

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-37-43
УДК 622.333

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ БЕЗ ПОСТОЯННОГО ПРИСУТСТВИЯ ЛЮДЕЙ В ЗАБОЕ

NEW APPROACH TO JUSTIFICATION OF GEOLOGICAL TECHNOLOGIES WITHOUT PERMANENT PRESENCE OF PEOPLE AT THE FACE

Зиновьев Василий Валентинович^{1,2},

кандидат техн. наук, e-mail: zv150671@gmail.com

Zinoviev Vasily V.^{1,2}, C. Sc.

Стародубов Алексей Николаевич^{1,2},

кандидат техн. наук, e-mail: st_a_n@mail.ru

Starodubov Alexey N.^{1,2}, C. Sc.

Николаев Петр Игоревич^{1,2},

аспирант, e-mail: mrnikolaev@mail.ru

Nikolaev Petr I.^{1,2}, postgraduate

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

¹Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 18, Sovietskiy prospect, 650065, Kemerovo, Russian Federation

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

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

Аннотация. В работе предложен подход к обоснованию геотехнологии, исключающей постоянное присутствие людей в забое с помощью автоматизации и роботизации её процессов, а также показано применение подхода для обоснования подземной буровзрывной проходческой геотехнологии для условий Макарьевского месторождения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса.

Abstract. This article contains description of the approach to justification of the geotechnology, which excludes permanent presence of mineworkers at the coal face due to automatization and robotization of mine processes. It also shows the use of this approach for justification of the underground drilling and blasting tunneling geo-technology for the conditions of the Makaryevskoye coalfield in Tersinskiy geological and economical region of Kuzbass.

Ключевые слова: геотехнология, роботизация, имитационное моделирование, методика, IDEF0

Keywords: geotechnology, robotization, simulation, techniques, IDEF0

Удельный вес травматизма в шахтах Кузнецкого угольного бассейна составляет в среднем 55% всех несчастных случаев в Кемеровской области, из которых каждый 80-ый – смертельный [1]. В угледобывающем производстве Кузбасса этот показатель по-прежнему выше, чем в обрабатывающем производстве, строительстве и транспорте.

Несовершенство технологий добычи угля в 25% случаев является основной причиной несчастных случаев на шахтах страны [2]. В Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года [3] отмечено, что уровень смертельного травматизма в шахтах по-прежнему остаётся высоким. Указывается, что при подземной добыче угля увеличивается доля выработок, где люди работают в не-

благоприятных горно-геологических условиях. Большинство внезапных выбросов угля и газа, пожаров, обрушений кровли и прочих аварийных ситуаций приходится на призабойные части подземных выработок. Необходима разработка технологий с применением средств автоматизации и роботизации, позволяющих вывести горнорабочих из призабойной зоны и обеспечить повышение безопасности ведения горных работ, снижение аварийности и травматизма в угольной промышленности.

Актуальной задачей является обоснование геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое.

Предложен подход, позволяющий обосновать геотехнологии с использованием средств автоматизации и роботизации, алгоритм которого

