

УДК 622.333

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ
ГЕОТЕХНОЛОГИЙ БЕЗ ПОСТОЯННОГО ПРИСУТСТВИЯ ЛЮДЕЙ В ЗАБОЯХ**

METHODIC OF RATIONALE OF UNDERGROUND ROBOTIC GEOTECHNOLOGIES WITHOUT PERMANENT HUMAN PRESENCE IN MINE FACE

Николаев Петр Игоревич^{1,2},
аспирант, email: mrnikolaev@mail.ru

Nikolaev Petr I.^{1,2},
post-graduate student

Зиновьев Василий Валентинович^{1,2}
канд. техн. наук, e-mail: zv150671@gmail.com

Sinoviev Vasily V.^{1,2},
Ph.D.

¹Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 18

¹Institute of Coal FRC CCC SB RAS

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: В статье предложена методика моделирования и научного обоснования подземных геотехнологий без постоянного присутствия людей в забоях для обеспечения эффективной и безопасной разработки угольных месторождений в разнообразных горнотехнических и горно-геологических условиях. Методика состоит из четырёх этапов. 1) Декомпозиция традиционных геотехнологий на элементарные операции, взаимосвязь которых представляется диаграммой в стандарте IDEF0, и оценка подготовленности их операций к роботизации. 2) Формирование множества M предложений по роботизации геотехнологии. 3) Формирование на его основе вариантов комплектов роботизированного оборудования. 4) Выбор оптимального варианта комплекта методами эволюционного алгоритма и имитационного моделирования по комплексному критерию оптимизации, основанном на времени нахождения человека в зоне забоя, производительности геотехнологии и сложности роботизации.

Abstract: The article contains the methodic of simulation and scientific rationale of underground geotechnologies without permanent human presence in mine face for efficient and safe coal mining in various rock and mining conditions. Methodic contains four stages. 1) Conventional geotechnologies decomposition to elementary operations, interrelation of which is represented in IDEF0-diagram, and evaluation of operations readiness for robotization. 2) Formation of geotechnologies robotization supplies set M . 3) Formation a tuples of robotization supplies. 4) Tuple choose optimization based on simulation and evolutionary algorithm, working on complex criterion of time of human presence in mine face, geotechnology efficient and robotization difficulty.

Ключевые слова: геотехнология, роботизация, имитационное моделирование, методика, эволюционный алгоритм, IDEF0.

Keywords: geotechnology, robotization, simulation, methodic, evolutionary algorithm, IDEF0.

В Кузнецком угольном бассейне добывается 56% каменных и 80% коксующихся углей от всей добычи угля в России. Вместе с тем удельный вес гибели людей и травматизма в шахтах составляет в среднем 55% всех несчастных случаев в области, из которых каждый 80-ый – смертельный [1]. Большинство внезапных выбросов угля и газа, пожаров, обрушений кровли и прочих аварийных ситуаций приходится на призабойные части подземных выработок.

В Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года

[2] отмечено, что уровень смертельного травматизма, который с 2008 года по 2012 снизился с 0,19 до 0,15 чел. на 1 млн. тонн добычи угля, по-прежнему остаётся высоким. Указывается, что при подземной добыче угля увеличивается доля выработок в неблагоприятных горно-геологических условиях. Программа предусматривает разработку технологий, обеспечивающих улучшение условий труда, повышение безопасности ведения горных работ, снижение аварийности и травматизма в угольной промышленности. Актуальным является обоснование подземных геотехнологий без посто-

