

УДК 622.271:622.68:004.94:330.45

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ САМОСВАЛОВ И ТЕХНИКИ С ДИСТАНЦИОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ГЛУБОКИХ КАРЬЕРАХ

Горелкин В.С., студент гр. ЭБбтс-241, II курс
Научный руководитель: Тюленева Т.А., к.э.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Современная геотехнология открытой добычи полезных ископаемых характеризуется устойчивой тенденцией к увеличению глубины карьеров, что является объективным следствием отработки легкодоступных запасов на верхних горизонтах. По мере погружения горных работ вниз изменяется не только геометрия выработанного пространства, но и фундаментальные условия эксплуатации горнотранспортного оборудования. Когда глубина выработки превышает отметку в 300–400 метров, традиционная схема управления техникой, предполагающая наличие водителя непосредственно в кабине самосвала, сталкивается с рядом серьезных вызовов системного характера. Увеличивается длина транспортного плеча, усложняется профиль технологических дорог, ухудшаются условия видимости из-за запыленности и рельефа, а главное — возрастают риски для жизни персонала в случае геомеханических нарушений бортов или обрушений уступов. В этом контексте автоматизация транспорта перестает восприниматься исключительно как инструмент повышения производительности или имиджевый проект и становится критически важным элементом системы управления промышленной безопасностью и операционной эффективностью.

Однако перед техническими директорами и главными инженерами предприятий возникает сложная дилемма выбора архитектуры автоматизации. Рынок технологических решений предлагает два основных пути развития: внедрение полностью автономных беспилотных самосвалов, способных функционировать без вмешательства человека в реальном времени, либо оснащение существующего парка техники системами дистанционного управления, когда оператор контролирует машину из безопасного удаленного центра. Оба подхода имеют свои сильные стороны, накопленную практику применения и очевидные недостатки. Их эффективность неодинакова в разных горно-геологических условиях [1-4]. Если на поверхностных участках разница в производительности может быть нивелирована качественной организацией работ и подготовкой дорог, то в глубокой выемке, где физика распространения радиосигнала и доступность спутниковой навигации ограничены

стенками карьера, выбор технологии становится определяющим фактором экономической устойчивости проекта на долгосрочную перспективу.

Под автономным самосвалом в рамках данного исследования понимается транспортное средство, оснащенное комплексом датчиков внешнего восприятия (лидары, радары, стереокамеры ультразвукового диапазона) и высокопроизводительным бортовым вычислительным блоком. Такая техника способна самостоятельно строить траекторию движения, обнаруживать статические и динамические препятствия, а также принимать решения о торможении или объезде без участия человека в контуре управления в реальном времени. Человек здесь выполняет функцию супервизора, вмешиваясь в процесс только при возникновении нештатных ситуаций, которые алгоритм не может классифицировать самостоятельно. В отличие от этого, техника с дистанционным управлением, или телеоперация, подразумевает, что все решения принимает человек, находящийся удаленно от забоя, часто за пределами контура карьера или даже в другом городе. Оператор видит обстановку вокруг машины через поток видеокамер высокого разрешения и передает команды на исполнительные механизмы (рулевое управление, дроссель, тормоза) через канал связи. В этой архитектуре критическим параметром становится задержка сигнала, или латентность. Если для автономной системы задержка влияет лишь на скорость обновления карты для диспетчера в центре управления, то для телеуправления задержка даже в 200–300 миллисекунд может стать причиной серьезной аварии при маневрировании на узкой транспортной берме или при подъезде к экскаватору. Таким образом, автономия перекладывает основную нагрузку с канала связи на бортовую электронику и алгоритмы искусственного интеллекта, тогда как телеуправление, наоборот, предъявляет экстремальные требования к качеству, пропускной способности и стабильности сети передачи данных.

Глубокий карьер создает уникальную среду, которая становится серьезным испытанием для любых систем автоматизации, и игнорирование этих особенностей ведет к снижению эффективности инвестиций. Первой проблемой является навигация. Подавляющее большинство автономных систем полагаются на спутниковые сигналы глобальных навигационных систем GNSS (в России преимущественно GLONASS/GPS) с коррекцией RTK для точного позиционирования. Однако по мере углубления карьера борта выработки начинают экранировать сигнал, создавая так называемые «радиотени». В нижних горизонтах, где высота борта может превышать 300–400 метров, количество видимых спутников сокращается до критического минимума, что делает невозможным получение фиксированного решения. Автономные системы вынуждены переключаться на инерциальные навигационные системы (ИНС) или использовать лидары для привязки к рельефу с применением технологий одновременной локализации и построения карт (SLAM). Это существенно удорожает комплект оборудования и требует высокой вычислительной мощности, так как алгоритмы должны работать в реальном времени без права на ошибку.

Системы дистанционного управления сталкиваются с принципиальной проблемой — обеспечением устойчивой связи. Для передачи видеопотока высокого разрешения без артефактов сжатия и команд управления требуется канал с высокой пропускной способностью и минимальной задержкой. В глубоком карьере рельеф мешает распространению радиоволн, что вынуждает инженеров устанавливать дополнительные базовые станции и ретрансляторы непосредственно на уступах. Если такой ретранслятор выйдет из строя или будет поврежден при массовых взрывных работах, вся группа машин может одновременно потерять связь с оператором. В режиме телеуправления потеря связи означает аварийную остановку техники, что парализует работу участка. Кроме того, запыленность воздуха, характерная для нижних горизонтов в сухую погоду, существенно ухудшает качество изображения с камер. Оператор-телеметрист может просто не увидеть препятствие в облаке пыли, тогда как лидары автономного самосвала способны «видеть» сквозь частичную запыленность лучше человеческого глаза, так как используют активное излучение в инфракрасном диапазоне.

