

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗЛЮДНОЙ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ С УЧЕТОМ ПРОСТОЕВ ГОРНЫХ МАШИН

И.С. Кузнецов, В.В. Зиновьев (Кемерово)

Объем добываемого угля открытым способом составляет более половины всей добычи угля по России и постоянно растет [1]. При этом основными проблемами разработки угольных месторождений являются сложные горно-геологические и горнотехнические условия, что существенно осложняет присутствие и участие человека в технологических процессах и снижает эффективность горнодобывающих предприятий. Основным направлением повышения эффективности добычи, а также безопасности горных работ в данных условиях является автоматизация горного производства и применение безлюдных геотехнологий [2-5].

Существует множество систем автоматического управления горными машинами экскаваторно-автомобильного комплекса, разработанные компаниями: ООО "ВИСТ Майнинг Технолджи", Remotecontroltechnologies (RCT), Cavotec, SpectoRemote, DynamicAutomationSystems (DAS), Modularminingsystem, Caterpillar, Komatsu и др., которые испытываются и применяются на разрезах России, Австралии, Норвегии, Швеции, Северной Америке, Чили [2-8]. Развиваются геотехнологии безлюдной открыто-подземной угледобычи с применением комплекса глубокой разработки пластов (КГРП), который обеспечивает высокую безопасность ведения работ за счет отсутствия рабочих в забое, отбойки угля без взрывания, использованием системы высоконадежных подземных электросистем, а также высокую производительность за счет применения технологии глубокого выбуривания комбайном непрерывного действия, снабженного специальным устройством для разрушения угля и последующего извлечения его на поверхность. Экономический эффект достигается за счет отсутствия необходимости проведения подземных горно-подготовительных выработок и значительных объемов вскрышных работ (на действующих разрезах добыча может вестись с любого широкого уступа). Такой способ нашел успешное применение в России, Индии, США, Австралии, Китае, Южной Африке [9,10].

Таким образом, проблему безопасной и эффективной разработки угольных месторождений можно решить за счет применения безлюдной открыто-подземной геотехнологии на основе совместного использования автоматизированных ЭАК и КГРП (рис. 1).