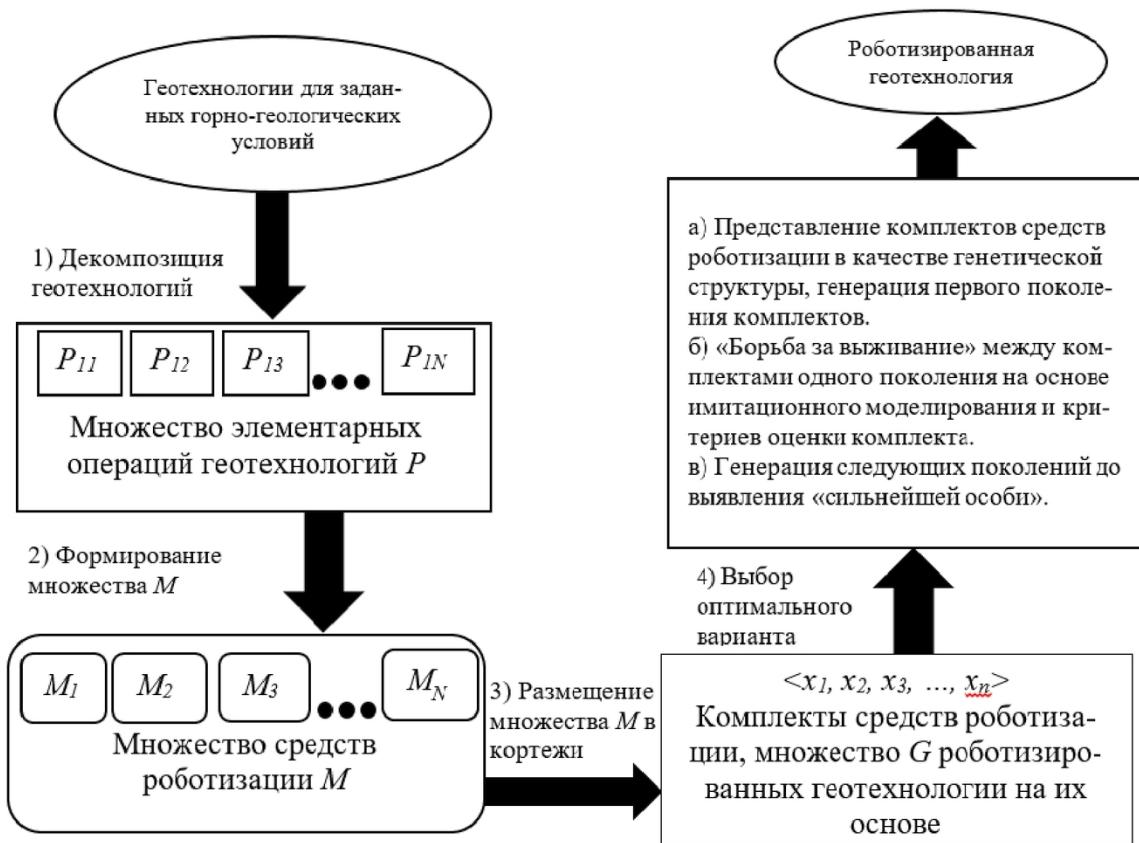


Рис. 1. Этапы методики обоснования геотехнологии без постоянного присутствия людей в забоях

янного присутствия людей в забое.

Исключить работу человека в призабойной части подземной выработки при сохранении текущего уровня добычи возможно при помощи роботизации выполняемых человеком операций. В работах [3-8] обоснована необходимость оценки подготовленности исходной геотехнологии к роботизации перед её модификацией. В [9-13] предлагается использование имитационного подхода для моделирования и анализа различных технико-организационных вариантов (в том числе роботизированных) геотехнологий и обоснования лучшего решения.

Используя накопленный опыт, разработана методика, включающая четыре этапа, позволяющая проводить многовариантную оценку характеристик роботизированных геотехнологий для заданных горно-геологических условий на основе имитационного моделирования и выбирать оптимальный вариант (рис. 1):

Первый этап – декомпозиция геотехнологий для заданных горно-геологических условий на элементарные операции в стандарте IDEF0 и оценка их подготовленности к роботизации.

Второй этап – формирование множества M предложений по роботизации операций геотехнологий путём отображения множества операций P в множество роботизирующих их предложений M .

Третий этап – формирование множества ком-

плектов средств роботизации операций геотехнологий с помощью размещения множества M в кортежи, и на их основе множества G роботизированных геотехнологий.

Четвёртый этап – выбор оптимального варианта роботизированной геотехнологии из полученного множества G с помощью комплексного критерия времени нахождения человека в зоне забоя, производительности комплекта роботизации и сложности роботизации технологических операций.