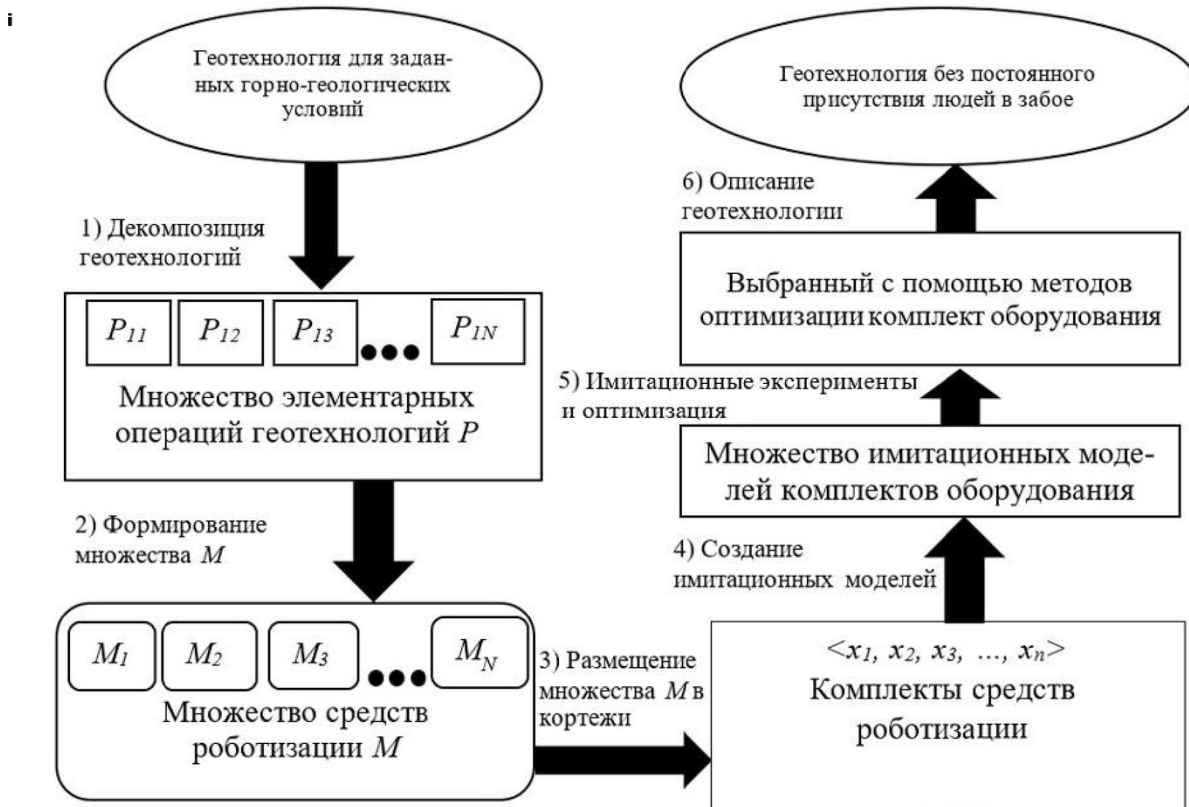


Рис. 1. Алгоритм обоснования геотехнологии без постоянного присутствия людей в забое

представлен на рис. 1.

На первом этапе осуществляется декомпозиция геотехнологии на элементарные операции с применением методологии системного-функционального подхода IDEF0 [4]. На следующем этапе для каждой операции подбираются варианты автоматизации и роботизации из имеющихся на мировом рынке предложений. Затем на основе найденных вариантов создаётся множество комплектов горного оборудования, в котором каждая единица оборудования выполняет одну или несколько технологических операций. Следующим этапом является оценка технологических характеристик и выбор одного или нескольких вариантов по комплексному критерию трудоёмкости, скорости ведения горных работ и среднему хронологическому числу человек в забое. Т.к. множество натурных или физических экспериментов над реальным горным автоматизированным оборудованием невозможно, для оценки характеристик горных механизмов рационально использовать математическое моделирование [5]. Случайная природа горнотехнических процессов, особенности взаимного влияния горного оборудования в динамике, большое число оцениваемых вариантов значительно усложняют аналитическую оценку, поэтому на этом этапе целесообразным является имитационное моделирование. На заключительном этапе проводится выбор оптималь-

ного варианта комплекта оборудования на основе имитационного моделирования и генетического алгоритма, а затем описание оптимальной геотехнологии без постоянного присутствия людей в забое.