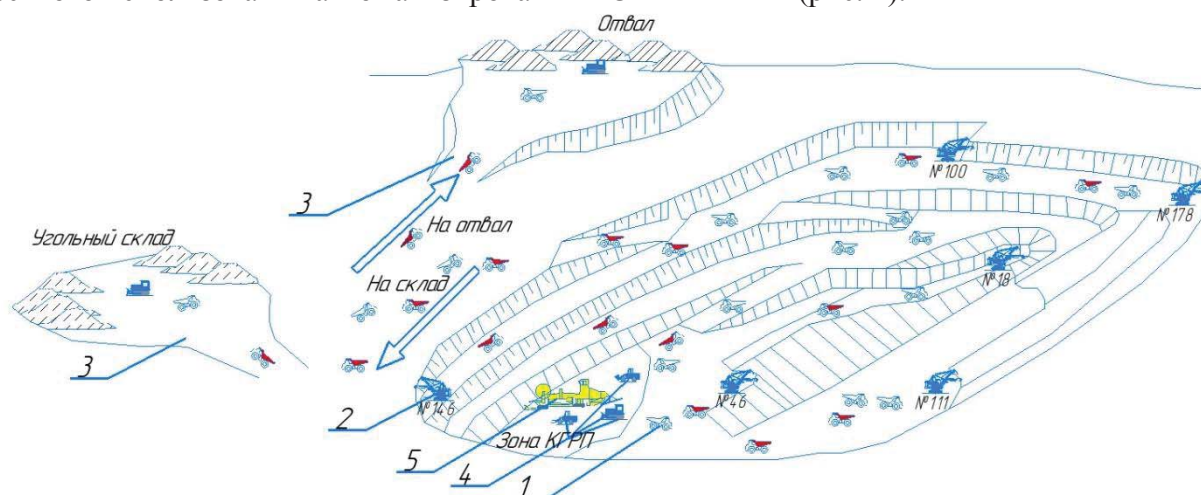


Рис. 1. Схема безлюдной открыто-подземной геотехнологии

При безлюдной добыче угля открыто-подземным способом ведется вскрыша/добыча классическим открытым способом, где действуют дистанционно или автономно управляемые автосамосвалы 1 и экскаваторы 2, транспортируя горную массу в пункты разгрузки 3 и возвращаясь за новой партией к закрепленному экскаватору, на основе диспетчерского решения. При увеличении объема вскрышных работ, уменьшении мощности пластов или невозможности добычи классическим способом, начинается подготовка площадки под КГРП с применением

### **Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования**

---

погрузочно - бульдозерной техники 4. После подготовки площадки, начинается добыча угля при помощи КГРП 5 (рис. 1).

В совокупности совместная работа ЭАК и КГРП представляют собой сложную систему, состоящую из множества элементов: экскаваторы, автосамосвалы, погрузчики, пункты разгрузки и т.д. Эффективность работы такой системы зависит от ее структуры и параметров горных машин, взаимодействующих во времени и пространстве.

Также на эффективность совместной работы ЭАК и КГРП в значительной мере влияют различного вида простои, которые присутствуют как в традиционных, так и в безлюдных технологиях. В результате анализа диспетчерских отчетов автоколонн пяти разрезов Кузбасса, выявлены виды простоев горных машин, которые классифицированы по признакам: плановые, технические и организационные. Такие простои могут возникать из-за поломок оборудования, несвоевременной доставки требуемых узлов и деталей, ожидания погрузки, отсутствия свободного автосамосвала, перегона экскаватора, заправки горючим, нарушения пласта, изменения его мощности и гипсометрии, обрушения кровли камер, отсутствия транспортных средств для вывоза угля и др. Эти простои могут занимать до 30% рабочего времени [11]. Все это приводит к прекращению работ и как следствие снижению производительности, что требует учета при исследовании и выборе параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии.

Так как последствия ошибок при проектных решениях очень дороги необходимо предсказательное моделирование на основе математических моделей и их программной реализации для проведения вычислительных экспериментов с целью исследования и выбора параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии на основе автоматизированных ЭАК и КГРП.

Анализ современного состояния исследований в области моделирования открыто-подземных геотехнологий показал, что в мире широко используются методы, математические модели и компьютерные системы для расчета и оптимизации календарных планов отработки угольных пластов открытым и открыто-подземным способами. Однако, всем им присущи существенные недостатки. Как правило не учитывается динамика взаимодействия элементов системы. Отсутствует учет влияния на показатели эффективности геотехнологии различных вариантов комплектования оборудования. Недостаточно детально учитываются вероятностные простои горных машин и степень влияния каждого типа простоя на производительность всей системы. Как правило, при проектировании учитывают только плановые простои, связанные с техническими осмотрами оборудования, ремонтами, проведением буровзрывных работ. Вероятностные простои фиксируют по факту их появления уже после выполнения работ за период 6-12 месяцев. По окончании этого периода анализируют отклонение фактической и плановой производительности в результате простоев. Затем вносят предложения по их минимизации, которые применяют при дальнейшей работе. При этом уже возникшие потери объемов добычи угля остаются невосполнимыми.

Актуальной задачей является разработка имитационных моделей, позволяющих отображать взаимодействие автоматизированных ЭАК и КГРП с учетом вероятностных внеплановых простоев горных машин для повышения эффективности исследования и выбора параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии.

Для отображения различных сложных систем в динамике с учетом случайных факторов в том числе и в горном деле хорошо себя зарекомендовал подход с использованием теории систем массового обслуживания (СМО) и имитационным моделированием с применением языка GPSS в различных версиях [12]. С использованием элементов теории СМО разработана концептуальная дискретно-стохастическая динамическая модель, отображающая взаимодействие ЭАК и КГРП с учетом вероятностных простоев горных машин (рис. 2).