Исходными данными для разработки эффективной роботизированной геотехнологии, позволяющей вывести людей из зоны забоя, являются традиционные геотехнологии, используемые в заданных горно-геологических условиях. Так как роботизация применяется не к геотехнологиям в целом, а к отдельным их операциям, то первоочередной задачей становится нахождение таких операций путём декомпозиции основных процессов геотехнологий (таких, как разрушение горного массива, крепление выработки, наращивание коммуникаций) до элементарного уровня (наведение бурильной головки на цель, сканирование окружающей местности, распознавание объектов в шахте). При декомпозиции процессов горных работ рационально использовать стандарт IDEF0 в рамках системно-функционального подхода [14]. Правильное использование стандарта позволит

избежать неточностей при декомпозиции и уменьшить субъективный фактор, свойственный

M_n , которое может быть пустым (операция сложно роботизируется), состоять из одного элемента

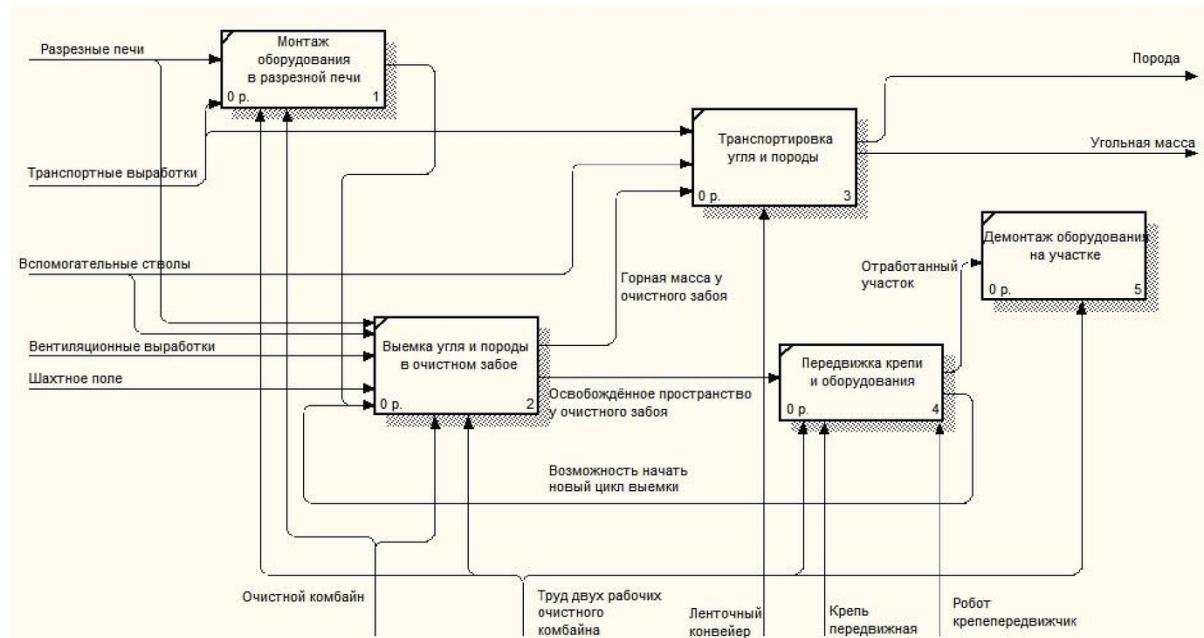


Рис. 2. Декомпозиция процессов геотехнологии при помощи стандарта IDEF0

декомпозиции как эвристическому процессу. В результате использования стандарта IDEF0 получается комплексная графическая модель, отображающая каждый уровень декомпозиции процессов геотехнологии (рис. 2). Процессы, не подвергнутые декомпозиции, составляют множество простейших операций геотехнологии P .

После нахождения множества P проводится оценка подготовленности операций геотехнологии к роботизации. По аналогии с машиностроением операции в горном деле были классифицированы по сложности роботизации [3] в зависимости от необходимости обзора оператором, преобладания манипуляций, требующих высокой точности исполнения и так далее. По этой классификации каждой операции присваивается уровень сложности роботизации, в дальнейшем влияющий на выбор роботизированной геотехнологии.

На следующем этапе для каждой операции выполняется поиск средств его роботизации. По завершении поиска каждый элемент множества операций P многозначно отображается в подмножество предложений по роботизации операции

(операция роботизируется только одним способом x_1) и многоэлементным (операция роботизируется множеством способов x_1, x_2, \dots, x_k , где k – число готовых предложений по роботизации на одну операцию). Полученные подмножества M_1, M_2, \dots, M_n образуют множество готовых предложений по роботизации M (рис. 3).

