

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ**

И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, П.И. Николаев, А.В. Кузнецова (Кемерово)

Одной из перспективных геотехнологий, позволяющих отрабатывать запасы угля в глубоких (более 180 м) разрезах, является открыто-подземная, основанная на совместном использовании экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) и комплекса глубокой разработки пластов (КГРП) [1-3]. Эффективность такой геотехнологии во многом зависит от параметров применяемых горных машин, таких как емкость ковша, максимальные радиус и высота черпания для экскаватора, максимальная грузоподъемность, собственный вес, длина автосамосвалов и их количество. Также на эффективность ЭАК и КГРП в значительной мере влияют простои, возникающие из-за поломок оборудования, несвоевременной доставки требуемых узлов и деталей, ожидания погрузки, отсутствия свободного автосамосвала, перегона экскаватора, заправки горючим, отсутствия транспортных средств для вывоза угля и др. Эти простои могут занимать от 30 до 50% рабочего времени. Все это приводит к временному прекращению работ и, как следствие, снижению производительности и требует учета при исследовании и выборе параметров экскаваторов и автосамосвалов [4].

Перебор всех возможных значений перечисленных параметров затрудняет использование традиционных аналитических методов для выбора их оптимальных уровней и принятия проектных решений. Более того, оптимизация осложняется вероятностной природой и динамичностью процессов. Часто определить явные аналитические формулировки критериев оптимизации и ограничения на значения параметров проектируемых геотехнологий просто невозможно [5].

В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмических методов оптимизации и специализированной компьютерной системы для определения критериев эффективности для каждого набора значений параметров на имитационных моделях взаимодействия ЭАК и КГРП с учетом динамики основных технологических процессов и вероятностных внеплановых простоев горных машин.

В лаборатории моделирования горнотехнических систем Института угля ФИЦ УУХ СО РАН разработана специализированная модульная компьютерная система имитационного моделирования открыто-подземной геотехнологии, структурная схема которой представлена на рис. 1.

Компьютерная система включает в себя следующие модули:

- «Модуль имитационного моделирования и оптимизации» для генерации по заданному алгоритму моделей различных вариантов ведения горных работ с возможностью учета случайных факторов взаимодействия горных машин во времени и пространстве, планирования и проведения имитационных экспериментов и оценки вариантов значений технико-организационных параметров при ведении горных работ;
- «База данных горных машин» для выбора в соответствии с введенными условиями имеющихся на рынке экскаваторов, автосамосвалов, бульдозеров, КГРП;
- «Модуль визуализации» для создания анимационной модели с динамически изменяющимися параметрами ведения горных работ на основе проводимых имитационных экспериментов и графических аналогов горного оборудования из соответствующей базы данных;
- «Интерфейс пользователя» для интерактивного взаимодействия с системой имитационного моделирования.