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

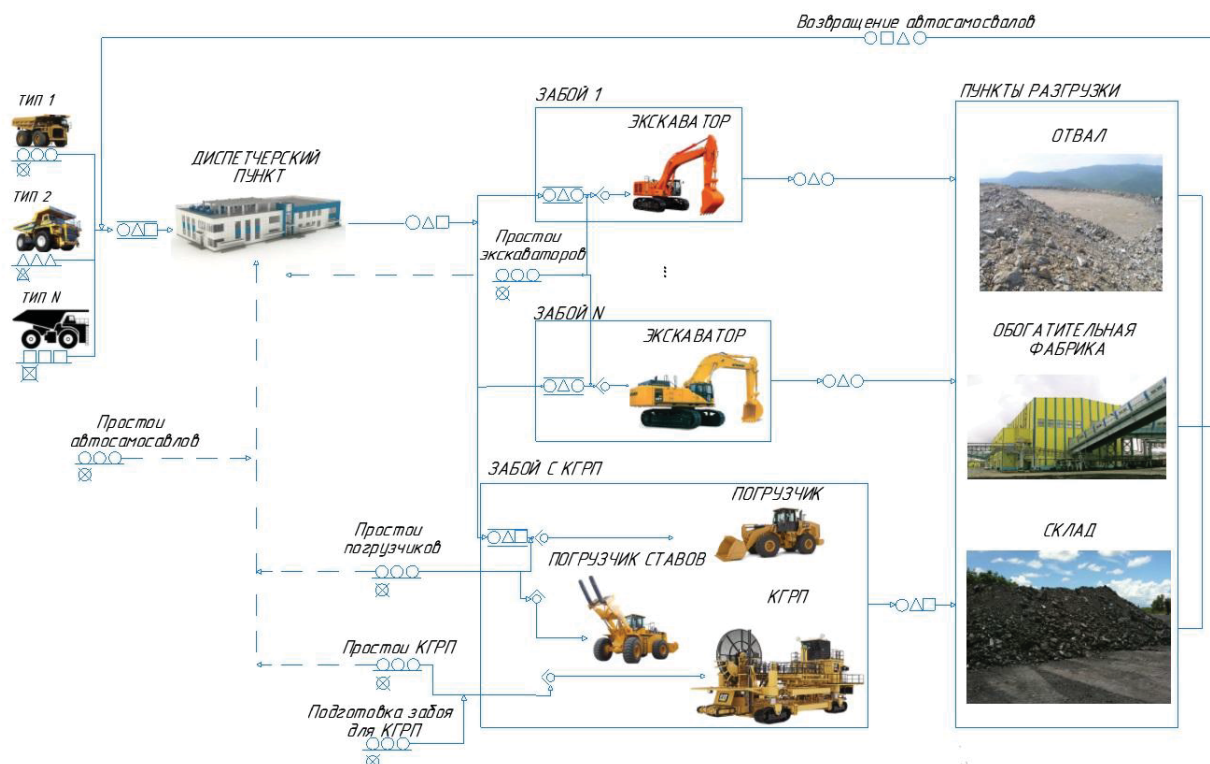


Рис. 2. Структурная схема концептуальной модели взаимодействия ЭАК и КГРП

Система включает два типа источника заявок. Первый тип источников формирует определенное количество заявок, соответствующее количеству автосамосвалов заданной грузоподъемности. Эти заявки попадают в обслуживающее устройство «Диспетчерский пункт», где идет их перераспределение по забоям в соответствии с диспетчерским решением. Обслуживающие устройства «Экскаватор» и «Погрузчик» задерживают каждую заявку на время, равное времени погрузки горной массы в автосамосвал. По истечении этого времени заявки поступают на обслуживание в устройства, отображающие склад, отвал, обогатительную фабрику, отображая процесс разгрузки горной массы. После этого заявки, имитирующие порожние автосамосвалы возвращаются к диспетчерскому пункту для последующего перераспределения. Второй тип источников, предназначен для моделирования простоев горных машин. Эти источники генерируют заявки через вероятностные интервалы времени, которые закрывают своеобразные клапаны и ограничивают доступ заявок-автосамосвалов к соответствующему обслуживающему устройству. Также при генерации такой заявки поступает сигнал в диспетчерский пункт, в котором идет перераспределение заявок-автосамосвалов между забоями с учетом простоя соответствующего обслуживающего устройства.