Число составляющих множество M подмножеств n определяется как мощность множества простейших процессов исходных геотехнологий $|P|$.

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}, \text{ где } n = |P|$$

Найденное множество готовых предложений по роботизации M обеспечивает множество вариантов роботизации традиционных геотехнологий. Каждый вариант роботизации описывается как размещение длиной n из подмножеств M_1, M_2, \dots, M_n готовых предложений по роботизации $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, где $x_i \in M_i$ для $1 \leq i \leq n$. Такое размещение представляет собой комплект готовых предложений по роботизации одной традиционной технологии (рис. 4). Примером комплекта может быть следующий набор оборудования: <бурильная



Рис. 3. Процесс отображения множества операций исходных геотехнологий P в множество готовых предложений по роботизации этих операций M .

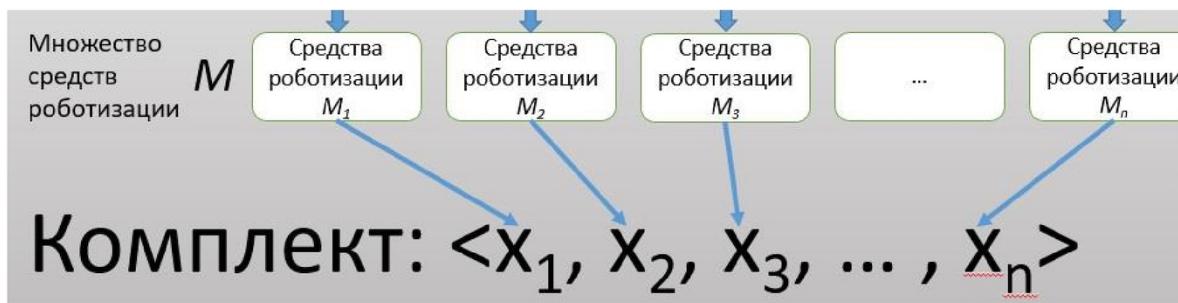


Рис. 4. Размещение элементов множеств M_1, M_2, \dots, M_n в комплект готовых предложений по роботизации геотехнологии.

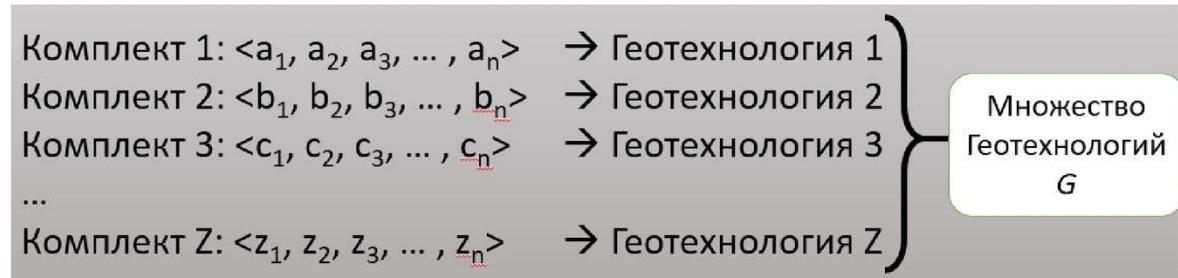


Рис. 5. Определение множества роботизированных геотехнологий G

машина, система наведения бурильной головки, система параллельного бурения, ..., ультразвуковая система ориентации робота-крепепередвижчика в пространстве».

Так как каждый комплект готовых предложений по роботизации $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ становится основой для роботизированной геотехнологии, то множество полученных комплектов определяет множество роботизированных геотехнологий G (рис. 5). Их число представляется как мощность множества G – произведение мощностей непустых подмножеств M_i :

$$|G| = \prod_{i=1}^n |M_i|,$$

где $|M_i| \neq 0$.

Для определения результирующей роботизированной геотехнологии необходимо сделать оптимальный или субоптимальный выбор из множества роботизированных геотехнологий G . В работе [15] обосновывается применение эвристических алгоритмов в области горного дела, в частности эволюционного генетического алгоритма (рис. 6). Каждая геотехнология представляется в виде Однако, получить аналитические зависимости для расчёта эффективности геотехнологии по комплексному критерию практически невозможно. Подходящим инструментом для их вычисления является имитационное моделирование, основанное на математическом аппарате систем массового обслуживания. Его использование позволяет учесть динамику взаимодействия горного оборудования, стохастическую природу процессов горного дела и оценить необходимые параметры геотехнологии [3, 9-11].