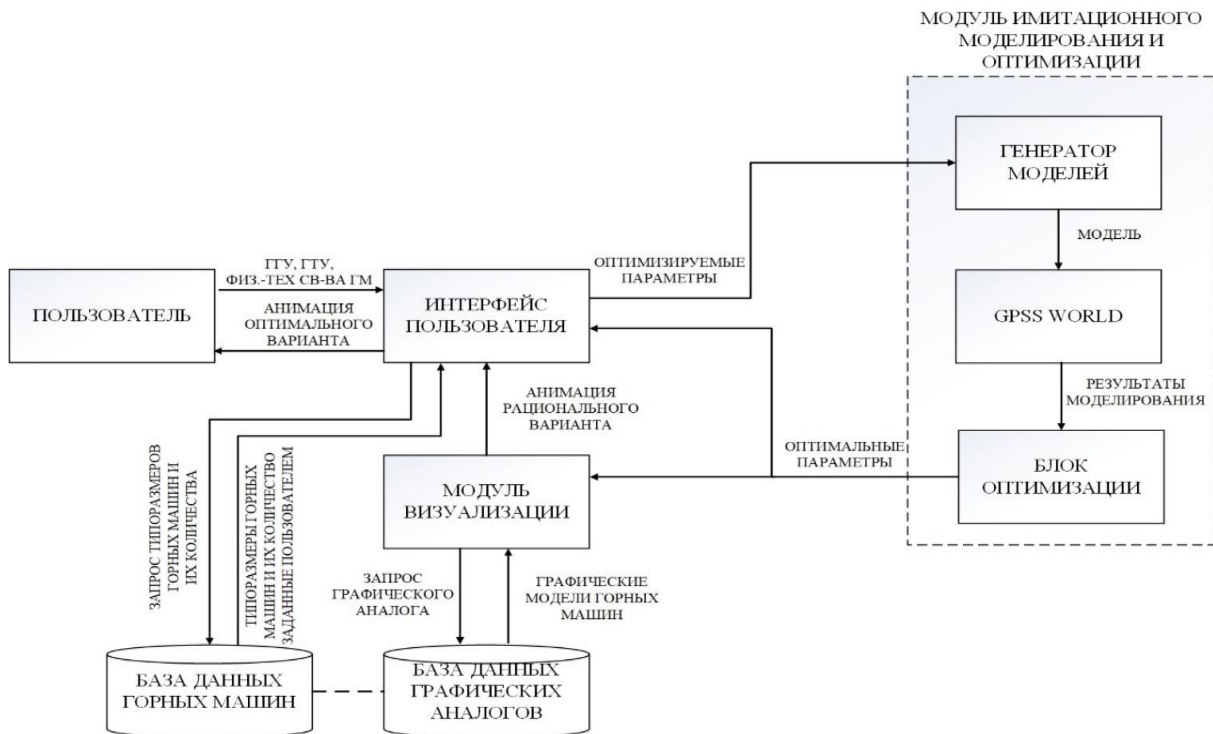


Рис. 1. Схема специализированной компьютерной системы имитационного моделирования открыто-подземной геотехнологии

С использованием среды Microsoft Visual Studio осуществлена программная реализация «Модуля имитационного моделирования и оптимизации», отличающимся принципом интеграции дискретно-событийного имитационного моделирования в эвристический алгоритм оптимизации, включающий блоки «Генератор моделей», «Интерпретатор GPSS World» и «Блок оптимизации».

Блоки «Генератор моделей» и «Интерпретатор GPSS World» позволяют на основе введенных пользователем горно-геологических и горнотехнических условий, а также физико-механических свойств горных пород, автоматически выбирать из базы данных подходящие характеристики горных машин, генерировать имитационную модель для отображения их взаимодействия во времени и пространстве, а также проводить вычислительные эксперименты при помощи ядра моделирования GPSS World с целью определения для каждого технико-организационного варианта технологической производительности и удельных затрат на проведение экскавации и транспортировки горной массы.

«Блок оптимизации» посредством совместного применения генетического алгоритма и комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде, основанном на максимизации технологической производительности и удельных затратах на проведение экскавации и транспортировки горной массы, автоматически определяет оптимальные технико-организационные параметры для заданных пользователем горно-геологических, горнотехнических условий и физико-механических свойств горный пород.

Работа «Блока оптимизации» строится на принципах эволюционного алгоритма. Инструментом алгоритма является кортеж (цепочка) параметров открыто-подземной технологии добычи угля с использованием КГРП. Состав кортежа определяется организационной структурой открыто-подземных горных работ, заданных пользователем в интерфейсе. Параметры организуются с помощью объектно-ориентированного подхода. Оптимизация параметров ЭАК и КГРП осуществляется по алгоритму, приведенному на рис.2.