Программная реализация алгоритма продвижения заявок в СМО, отображающих взаимодействие ЭАК и КГРП, для проведения вычислительных экспериментов осуществлена с использованием среды имитационного моделирования GPSS Studio (ООО «Элина-Компьютер», Россия) [13]. Построенная модель состоит из 23 взаимосвязанных типовых элементарных блоков - ТЭБов. Двадцать ТЭБов отображают технологические процессы, а три ТЭБа содержат данные о временах выполнения операций, обслуживающих устройствах, очередях, функциях, моментах появления, типах и длительности простоев горных машин. В каждом ТЭБе, отображающем технологический процесс, содержится набор блоков GPSS World модели, имитирующих технологические операции. Например, в элементарный ТЭБ «Погрузка горной массы экскаватором» входят блоки SEIZE, ADVANCE, RELEASE, отображающие операции погрузки горной массы в автосамосвалы (рис. 3).

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

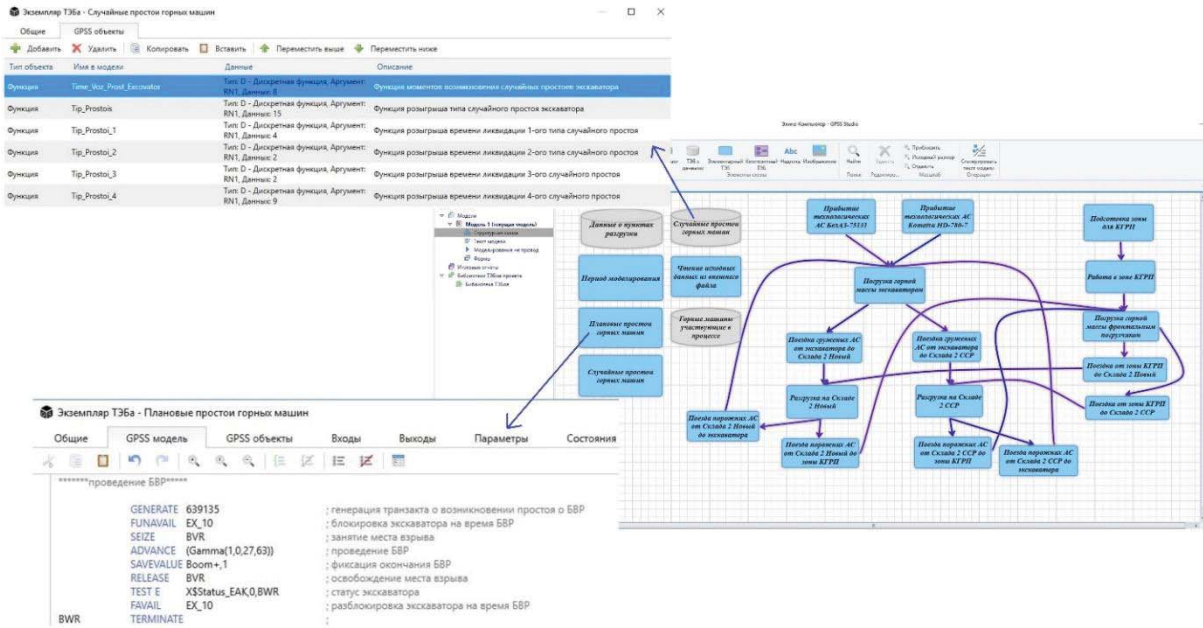


Рис. 3. Модель взаимодействия ЭАК и КГРП в GPSSStudio

При оценке адекватности модели, используя хронометражные замеры диспетчерских отчетов автоколонн различных разрезов Кузбасса, для ЭАК за смену определяли: общий объем вывезенной горной массы, количество совершенных рейсов автосамосвалами, среднее время погрузки горной массы экскаватором в автосамосвалы, коэффициент использования экскаватора. Для КГРП определяли: суточную добычу, количество выбуренных камер, число циклов при обработке одной камеры. Затем результаты, полученные по хронометражным данным, сопоставляли с модельными результатами для одних и тех же входных значений. Максимальное отклонение составило 9%.