После оценки «особей» геотехнологий с помощью имитационного моделирования происходит селекция наиболее пригодных из них в следующее поколение. Возможной итерацией алгоритма является «мутация» - этап случайного изменения генома, кодирующего роботизированное оборудование, у малого числа особей. Этот шаг позволяет популяции выходить из локальных максимумов функции пригодности, в которых она может остановить своё развитие. После чего алгоритм повторяется со второй итерацией.

Остановка алгоритма происходит либо по достижению определённого числа итераций, либо при остановке роста пригодности популяции. Из последнего поколения «особей» геотехнологий производится выбор оптимальной или субоптимальной роботизированной геотехнологии по комплексному критерию отбора.

«Особи», генетический код которой содержит необходимые для рационализации параметры, в нашем случае – комплект используемых предложений по роботизации. На первой итерации алгоритма создаётся первичная популяция «особей» геотехнологий со случным геномом. На второй итерации производится «скрещивание особей» геотехнологий для получения «потомства» геотехнологий, наследующего родительские параметры. На третьей итерации родительские и потомственные геотехнологии ведут «борьбу за выживание» - идёт отбор лучших особей по функции пригодности особи к решаемой задаче. Пригодность роботизированной геотехнологии оценивается по взвешенному комплексному критерию скорости ведения проходочных и очистных работ, числу людей, находящихся в зоне забоя и сложно-

сти роботизации данной геотехнологии.

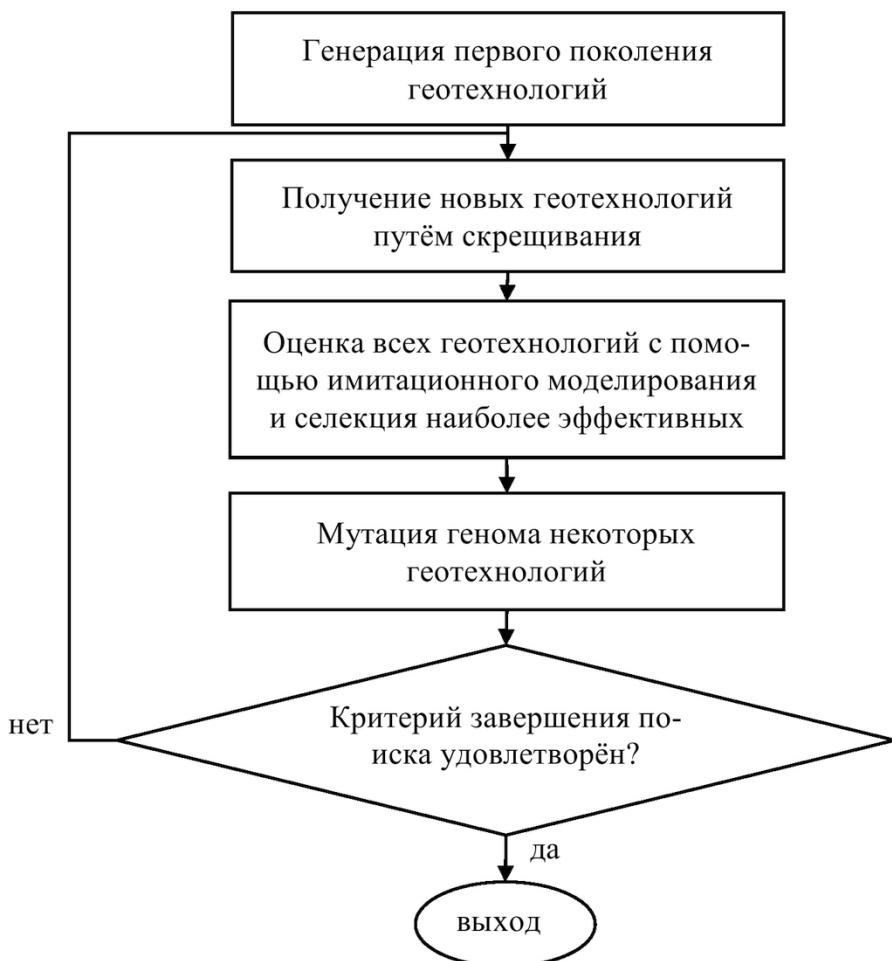


Рис. 6. Выбор оптимального варианта геотехнологии на основе эволюционного алгоритма.