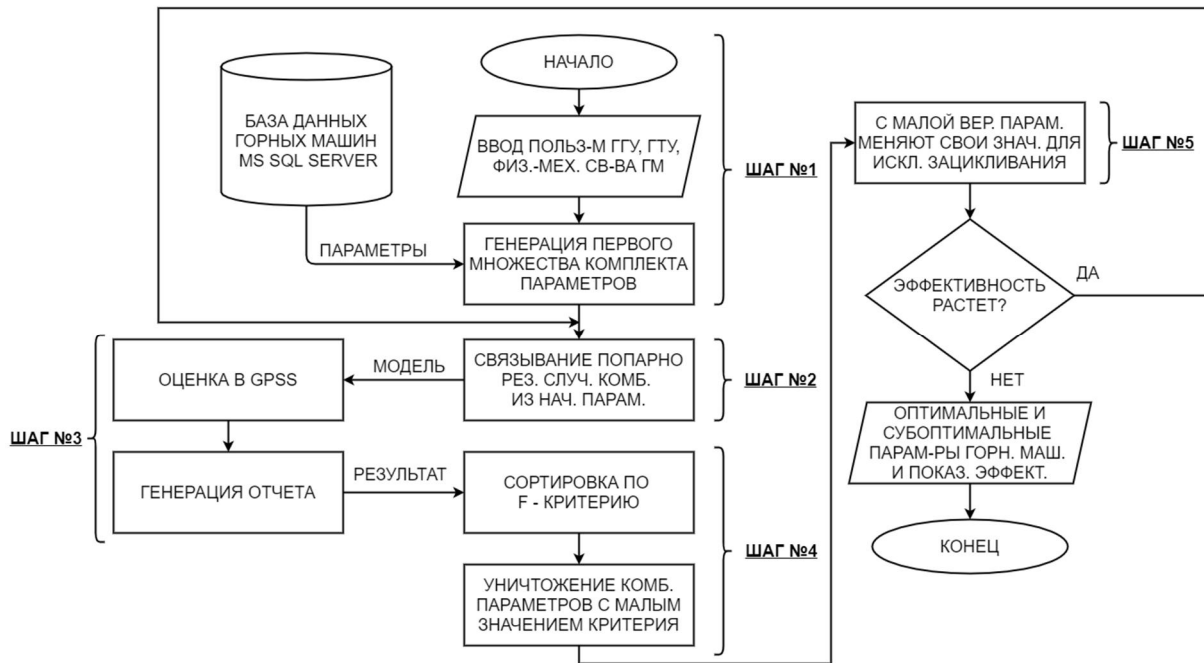


Рис. 2. Алгоритм оптимизации параметров ЭАК и КГРП с применением эволюционного алгоритма

На первом шаге оптимизации создаётся крупное число кортежей параметров открыто-подземной технологии (более 100 штук), каждый из которых заполняется параметрами открыто-подземной технологии. Параметры, заданные пользователем в интерфейсе (такие, как параметры забоя, пунктов разгрузки и трасс), копируются в созданные кортежи. Техничко-организационные параметры открыто-подземной технологии для каждого кортежа присваиваются случайным образом, основываясь на базе данных горных машин. Этими параметрами являются модели и количество используемых экскаваторов и автосамосвалов для каждого забоя.

На втором шаге оптимизации происходит рекомбинация параметров. Число кортежей увеличивается в 2 раза, при этом новые кортежи генерируются как комбинация параметров уже существующих кортежей. Это позволяет реализовать принцип эволюции параметров, заложенный в алгоритме.

На третьем шаге для каждого кортежа параметров открыто-подземной добычи угля происходит оценка его технологической производительности и удельных затрат на экскавацию и транспортировку. Оценка производительности каждого кортежа параметров происходит с помощью имитационного моделирования в среде GPSS World, что позволяет повысить точность расчёта за счёт учёта вероятностной природы и динамики открыто-подземной технологии добычи угля.

На четвёртом шаге алгоритма все кортежи сортируются по значению комплексного мультипликативного критерия оптимизации в агрегированном виде. Половина из них, обладающих наименьшими значениями критерия, удаляются из расчётов.

На пятом шаге алгоритма в некоторых кортежах происходит рекомбинация параметров: некоторым параметрам случайным образом присваиваются новые значения.

Шаги 2-5 повторяются до тех пор, пока среднее значение критерия оптимизации всех кортежей параметров открыто-подземной технологии не перестанет расти. В этом случае работа «Блока оптимизации» останавливается, а пользователю выводится технико-организационная структура открыто-подземных горных работ и параметры полученной технологии.

Информация о самосвалах и экскаваторах, а также их параметрах, находится в созданной с помощью SQL Server Management Studio реляционной базе данных Microsoft SQL Server Express, откуда импортируется в систему моделирования с учётом горнотехнических параметров вскрышных и добычных работ.

В «Модуле визуализации» для связи анимации с имитационной моделью в последнюю добавляются команды вывода в текстовый файл специальных строк управления. Далее скрипт, написанный на языке C#, считывает, обрабатывает данные из этого текстового файла и двигает объекты в среде Unity 3D, выводит параметры и строит графики изменения параметров элементов системы (забоев, горных машин, пунктов разгрузки) (рис. 3 и 4).