Предложенный подход применяется в ФИЦ УУХ СО РАН, где ведутся исследования, обосновывающие дальнейшее развитие угольной промышленности Кузбасса в Терсинском геолого-экономическом районе, в частности за счёт разработки Макарьевского угольного месторождения [6]. Марки коксующихся углей, залегающие в месторождении пологими и выдержанными пластами мощностью от 1 до 2 м. [7], имеют высокую экономическую ценность. Угольные пласты в месторождении подчинены пачкам алевролитов и песчаников, крепость которых составляет 6-8 по шкале проф. Протоdjаконова, что препятствует использованию комбайнового, щитового и гидравлического способов ведения подготовительных работ. Для обоснования технологии ведения подземных подготовительных работ буровзрывным способом без постоянного присутствия горнорабочих в забое для условий Макарьевского угольного месторождения используется описанный выше подход.

Исходными данными являются геологические условия, на основе которых выбирается геотехнология. Для Макарьевского месторождения за основу взята геотехнология подготовительных поле-

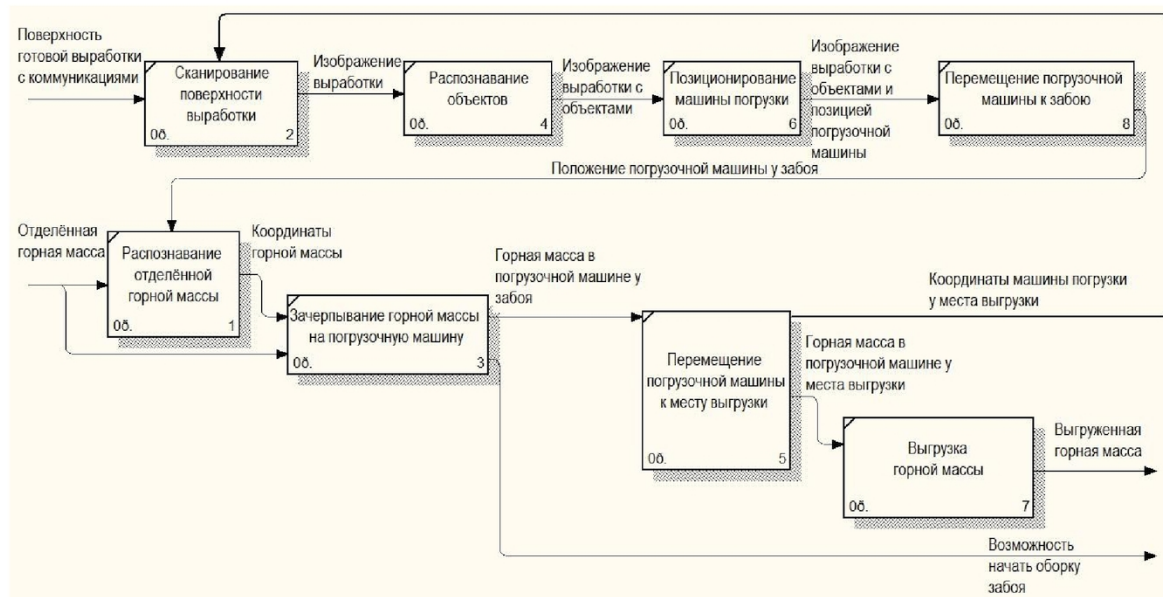


Рис. 2. Пример декомпозиции процесса погрузки отбитой горной массы

вых горных работ на пологих тонких и средних пластах с буровзрывным разрушением породы, погрузкой отбитой горной массы индивидуальной машиной, креплением анкерами и сетчатой затяжкой.

Основными процессами данной геотехнологии являются бурение и зарядание шпуров, погрузка отбитой горной массы, оборка забоя, крепление выработки. С применением методологии системного-функционального подхода IDEF0 эти процессы были декомпозированы на элементарные технологические операции. Каждая операция представлена в виде «чёрного ящика», выполняющего функцию преобразования входа операции в выход. Пример декомпозиции процесса погрузки отделившейся горной массы представлен на рис. 2.

В результате декомпозиции 5 основных процессов ведения подготовительных работ буровзрывным способом (бурение шпуров, зарядание шпуров, погрузка отделившейся горной массы, оборка выработки, крепление выработки) было найдено 40 технологических операций (табл. 1), которые составили ряд из 40 элементов $P_1, P_2 \dots P_{40}$.

