции оказывается наименьшим, а для равномерного – наибольшим. Таким образом, неверный выбор распределения для одной только этой операции может дать погрешность при моделировании в абсолютном объеме выработки до 10 % за 1 месяц.

На основе всех полученных распределений для четырех вышеописанных операций была определена относительная степень влияния выбора того или иного распределения для каждой операции. Результаты моделирования представлены в таблице.

## Автоматизированные системы управления...

Относительное отклонение результатов моделирования, %  
Relative deviation of simulation results, %

	Равномерное	Нормальное	Отрицательное биномиальное	Пуассон
Отбойка	12,58	11,94	21,85	–
Отгрузка	1,01	2,28	4,44	–
Отгон	–	14,29	31,27	12,94
Выполнение ремонта	17,39	15,35	1,77	0,00

Как видно из таблицы и графиков, хотя абсолютное значение разницы между статистическими распределениями для одной технологической операции могут быть не очень большими, в относительных цифрах разница может колебаться от 1 до 31,3 % в зависимости от характера технологической операции.

По требованию заказчика для эксплуатации модели в реальном производстве все случайные величины должны иметь равномерное распределение. Чтобы определить, насколько сильно такое допущение может влиять на результаты выработки, проверим работу модели для комбинации из всех четырёх вышеописанных операций для следующих случаев:

- 1) равномерное распределение для всех операций;
- 2) для каждой операции такое распределение, при котором отклонение результата является наименьшим;
- 3) для каждой операции такое распределение, при котором отклонение результата является наибольшим.

Результат моделирования представлен на рис. 5.

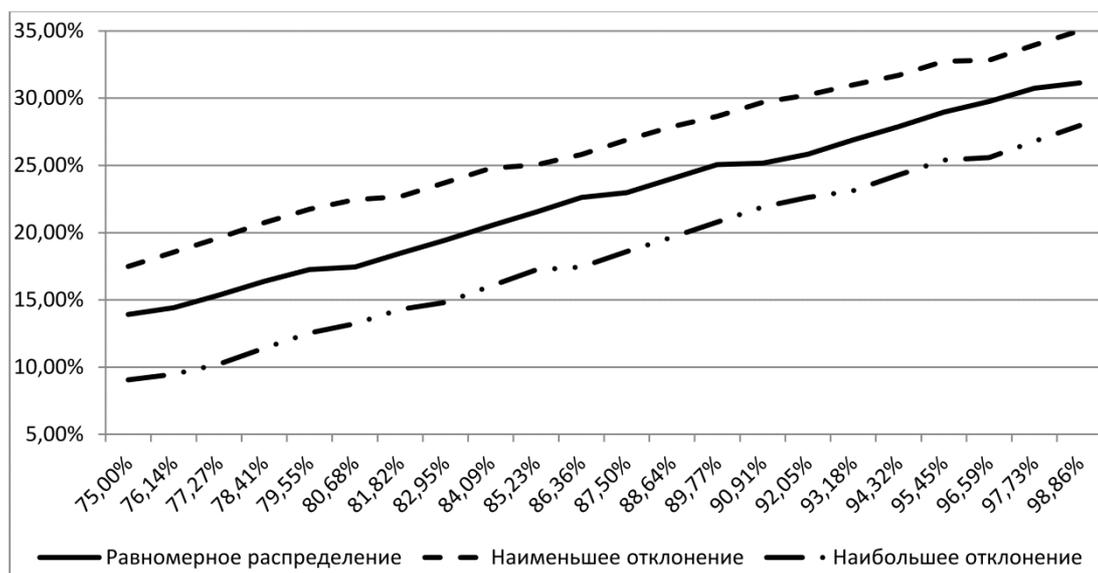


Рис. 5. Общий результат моделирования  
Fig. 5. Overall simulation result

Полученные данные общего моделирования подтверждают результаты отдельных экспериментов – общий результат работы модели значительно меняется при различном выборе статистических распределений. Выбор по умолчанию – все равномерные распределения – оказывается ровно между наибольшим и наименьшим отклонением с разницей около 10 % абсолютного объема выработки.

### Выводы

Таким образом, исследование показало значительное влияние выбора использованных статистических распределений отдельных параметров на точность моделирования работы комбайна и,

как следствие, на точность составления плана добычи калийной руды. Полученные результаты могут использоваться для уточнения влияния отдельных факторов в имитационной модели и, следовательно, для улучшения планирования калийных горно-выемочных работ. Степень влияния выбора распределения может различаться в зависимости от типа технологической операции, однако для общего результата предполагаемое к использованию на данный момент равномерное распределение дает усредненный результат, по которому можно составить прогноз общей добычи рудника на некоторый период времени, но крайне сложно составить план работы для каждого отдельного комбайна.