Таким образом, представленная методика позволит на основе декомпозиции технологий разработки угольных месторождений на элементарные операции, оценки их с позиции роботизации, имитационного моделирования и оптимизации проводить научное обоснование подземных геотехнологий без постоянного присутствия людей в забоях для обеспечения эффективной и безопасной разработки угольных месторождений в разнообразных горнотехнических и горно-геологических

условиях.

Работа выполняется при поддержке РФФИ, проекты: № 16-47-420490 «Моделирование и обоснование технологий разработки угольных месторождений подземным и открыто-подземным способами без постоянного присутствия людей в забоях» (2016-2017 гг.), № 13-07-98023 «Разработка и моделирование безлюдных технологий подземной добычи твердых полезных ископаемых» (2013-2015 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорошилов, А.В. Основные причины травматизма на шахтах Кузбасса в конце XX - начале XXI вв. / А. В. Хорошилов, А. В. Тараканов // Вестник КемГУ. – 2010. – № 3 (43) – с. 215-218.
2. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. / Электрон. текст. дан. 2012. – Режим доступа: <http://minenegro.gov.ru/node/1846>, свободный - Дата обращения (15.04.2016).
3. Конюх, В. Л. Шахтная робототехника: монография [текст] / В. Л. Конюх // Кемерово: Кузбасс-связьиздат. – 2000. – 336 с.
4. Конюх В. Л. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем / В. Л. Конюх, О. В. Тайлаков. // Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991.

5. Konyukh V. L. Selection of driving technologies for robotization / V. Konyukh, V. Sinoviev, D. Sturgul // Proc. of the 7-th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection. - Canada: Calgary, 6-9 Okt. 1998.
6. Курлена М. В. Развитие технологий подземных горных работ / М. В. Курлена, В. И. Штеле, В. А. Шалауров. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985.
7. Конюх В. Л. Промышленная автоматизация в концепции рудника будущего // Горн. информационно-аналитический бюл. 2007. № 6. С. 39–44.
8. Конюх В. Л. Управление подземными погрузочно-транспортными машинами с поверхности / В. Л. Конюх, Р. А. Рамазанов // Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 4. С. 61–66.
9. Sinoviev V.V. Simulation Application for Evaluating of Efficiency of Mining Systems Automatization / V.V. Sinoviev, A. N. Starodubov, M. U. Dorofeev, V. V. Okolnishnikov // WSEAS Transactions on Systems, ISSN / E-ISSN: 1109-2777 / 2224-2678, Volume 14, 2015, Art. #24, pp. 261–267
10. Sinoviev V.V. Approach to effectiveness evaluation of robotics technology in mining using discrete event simulation / V. V. Sinoviev, V.V. Okolnishnikov, A.N. Starodubov, M.U. Dorofeev // International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, ISSN: 1998-0159, Volume 10, 2016, pp. 123-128.
11. Конюх, В.Л. Имитационное моделирование способов добычи полезных ископаемых на большой глубине / В. Л. Конюх, В. В. Окольнишников // Проблемы информатики. – 2009. – №3. – с. 54-61.
12. Нечепуренко М. И., Моделирование сложных технологических объектов управления / М. И. Нечепуренко, В. В. Окольнишников, Б. Н. Пищик // Сиб. журн. вычисл. математики. 2007. Т. 10, № 3. С. 299–305.
13. Журавлев С. С. Разработка системы мониторинга с использованием имитационного моделирования / Андрюшевич С. К., Журавлев С. С., Золотухин Е. П., Ковалев С. П., Окольнишников В. В., Рудометов С. В. // Проблемы информатики. – 2010. – № 4. – с. 65–75.
14. Николаев П. И. Выбор подхода для обоснования роботизированных подземных геотехнологий // Сборник материалов конференции «Развитие-2016». – 2016.
15. Николаев, П. И. Методы оптимизации в горном деле // Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая – 2015» / КузГТУ. – Кемерово. – 2015. – с. 224-227.