С каждой операцией было сопоставлено множество вариантов её выполнения, в итоге было получено 40 множеств средств автоматизации и роботизации операций подготовительных работ $M_1, M_2 \dots M_{40}$, у которых обнаруживаются следующие особенности:

1) В каждом процессе существуют взаимосвязанные технологические операции, которые могут выполнять только горнорабочие. Это визуальное, тактильное, звуковое восприятие окружающей местности, распознавание в выработке отдельных объектов, позиционирование – определение местоположения горнорабочих и техники в выработке. Передача данного функционала техни-

ке позволит значительно уменьшить время нахождения горнорабочих в забое, что приведёт к снижению показателей травматизма и трудоёмкости горных работ.

2) В каждом процессе существуют операции, способы безлюдного выполнения которых разработаны для условий рудников. Ведущими компаниями, предлагающими средства роботизации и автоматизации подготовительных горных работ, являются зарубежные фирмы Athlas Corco, Sandvik, Caterpillar. Автономная работа таких средств возможна благодаря компьютерным системам управления, осуществляющим контроль за несколькими операциями проходческого цикла. При комплексном внедрении таких средств автоматизации и роботизации в подземную разработку угольных месторождений необходимо учитывать их взаимное влияние в динамике, а также высокую стоимость их приобретения и использования.

Следующим этапом обоснования геотехнологии является формирование множества комплектов оборудования из множества средств автоматизации и роботизации подготовительных работ. Формируются они путём размещения элементов множеств $M_1, M_2 \dots M_{40}$ в соответствующие технологические операции.

Для корректного формирования комплектов оборудования введены следующие ограничения на их размещение:

1) Ограничение на формирование невозможных комплектов оборудования, когда использование одного варианта исполнения технологической операции исключает использование другого. Например, нейронную сеть для распознавания объектов возможно использовать, если применяется техническое средство (видеокамера, лазерный сканер), и невозможно, если функции чувственного восприятия возложены на горнорабочего.

Таблица 1. Результат декомпозиции процессов подготовительных подземных работ на технологические операции

Процесс	Технологическая операция
Бурение шпуров	1. Сканирование окружающей местности
	2. Распознавание объектов
	3. Позиционирование бурильной машины
	4. Перемещение бурильной машины
	5. Наведение стрелы
	6. Бурение шпура
	7. Замер параметров бурения
	8. Регулировка бурения
Заряжание шпуров	1. Сканирование окружающей местности
	2. Распознавание объектов
	3. Позиционирование механизма зарядки
	4. Перемещение механизма зарядки
	5. Наведение стрелы
	6. Заряжание шпура
	7. Крепление детонатора
Погрузка отделённой горной массы	1. Сканирование окружающей местности
	2. Распознавание поверхности выработки
	3. Позиционирование погрузочной машины
	4. Перемещение погрузочной машины к забою
	5. Распознавание отделённой горной массы
	6. Зачерпывание отделённой горной массы
	7. Перемещение погрузочной машины к месту выгрузки
	8. Выгрузка отделённой горной массы
Оборка забоя	1. Сканирование окружающей местности
	2. Распознавание объектов
	3. Позиционирование механизма оборки
	4. Перемещение механизма оборки
	5. Наведение стрелы
	6. Устранение геометрических искажений выработки
Крепление выработки	1. Сканирование окружающей местности
	2. Распознавание поверхности выработки
	3. Позиционирование механизма крепления
	4. Определение мест под анкера
	5. Перемещение механизма крепления
	6. Бурение шпура для анкера
	7. Продувка шпура для анкера
	8. Заряжание закрепителя в шпур для анкера
	9. Установка анкера в шпур
	10. Затяжка болта
	11. Установка сетчатой затяжки

2) Ограничение на формирование нерациональных комплектов оборудования, когда не имеет смысла размещать современные предложения по автоматизации и роботизации только на одну операцию, если они могут участвовать в нескольких. Например, если имеется погрузочная машина

с компьютерной системой управления, то её следует назначать на все возможные технологические операции – сканирование окружающей местности, распознавание выработки, позиционирование и перемещение по ней.