### Литература

1. Еврохим. Финансовые результаты по МСФО за 2020 год. – <https://www.eurochemgroup.com/ru/media-announcements/finansovyye-rezultaty-po-msfo-za-2020-god/> (дата обращения: 17.05.2021).
2. Morales, N. Incorporation of geometallurgical attributes and geological uncertainty into long-term open-pit mine planning / N. Morales, S. Seguel, A. Cáceres et al. // *Minerals*. – 2019. – Vol. 9, iss. 2, pap. 108. DOI: 10.3390/min9020108
3. Шек, В.М. Использование имитационного моделирования для оптимизации проведения горных работ / В.М. Шек, М.Ю. Соболева // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 10. – С. 201–205.
4. Zatonkiy, A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes / A.V. Zatonkiy // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 60–67. DOI: 10.14529/ctcr190306
5. Соловьев, В.А. Разработка калийных месторождений: практикум / В.А. Соловьев, А.И. Секунцов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
6. Затонский, А.В. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов / А.В. Затонский, В.Н. Уфимцева // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2018. – № 4. – С. 56–62.
7. Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ / С.А. Варламова, Ю.И. Володина, А.В. Затонский, П.А. Язев // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 10. – С. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-100-214-222
8. Голодов, М.А. Обоснование параметров короткозабойных технологий отработки околоствольных целиков с закладкой выработанных пространств: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск: Шахтинский университет (филиал ЮРГПУ (НПИ)), 2009. – 227 с.
9. Разработка имитационной модели шагающей крепи с интеграцией алгоритмов управления для визуализации технологических процессов / М.С. Никитенко, С.С. Журавлев, Ю.В. Малахов, Н.В. Абабков // *Вестник КузГТУ*. – 2019. – №1. – С. 49–58.
10. Непша, Ф.С. Методология имитационного компьютерного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / Ф.С. Непша, В.А. Воронин, А.Н. Ермаков // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2020. – № 6 (152). – С. 59–67.
11. Okolnishnikov, V.V. Modelling of Longwall Coal Mining // 2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE). – Madrid, Spain, 2020. – P. 202–208. DOI: 10.1109/MACISE49704.2020.00044
12. Matamoro, M.E.V. Stochastic short-term mine production schedule accounting for fleet allocation, operational considerations and blending restrictions / M.E.V. Matamoro, R. Dimitrakopoulos // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – Vol. 255. – P. 911–921.
13. Применение имитационного моделирования для оценки вариантов отработки выемочного блока короткими забоями / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев, И.С. Кузнецов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 48. – С. 181–193. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-181-193
14. Язев, П.А. Использование статистических распределений случайной величины при моделировании горно-выемочных работ / П.А. Язев, О.Н. Лапаев // *Молодежная наука в развитии регионов*. – 2020. – С. 30–32.
15. Кузнецов, И.С. Исследование влияния внеплановых простоев горных машин на добычу угля открыто-подземным способом методом имитационного моделирования / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // *Уголь*. – 2020. – № 9. – С. 10–13. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-10-13

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru).

**Язев Павел Александрович**, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; [yazev1988@gmail.com](mailto:yazev1988@gmail.com).

*Поступила в редакцию 18 мая 2021 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210313

## INVESTIGATION OF THE RANDOM VALUE STATISTICAL DISTRIBUTIONS MODELS CHOICE INFLUENCE ON THE MINING OPERATIONS MODELING RESULTS

**A.V. Zatonskiy**<sup>1</sup>, [z Xenon@narod.ru](mailto:z Xenon@narod.ru),  
**P.A. Yazev**<sup>2</sup>, [yazev1988@gmail.com](mailto:yazev1988@gmail.com)

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation,

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

The importance of production planning for improving the performance indicators of a mining enterprise is indicated. The possibility of simulation modeling using for this aim is shown. It is shown that the created model has a large number of stochastic parameters. It is investigated that there is a problem of research lack about the choice influence of the mining modeling results with different statistical distributions. It is known that with an increase in stochastic deviations from the initial parameters, the productivity of queuing systems decreases. **Purpose of work** is to study this influence with four statistical distributions of a random quantity (uniform, normal, negative binomial and Poisson distribution) for individual operations and their combinations. In addition, it is necessary to determine how much a change in one particular parameter will affect the overall result of the modeling. **Materials and methods.** In the previously created simulation model, a stochastic delay is added to the time of individual operations. The addition of such a delay with different statistical distributions and with the same mathematical expectation is investigated. The simulation results are compared with each other, for each individual operation the absolute and relative deviation of the results is shown. Further, a similar simulation is performed when all the simultaneously selected parameters changing. **Result.** It is shown that the magnitude of the deviation significantly differs among all deviations. It is shown that for various single changes in operations, the largest and smallest deviations can be given by different statistical distributions. To study the joint change with all parameters, 3 modeling scenarios are implemented: all uniform distributions (this case is used now), the scenario with the smallest deviation and the scenario with the largest deviation. It is shown that switching to another scenario leads to a significant change in the simulation. **Conclusion.** It is concluded that the used significant influence of statistical distributions choice to the accuracy of modeling the operation of the mining machine is shown, especially when they are taken into account together. The results can be used to clarify the influence of individual factors in the simulation model and improve the planning of potash mining operations, for individual mining machines too.