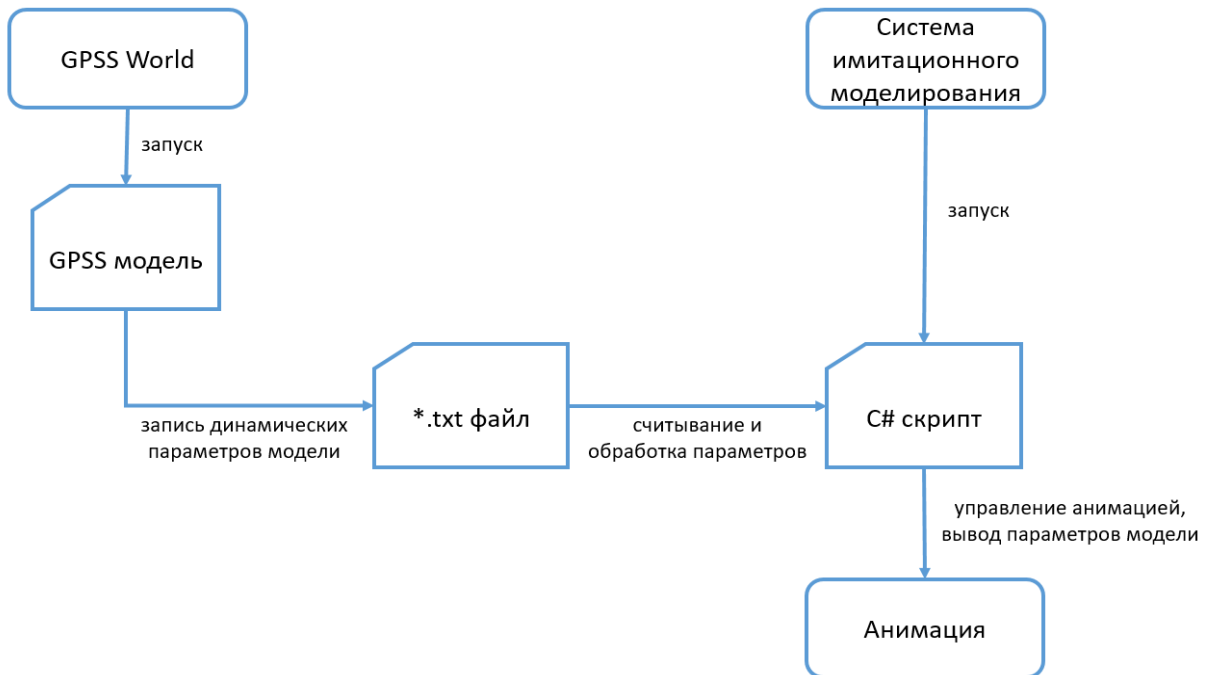


Рис. 3. Схема связи анимации с имитационной моделью в «Модуле визуализации»

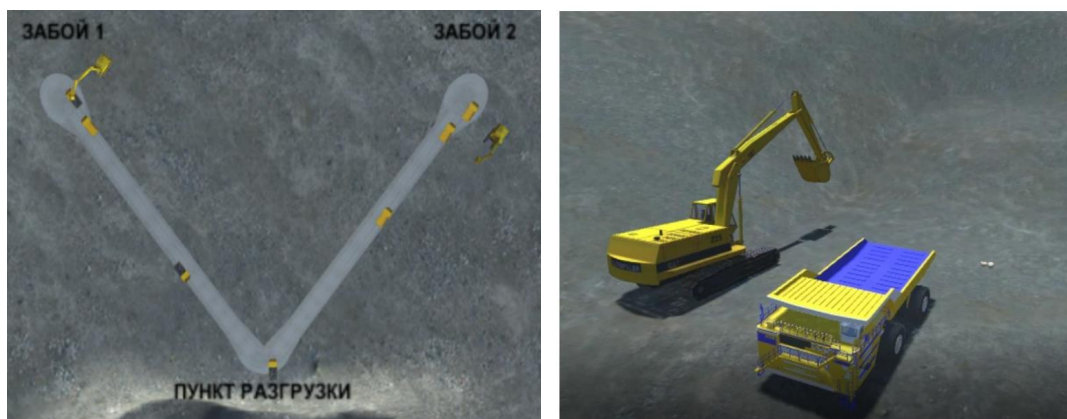


Рис. 4. Скриншот анимации участка угольного разреза

Разработан визуально-интерактивный интерфейс в среде Microsoft Visual Studio для интерактивного взаимодействия пользователя с компьютерной системой имитационного моделирования.