Учёт данных ограничений производится с по-

Операция	Вариант исполнения	1. Горнорабочий	1. Видеокамеры	1. Робот с лазерным сканером	1. Лидар на борту буровой	2. Нейронная сеть распознавания	2. Горнорабочий	3. Горнорабочий	3. Система позиционирования	4. Горнорабочий в кабине	4. Горнорабочий на дистанции	4. КСУ машины погрузки	5. Горнорабочий	5. Нейронная сеть распознавания	6. Рабочий в кабине	6. Рабочий дистанционно с Г	7. Погрузочная машина	7. Бурилопогрузочная машина	7. Бурилопогрузочная машина	7. Бурилопогрузочная машина
1. Сканирование окружающей местности	1. Горнорабочий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1. Видеокамеры	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1. Мобильный робот с лазерным сканером	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1. Лидар на борту погрузочной машины	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Распознавание поверхности выработки	2. Нейронная сеть распознавания	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2. Горнорабочий	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. Позиционирование погрузочной машины	3. Горнорабочий	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3. Система позиционирования	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Управление перемещением	4. Горнорабочий в кабине	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4. Горнорабочий на дистанции	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4. Компьютерная система управления погрузочной машины	-	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Распознавание отдалённой горной массы	5. Горнорабочий	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	5. Нейронная сеть распознавания	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 3. Фрагмент матрицы совместимости вариантов исполнения технологических операций процесса погрузки

Таблица 2. Таблица вариантов подготовительных работ отдалённой горной массы

Процесс	Число операций процесса	Вариантов исполнения
Бурение шпуров	8	128
Заряжание шпуров	7	7
Погрузка отбитой горной массы	8	50
Оборка забоя	6	7
Крепление выработки	11	5
вся геотехнология		1 568 000

мощью матрицы совместимости исполнителей технологических операций (рис. 3), созданной для каждого производственного процесса. Её использование при формировании комплектов горного оборудования позволит уменьшить число рассматриваемых вариантов путём отсека не имеющих смысла вариантов. Каждые строка и столбец матрицы описывают возможного исполнителя с номером технологической операции, на которую он может быть назначен, пересечение строки и столбца обозначает совместимость исполнителей («+» если исполнители совместимы, «-» в противном случае).

В результате размещения средств автоматизации и роботизации из множеств $M_1, M_2 \dots M_{40}$ на множество технологических операций $P_1, P_2 \dots P_{40}$ с учётом совместимости исполнителей технологических операций получаем следующие числа вариантов исполнения каждого процесса (табл. 2).

Для всей подземной подготовительной буровзрывной геотехнологии получено $128 \cdot 7 \cdot 50 \cdot 7 \cdot 5 = 1\,568\,000$ вариантов исполнения:

В таблице для каждого процесса представлены число технологических операций, его составляющих, и число возможных комплектов оборудования, исполняющих этот технологический процесс. Так, в процесс погрузки отдалённой горной массы входят восемь технологических операций: сканирование выработки, распознавание объектов, позиционирование машины погрузки, перемещение машины погрузки к забою, распознавание отдалённой горной массы, зачерпывание горной массы погрузочной машиной, перемещение машины погрузки к месту выгрузки, выгрузка горной массы. На сегодняшний день для их выполнения можно назначить 4 разных комплекта горного оборудования, например: на сканирование выработки назначается лидар, установленный на погрузоч-

```

*****
* Модуль "Зарядание"
*****
  LOGIC R OSA; Зарядчик подогнан
  ADVANCE [ ]; Подгон зарядчика
  LOGIC R VSA; Шпуры не заряжены
  SEIZE KU; Включение зарядчика
  ADVANCE [ ]; Зарядание шпуров
  RELEASE KU; Выключение зарядчика
  LOGIC S VSA; Шпуры заряжены
  ADVANCE [ ]; Отгон комплекса
  LOGIC S OSA ; Комплекс отогнан
*****
* Модуль "Погрузка вар.1"
*****
  ADVANCE [ ]; Подгон комплекса