Вопрос экономической целесообразности часто становится решающим при выборе технологии, однако поверхностный анализ может привести к ошибочным выводам. На первый взгляд может показаться, что телеуправление дешевле, так как не требует размещения на борту машины сложных алгоритмов искусственного интеллекта и дорогостоящих лидаров. Однако при детальном рассмотрении структуры затрат картина меняется. Капитальные затраты (CAPEX) на оснащение одного самосвала системой телеуправления включают комплект камер, приводы актуаторов, защищенный модем и антенны. Для автономной системы к этому добавятся лидары, мощные бортовые компьютеры и резервные системы навигации. Разница в стоимости оснащения единицы техники может достигать 30–40% в пользу телеуправления, что на парк из 20–30 машин составляет существенную сумму, исчисляемую сотнями миллионов рублей.

Однако операционные расходы расставляют другие акценты и часто перевешивают первоначальную экономию. При телеуправлении сохраняется необходимость постоянного присутствия оператора в контуре управления. Из-за высокой когнитивной нагрузки и необходимости постоянной концентрации внимания один человек может контролировать не более одной, максимум двух машин одновременно. При автономном режиме один супервизор способен курировать парк из 10–15 единиц техники, так как его вмешательство требуется лишь эпизодически. Это дает кратное снижение фонда оплаты труда в долгосрочной перспективе, особенно с учетом того, что квалифицированные операторы удаленного управления требуют высокой зарплаты. Кроме того, автономные системы обеспечивают более плавный и предсказуемый стиль вождения, что снижает расход дизельного топлива на 7–10% и износ шин по сравнению с ручным управлением, даже дистанционным, где человек может допускать резкие движения.

Важным фактором является стоимость инфраструктуры связи. Для телеуправления требуется сеть с минимальной задержкой (Low Latency), что часто вынуждает разворачивать частные сети 5G или прокладывать оптоволокно до каждого уступа, что крайне дорого в условиях постоянно развивающихся горных работ. В глубоком карьере, где пространство для маневра ограничено отвесными стенками, ошибка алгоритма может стоить очень дорого и привести к потере техники.

В случае с дистанционным управлением человек остается в контуре принятия решений, что обеспечивает гибкость в нестандартных ситуациях. Оператор может интуитивно оценить обстановку лучше машины, например, заметить начинающийся обвал породы по косвенным признакам. Но здесь сохраняется риск усталости оператора, потери концентрации и того самого фактора задержки сигнала. Кроме того, возникает сложный вопрос правовой ответственности. В случае аварии с автономным самосвалом сложно определить виновного: разработчика программного обеспечения, системного интегратора или владельца предприятия. При телеуправлении ответственность лежит на конкретном операторе, что юридически более прозрачно, но создает повышенную нагрузку на персонал и требует четких регламентов действий в аварийных ситуациях. В Российской Федерации нормативная база для беспилотной техники на промышленных объектах все еще формируется, что создает определенные правовые риски для инвесторов.

Анализ показывает, что жесткое противопоставление двух технологий не всегда продуктивно. Наиболее перспективным сценарием для российских глубоких карьеров видится гибридная модель, сочетающая преимущества обоих подходов. В этой схеме техника движется автономно по магистральным технологическим дорогам, где условия предсказуемы, рельеф стабилен и сигнал навигации доступен. При подъезде к зоне погрузки или разгрузки, где геометрия постоянно меняется из-за работы экскаваторов, много пыли и теряется сигнал спутников, управление может автоматически передаваться удаленному оператору для выполнения точного маневра. После завершения операции и выезда на магистраль машина снова переходит в автономный режим для транспортировки.

Для глубоких карьеров с устойчивой связью, долгосрочным планом отработки и большими объемами перевозок полная автономия выглядит экономически более привлекательной за счет снижения операционных расходов на персонал, топливо и ремонт шин. Однако в условиях нестабильного сигнала, сложной геометрии забоя и необходимости частой перестройки путей телеуправление остается важным инструментом, обеспечивающим гибкость и контроль.

Будущее отрасли лежит не в выборе одной технологии, а в их конвергенции и интеграции. Гибридные системы позволяют использовать преимущества обоих методов, минимизируя риски и максимизируя эффективность. Для студентов и молодых исследователей это направление открывает широкое поле деятельности, так как вопросы интеграции разных режимов управления,

обеспечения кибербезопасности каналов связи и адаптации алгоритмов к российским климатическим условиям остаются малоизученными. Внедрение любых систем автоматизации должно сопровождаться тщательным технико-экономическим обоснованием, учитывающим не только стоимость оборудования, но и изменение всей технологической схемы предприятия, включая подготовку кадров и обновление нормативной базы.

Список литературы:

1. Пашков Д. А., Закрасовский Д. И., Дубинкин С. Д. Технические решения автономных карьерных самосвалов // Техника и технология горного дела. 2023. №3 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnicheskie-resheniya-avtonomnyh-kariernyh-samosvalov> (дата обращения: 20.02.2026).
2. Клебанов Д. А., Макеев М. А., Сиземов Д. Н. Применение автономной и дистанционно-управляемой техники на открытых горных работах // Горная промышленность. 2020. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-avtonomnoy-i-distantcionno-upravlyaemoy-tehniki-na-otkrytyh-gornyh-rabotah> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Куваев, Д. Управляем техникой в карьерах на расстоянии. Обзор отечественных разработок. URL: https://exkavator.ru/mining/news/inf_news (Дата обращения: 20.02.2026)
3. Логинов, Е. В. Управление параметрами карьера в целях повышения эффективности использования гидравлических экскаваторов типа обратная лопата / Е. В. Логинов, Т. А. Тюленева // Уголь. – 2021. – № 12(1149). – С. 6-10. – DOI 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10.