Интерфейс включает семь специальных форм, выполняющих определенные функции.

Стартовая форма предназначена для перехода на главную форму или перехода к редактированию электронной базы данных горных машин.

Главная форма (рис. 5) – для задания горнотехнических условий, физико-механических свойств горных пород; перехода к форме редактирования параметров маршрутов, забоя с КГРП; добавления, удаления или редактирования количества забоев и пунктов разгрузки; выбора причин внеплановых и плановых простоев горных машин (экскаваторов и автосамосвалов), редактирование условий оптимизации, запуска эксперимента.

Забои

Название	Число мест погрузки	Расстояние до промплощадки, м	Длина вскрышного блока, м	Ширина вскрышного блока, м	Высота блока, м	Коэффициент увеличения радиуса черпания	Ширина площадки для дополнительного	Ширина транспортной полосы, м	Расстояние от уступа до транспортной полосы, м	времяPodyezda	поворотPlatformy	размерFraction
Добьичной забой 1	1	20	1000	25	6	1,5	20	20	20	0,9	90	0,013
Добьичной забой 2	1	20	1000	20	5	1,5	20	20	20	0,9	90	0,1

Пункты разгрузки

Название	Число мест разгрузки	Расстояние до промплощадки, м	Расстояние между осевыми линиями дорог
Угольный склад 1	2	200	10

Маршруты

Название	Длина маршрута
Добьичной забой 1 - Угольный склад 1	2020
Добьичной забой 2 - Угольный склад 1	1620

Физико-механические свойства горных пород

- Коэффициент разрыхления породы: 1,33
- Плотность породы, т/м³: 1,25
- Коэффициент использования грузоподъемности автосамосвалов: 0,95
- Коэффициент наполнения ковшей экскаваторов: 1,10

Технические простои экскаваторов на ремонт

- Гидросистемы
- Двигателя
- Электрооборудования
- Механической части
- Ходовой части
- Системы управления
- Мягкой муфты

Технические простои автосамосвалов на ремонт

- Гидросистемы
- Двигателя
- Электрооборудования
- Механической части
- Подвески
- Системы управления
- Шин

Организационные простои экскаваторов

- Отсутствие топлива / электроэнергии
- Очистка ковша от глины
- Просадка в почву
- Заправка / удлинение кабеля
- Прием-сдача смены

Организационные простои самосвалов

- Прием-сдача смены
- Заправка

Параметры генетического алгоритма

- Число особей в популяции: 2
- Весовой коэффициент производительности: 0,50
- Весовой коэффициент удельной стоимости: 0,50

Горно-геологические условия

- Средняя мощность вскрышного пласта, м: 0
- Угол падения угольного пласта, рад: 0

Горнотехнические параметры

- Угол устойчивого откоса уступа, рад: 0
- Угол откоса рабочего уступа, рад: 0

Расчет КГРП

- Моделировать работу КГРП

Критерий оптимизации

Показатель

Производительность: макс. не менее 40,0 тыс. т/сут.

Стоимость: мин. не более 20,0 руб./т

Приступить к эксперименту!

Рис. 5. Главная форма

Форма редактирования маршрутов – для редактирования параметров маршрутов движения автосамосвалов; добавления, удаления или редактирования участков трассы; назначения маршрутов движения автосамосвалов от забоя до пункта разгрузки.

Форма редактирования параметров КГРП – для редактирования параметров забоя с применением КГРП; задания горнотехнических параметров забоя с КГРП; задания параметров КГРП, параметров бульдозера.

Форма редактирования параметров горных машин – для добавления, удаления, редактирования значений параметров экскаваторов и автосамосвалов.

Форма анимации – для демонстрации результатов оптимизационных экспериментов в виде компьютерной анимации.

Форма результатов (рис. 6) – для вывода показателей эффективности (технологической производительности и удельных затрат на экскавацию и транспортировку горной массы) оптимального или субоптимального варианта сочетания параметров технологии по каждому забую.