```

Рис. 4. Фрагмент имитационной модели-основы буровзрывных работ

ную машину, на распознавание объектов назначается компьютерная программа, использующая принцип нейронных сетей, за перемещение погрузочной машины отвечает компьютерная система управления передвижением, горнорабочий дистанционно с помощью видеокамеры распознаёт отделённую горную массу и управляет на расстоянии процессами наполнения и разгрузки ковша погрузочной машины.

Для создания имитационных моделей, с целью анализа характеристик комплектов горного оборудования, создана модель-основа буровзрывных работ в среде моделирования GPSS World. Фрагмент модели представлен на рис. 3.

Путем ввода времени выполнения технологических операций в ячейки модели-основы получается один из вариантов комплекта горного оборудования. Таким образом, создаются модели всех возможных комплектов, позволяющие в экспериментах оценивать основные технологические характеристики: скорость проходки, загрузку оборудования, трудоемкость работ, время нахождения горнорабочих в забое. Для созданных моделей проводятся имитационные эксперименты с целью выявления оптимального комплекта горного оборудования по критериям минимума количества горнорабочих в забое, минимума времени их нахождения в призабойной зоне, минимума времени ведения подготовительных работ.

В случае небольшого числа полученных комплектов горного оборудования выбор из них оптимального производится полным перебором всех вариантов, для которых строятся имитационные модели. В случае, если число возможных комплектов требует для обработки значительное количество машинного времени (более суток), рекомендуется применять эвристические алгоритмы для решения задачи оптимизации [8]. Можно выделить три основных семейства эвристических алгоритмов: семейство алгоритмов покоординатного спуска, семейство алгоритмов A*, семейство

эволюционных алгоритмов. Первые два семейства алгоритмов не подходят для оптимизации выбора комплекта горного оборудования, так как требуют в качестве входных значений непрерывные значения, которые можно изменять в большую или меньшую сторону (например, геометрические координаты, скорости, мощности). Семейство же эволюционных алгоритмов может принимать в качестве входных значений константы, которыми являются характеристики моделей горного оборудования. Поэтому эволюционные алгоритмы использованы в предлагаемом подходе для оптимизации выбора комплекта горного оборудования.

На заключительном этапе подхода на основе выбранного оптимального комплекта оборудования с помощью технологической схемы и области рационального использования описывается геотехнология, исключая постоянное нахождение горнорабочих в забое.

Таким образом, создан новый подход к обоснованию геотехнологии без постоянного присутствия людей в забое, отличающийся совместным использованием методологии IDEF0 для декомпозиции процессов подготовительных работ на элементарные операции, имитационного моделирования для оценки характеристик работы комплектов горного оборудования в динамике, методов оптимизации для определения эффективного варианта геотехнологии и позволяющий выбрать геотехнологию по критериям минимального количества горнорабочих в забое, минимального времени их нахождения в призабойной зоне, минимального времени ведения подготовительных работ.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-47-420490 «Моделирование и обоснование технологий разработки угольных месторождений подземным и открыто-подземным способами без постоянного присутствия людей в забоях» (2016-2017 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. Кочеткова Е. А. Метод оценки эффективности управления охраной труда угольных шахт на основе учета зависимости рисков профзаболеваемости и травматизма от финансовых затрат [Текст]: дис.....канд. техн. наук: 05.26.01.
3. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. / Электрон. текст. дан. 2012. – Режим доступа: <http://minenagro.gov.ru/node/1846>, свободный - Дата обращения (29.05.2017).
4. Николаев П. И. Выбор подхода для обоснования роботизированных подземных геотехнологий / Сборник докладов ежегодной конференции молодых учёных ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие – 2016». – 2016. – с. 56-62.
5. Баганина А. Е. Математическое моделирование затухания ударных волн взрыва метана в пористых и сплошных защитных преградах / Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2012. – №3. – с. 35-40.
6. Клишин В. И. Оценка освоения угольного месторождения Терсинского геолого-экономического района Кузбасса / В. И. Клишин, В. А. Федорин, В. Я. Шахматов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №5. – с. 205-211.
7. Угольная база России. Том II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). / под ред. В. П. Череповского // – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
8. Курейчик В. В. Концепция эволюционных вычислений, инспирированных природными системами / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – №4. – с. 16-24.