*Keywords: simulation modeling, stochastic model, potash ore, mining operations, statistical distribution, uniform distribution, normal distribution, Poisson distribution, negative binomial distribution.*

### References

1. *Evrohim. Finansovye Rezul'taty po MSFO za 2020 god* [Eurochem. 2020 Year IFRS Financial Results] Available at: <https://www.eurochemgroup.com/ru/media-announcements/finansovye-rezultaty-po-msfo-za-2020-god/> (accessed 17.05.2021).

2. Morales N., Seguel S., Cáceres A., Jélvez E., Alarcón M. Incorporation of Geometallurgical Attributes and Geological Uncertainty into Long-term Open-pit Mine Planning. *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 2, pap. 108, DOI: 10.3390/min9020108
3. Shek V.M., Soboleva M.Yu. [Using Simulation to Optimize Mining Operations] *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten'* [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2005, no. 10, pp. 201–205. (in Russ.)
4. Zatonskiy A.V. Verification of Kolmogorov Equation Usability for Reproduction and Death Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 60–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190306
5. Solov'ev V.A., Sekuncov A.I. *Razrabotka kaliynnykh mestorozhdeniy: praktikum* [Development of Potash Deposits: Practicum]. Perm, PNRSTU Publ., 2013. 265 p.
6. Zatonskiy A.V., Ufimtseva V.N. [Development of Object Tools for Simulation and Multi-Agent Modeling of Production Processes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*, 2018, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.)
7. Varlamova S.A., Volodina Yu.I., Zatonskiy A.V., Yazev P.A. [Simulation Model for Planning Mining Operations]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [MIAB. Mining Information and Analytical Bulletin], 2019, no. 10, pp. 214–222. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222. (in Russ.)
8. Golodov M.A. *Obosnovaniye parametrov korotkozaboynykh tekhnologiy otrabotki okolostvol'nykh tselikov s zakladkoy vyrabotannykh prostranstv: dis. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of the Parameters of Short-term Technologies for Mining Near-wellbore Pillars with Backfilling of Mined-out Spaces. Cand. sci. diss.]. Novocherkassk, 2009. 227 p.
9. Nikitenko M.S., Zhuravlev S.S., Malakhov Yu.V., Ababkov N.V. [Development of a Simulation Model of the Walking Roof Support with Integrated Control Algorithms for Visualizing Mining Processes] *Vestnik KuzGTU*, 2019, no. 1, pp. 49–58. (in Russ.)
10. Nepsha F.S., Voronin V.A., Ermakov A.N. [Methodology of Simulation Computer Modeling of the Power Sup-Ply System of the Coal Mine Extraction Area]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2020, no. 6 (152), pp. 59–67. (in Russ.)
11. Okolnishnikov V.V. Modelling of Longwall Coal Mining. *2020 International Conference on Mathematics and Computers in Science and Engineering (MACISE)*. Madrid, Spain, 2020, pp. 202–208. DOI: 10.1109/MACISE49704.2020.00044
12. Matamoro M.E.V., Dimitrakopoulos R. Stochastic Short-Term Mine Production Schedule Accounting for Fleet Allocation, Operational Considerations and Blending Restrictions. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 255, pp. 911–921.
13. Zinov'ev V.V., Starodubov A.N., Nikolaev P.I., Kuznetsov I.S. [Simulation Use for Evaluation of Working Block Mining Variants in Pillar Mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2018, no. 48, pp. 181–193. (in Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-181-193
14. Yazev P.A., Lapaev O.N. [The use of statistical distributions of a random variable in modeling mining operations] *Molodezhnaya nauka v razvitii regionov* [Youth science in the development of regions], 2020, pp. 30–32 (in Russ.)
15. Kuznetsov I.S., Zinov'ev V.V., Starodubov A.N. [Investigation of the influence of unscheduled downtime of mining machines on coal mining by open-underground method using the method of simulation modeling]. *Ugol'* [Coal], 2020, no. 9, pp. 10–13. (in Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2020-9-10-13.

Received 18 May 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Затонский, А.В. Исследование влияния выбора моделей статистических распределений случайной величины на результаты моделирования горно-выемочных работ / А.В. Затонский, П.А. Язев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 130–137. DOI: 10.14529/ctcr210313

#### FOR CITATION

Zatonskiy A.V., Yazev P.A. Investigation of the Random Value Statistical Distributions Models Choice Influence on the Mining Operations Modeling Results. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 130–137. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210313