REFERENCES

1. Khoroshilov, A.V. Tarakanov A. V. Osnovnye prichiny travmatizma na shakhtakh Kuzbassa v kontse XX - nachale XX vv. [Main causes of traumatism on Kuzbass mines in end of XX century – beginning of XXI century. Vestnik KemGU [Bulletin of KemSU]. 2010. No. 3(43). P. 215-218.
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya ugel'noy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda [Long-term program of coal mining industry progress in Russia till 2030]. URL: <http://minenegro.gov.ru/node/1846> (accessed: 15.04.2016).
3. Konyukh, V. L. Shakhtnaya robototekhnika [Mining robotics]. Kemerovo, Kuzzbassvuzizdat, 2000. 336 P.
4. Konyukh, V. L. Taylakov O. V. Predprojektnyy analiz shakhtnykh robototekhnicheskikh sistem [Predesign analysis of mine robotic systems]. Novosibirsk, Science, Siberian Branch. 1991.
5. Konyukh V. L. Selection of driving technologies for robotization / V. Konyukh, V. Sinoviev, D. Sturgul // Proc. of the 7-th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection. - Canada: Calgary, 6-9 Okt. 1998.
6. Kurlena M. V., Shtele V. I., Shalaurov V. A..Razvitie tekhnologii podzemnykh gornykh rabot [Progress of underground mining technology]. Novosibirsk, Science, Siberian Branch. 1985.
7. Konyukh V. L. Promyshlennaya avtomatizatsiya v kontseptsii rudnika budushchego [Industrial automation in future mine concept]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2007. No. 6. P. 39-44.
8. Konyukh V. L., Ramazanov R. A. Control of underground loader-haul-dumpers from the surface. Journal of Mining Science. 2004. No. 4. P. 374-379.
9. Sinoviev V.V. Simulation Application for Evaluating of Efficiency of Mining Systems Automatization / V.V. Sinoviev, A. N. Starodubov, M. U. Dorofeev, V. V. Okolnishnikov // WSEAS Transactions on Systems, ISSN / E-ISSN: 1109-2777 / 2224-2678, Volume 14, 2015, Art. #24, pp. 261–267
10. Sinoviev V.V. Approach to effectiveness evaluation of robotics technology in mining using discrete event simulation / V. V. Sinoviev, V.V. Okolnishnikov, A.N. Starodubov, M.U. Dorofeev // International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, ISSN: 1998-0159, Volume 10, 2016, pp. 123-128.
11. Konyukh, V.L., Okol'nishnikov, V. V. Imitatsionnoe modelirovanie sposobov dobuchi poleznykh iskopaemykh na bol'shoy glubine [Simulation of great depth mining methods]. Problemy informatiki [Problems of informatics]. 2009. No. 3. P. 54-61.

12. Nechepurenko M. I., Okol'nishnikov V. V., Pishchik B. N. Modelirovaniye slozhnykh tekhnologicheskikh ob'ektov upravleniya [Simulation of complicated engineering control objects] // Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki [Siberian journal of computational mathematics]. 2007. Vol. 10. No. 3. P. 299-305.
13. Zhuravlev S. S. Andryushkevich S. K., Zolotukhin E. P., Kovalev S. P., Okol'nishnikov V. V., Rudometov S. V. Razrabotka sistemy monitoringa s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya [Development of monitoring system with simulate use]. Problemy informatiki [Problems of informatics]. 2010. No. 4. P. 65-75.
14. Nikolaev P. I. Vybor podkhoda dlya obosnovaniya robotizirovannykh podzemnykh geotekhnologiy [Approach choice for underground robotic geotechnologies rationale]. Sbornik materialov konferentsii «Razvitiye-2016» [Materials collection of «Razvitie-2016» conference]. 2016.
15. Nikolaev, P. I. Metody optimizatsii v gornom dele [Optimization methods in mining]. Sbornik materialov VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya – 2015» [Materials collection of VII All-Russian scientific-practical conference of young scientists with international participation «Young Russia - 2015»]. Kemerovo, KuzSTU. 2015. P. 224-227.

Поступило в редакцию 24.07.2016

Received 24 July 2016