REFERENCES

1. Khoroshilov, A.V. Tarakanov A. V. Osnovnye prichiny travmatizma na shakhtakh Kuzbassa v kontse XX - nachale XX vv. [Main causes of traumatism at Kuzbass mines at the end of XX century – beginning of XXI century]. Vestnik KemGU [Bulletin of KemSU]. 2010. No. 3(43). pp. 215-218.
2. Kochetkova E. A. Metod otsenki effektivnosti upravleniya okhranoy truda ugol'nykh shakht na osnove ucheta zavisimosti riskov profzabolevaemosti i travmatizma ot finansovykh zatrat [Method of safety and health management effectiveness assessment in coalmines based on recording of the dependence of occupational disease and injures risks on financial expenses [text]. Cand. of tech. sc. dis.: 05.26.01.
3. Dolgosrochnaya programma razvitiya ugol'noy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda [Long-term program of coal industry development]. URL: <http://minenagro.gov.ru/node/1846> (accessed: 29.05.2017).
4. Nikolaev P. I. Vybora podkhoda dlya obosnovaniya robotizirovannykh podzemnykh geotekhnologiy [Selection of approach for rationale of underground robotized geotechnologies]. Sbornik dokladov ezhegodnoy konferentsii molodykh uchennykh FITs UUKh SO RAN «Razvitie – 2016» [Bulletin of annual conference of young scientists FCC CCC SB RAN “Progress – 2016”. 2016. pp. 56-62.
5. Baganina A. E. Matematicheskoe modelirovanie zatukhaniya udarnykh voln vzryva metana v poristykh i sploshnykh zashchitnykh pregradakh [Mathematical modeling of methane explosion shock waves attenuation in porous and continuous protective barriers]. Vestnik of Tomsk state university. Mathematics and mechanics. 2012. No. 3. pp. 35-40.
6. Klishin V. I., Fedorin V. A., Shakhmatov V. Ya. Otsenka osvoeniya ugol'nogo mestorozhdeniya Tersinskogo geologo-ekonomicheskogo rayona Kuzbassa [Assessment of development of the coalfield in the Tersinskiy geological economical region of Kuzbass]. Vestnik of Kuzbass state technical university. 2015. No 5. pp. 205-211.
7. Ugol'naya baza Rossii. Tom II. Ugol'nye basseyny i mestorozhdeniya Zapadnoy Sibiri (Kuznetskiy, Gorlovskiy, Zapadno-Sibirskiy basseyny; mestorozhdeniya Altayskogo kraya i Respubliki Altay) [Coal basins of Russia. Volume II. Coal basins and coalfields of Western Siberia (Kuznetskiy, Gorlovskiy, Zapadno-Sibirskiy basins; coalfields of Altay kray and Altay republic)]. Edited by V. P. Cherepovskiy. Moscow, Pvt. Ltd. “Geoinformcenter”, 2003. p.604.
8. Kureychik V. V., Rodzin S. I., Kureychik V. M. Kontseptsiya evolyutsionnykh vychisleniy, inspirirovannykh prirodnymi sistemami. [Concept of evolutionary calculations inspired by nature systems]. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2009. No. 4. pp. 16-24.