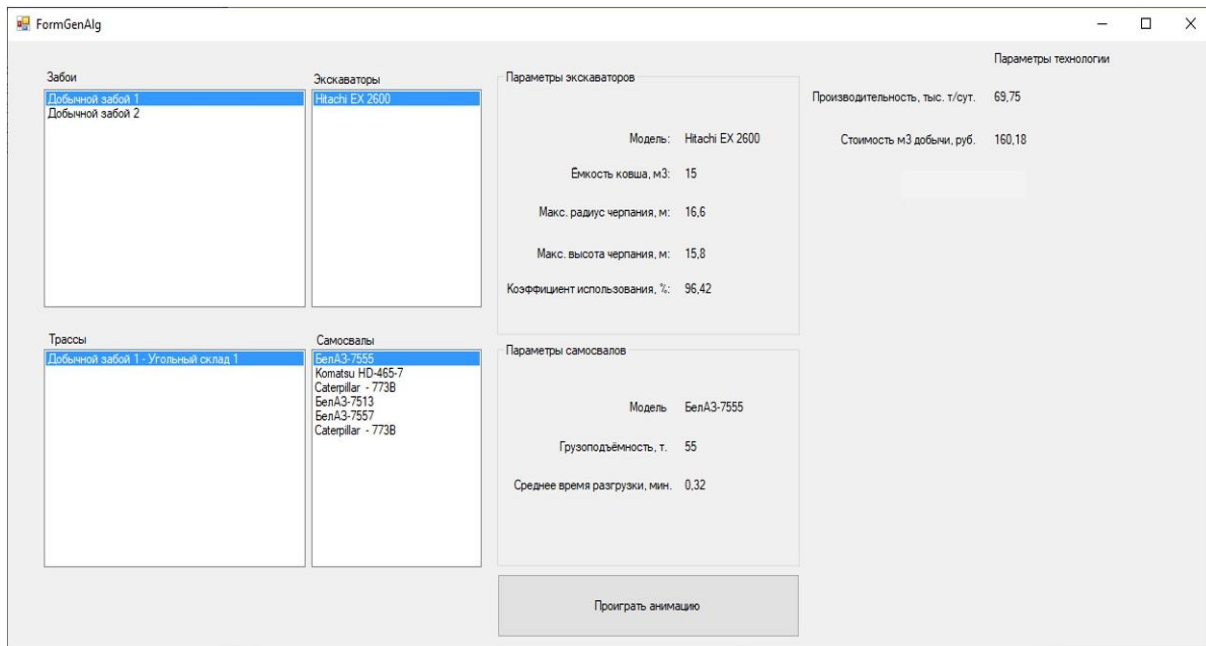


Рис. 6. Форма вывода результатов

Таким образом, применение разработанной специализированной компьютерной системы позволит в автоматическом режиме проводить оценку влияния вариантов сочетаний значений параметров на технологическую производительность угольного разреза, а также удельные затраты на экскавацию и транспортировку горной массы посредством имитационного моделирования совместной работы горных машин с учетом их вероятностных простоев, а также динамики ведения работ и выбирать оптимальное или субоптимальное решение для повышения эффективности открыто-подземной геотехнологии.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект №19-37-90031 «Разработка специализированной системы имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии».

Литература

1. **Копытов А.И.** Направления совершенствования стратегии развития угольной отрасли Кузбасса / А.И. Копытов, С.В. Шаклеин // Уголь. 2018. № 5. С. 80-86.
2. **Шаклеин С.В.** Концепция развития сырьевой базы Кузнецкого угольного бассейна / С.В. Шаклеин, М.В. Писаренко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. №3. С.118-125.
3. **Федорин В.А.** Условия регламентирующие безлюдную технологию разработки угольных пластов с использование комплекса глубокой разработки пластов / В.А. Федорин, В.Я. Шахматов, А.Ю. Михайлов, Е.Л. Варфоломеев // Журнал «Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности», №4, 2016. С. 83-88.
4. **Воронов А.Ю.** Оптимизация эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06: защищена 05.13.18 / Воронов Артем Юрьевич. КузГТУ. Кемерово, 2015. 195 с.
5. **Николаев П.И.** Методы оптимизации в горном деле / Сборник материалов VII Всероссийской, научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «Россия Молодая», Кемерово. 2015.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021663272 Российская федерация. Специализированная компьютерная система имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии / И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов, П.И. Николаев, В.А. Крамаренко; заявитель и правообладатель ФГНУ «ФИЦ угля и углехимии СО РАН. № 2021663272; заявл. 06.08.2021; опубл. 13.08.2021. 1 с.