Построенная модель позволяет оценивать объемы добычи всего разреза, а также его отдельных участков, забоев и горных машин. Для примера на рис. 4 представлены результаты имитационных экспериментов по оценке суточной добычи из одного забоя с учетом различных видов простоев.

Сплошная линия показывает изменение добычи забоя с учетом только плановых простоев. Пунктирная линия отображает добычу с учетом плановых и вероятностных внеплановых простоев технического и организационного характера. Как видно из графика объемы добычи с учетом плановых и внеплановых простоев отличаются от объемов добычи с учетом только запланированных простоев. Отклонение составляет в среднем 20,1% и колеблется в пределах от 0,23% до 39,9%. Например, падение объемов добычи на 85 сутки работы вызвано вероятностным простоем, возникшим из-за выхода из строя гидравлической части экскаватора (А). Простой начинается с 1 часа и устраняется в течение 3 часов. В 12 часов снижение добычи обусловлено простоем, связанным с отсутствием свободных автосамосвалов (Б) в течении 5 часов. Подобное падение добычи из-за отсутствия автосамосвалов наблюдается также на 89 сутки (В) и длится 9 часов (с 3 до 12 часов).

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

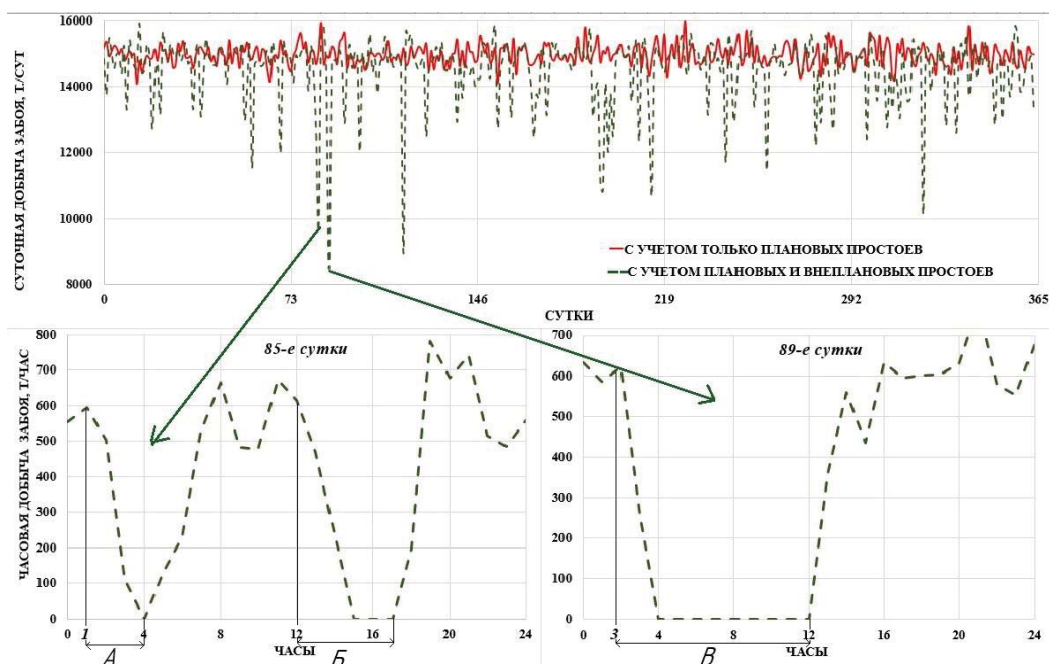


Рис. 4. Добыча забоя с учетом различных видов простоев

Минимизация внеплановых вероятностных простоев возможна за счет:

- создания резерва узлов и агрегатов для возможности полного проведения ремонта на месте и обеспечения бесперебойной работы экскаваторов, автосамосвалов, бульдозеров, погрузчиков, КГРП;
- совмещения ремонтов экскаваторов с графиком ремонтов технологического автотранспорта и/или проведением взрывных работ;
- рациональной расстановки автосамосвалов под экскаваторами согласно норм выработки;
- соблюдением оптимального соотношения погрузочной возможности экскаваторов и провозной автосамосвалов путем оперативного изменения расстояния транспортирования горной массы;
- перераспределением автотранспорта и транспортировкой горной массы на резервный ближайший отвал при дефиците автотранспорта.

Перечисленные мероприятия требуют предварительного анализа и оценки, которые можно проводить на имитационной модели, а затем внедрять в практику.

Таким образом, разрабатываемая имитационная модель взаимодействия автоматизированного экскаваторного-автомобильного комплекса и комплекса глубокой разработки пластов позволит повысить эффективность выбора параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии за счет предварительного анализа мероприятий по минимизации вероятностных простоев и исключить потери при добыче угля в будущем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90031 "Разработка специализированной компьютерной системы имитационного моделирования для исследования параметров безлюдной открыто-подземной геотехнологии".

#### Литература

1. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь – декабрь 2018 года, Ежемесячный журнал «Уголь». – март 2019. – С. 64 – 79.
2. Владимиров Я.Д. Обоснование параметров роботизированных горнотехнических систем в осложненных условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых: дис. канд. тех. наук: 25.00.22, 25.00.21 – Магнитогорск, 2016. – С. 195
3. Клебанов Д.А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок: дис. канд. тех. наук: 25.00.22 – Москва, 2015. – С. 145

### Секция 3. Практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования

---

4. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин / Журнал «Проблемы недропользования» №3 (3) – 2014. – С. 164 – 175
5. Официальный сайт министерства энергетики РФ: [Электронный ресурс]. – URL:<https://minenergo.gov.ru/node/1846> (дата обращения 15.10.2018)
6. Шевкун Е.Б. Роботизированные системы автомобильного транспорта на открытых горных работах / Е.Б. Шевкун, Е.А. Казаков // Журнал «Ученые заметки ТОГУ» Том 8, №4 – 2017. – С.460 – 472.
7. Гучек Е.М. Преимущества и возможности роботизированного карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 130 тонн / Е.М. Гучек, Д.А. Клебанов // Журнал «Золото и технологии» Декабрь №4 (38) – 2017. – С. 78 – 81
8. Тарасов П.И. Варианты реализации безлюдных технологий для промышленного транспорта / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, В.А. Черепанов, В.В. Разбицкий // «Известия вузов. Горный журнал», № 1 – 2013. – С. 104 – 111
9. Васильев П.Н. О новой геотехнологии комбинированной разработки угольных месторождений / П.Н. Васильев, Т.М. Иудина // Журнал «Горный информационно – аналитический бюллетень», №7 – 2009. – С. 44 – 46
10. 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.
11. Зубов В.П. Направления совершенствования технологии разработки угольных пластов с применением комплекса глубокой разработки пластов (КГРП) / Зубов В.П., Осминин Д.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 5. – С. 25–29.
12. Зиновьев В. В. Новый подход к обоснованию геотехнологий без постоянного присутствия людей в забое / В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №5. – с. 37-44.
13. Официальный сайт компании «Элина компьютер»[Электронный ресурс]. –<http://elina-computer.ru/> (дата обращения 15.10.2016)
14. Андреев А. Н. Особенности применения комплекса глубокой разработки пластов на разрезах Кузбасса / А.Н. Андреев, С.В. Кулябин, Д.М. Должко // «Евразийский Научный Журнал №4» (апрель). – 2016. – [Электронный ресурс]. – URL: <http://journalpro.ru/articles/osobennosti-primeneniya-kompleksa-glubokoy-razrabotki-plastov-na-razrezakh-kuzbassa/> (дата обращения 09.09.2018).