Садовец В.Ю., Чичерин И.В., Садовец Р.В. Формирование требований к системе управления геоходом с учётом современных достижений в области интеллектуального управления подземными машинами // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2026. – № 40. – С. 97-106.

УДК 681.5:622 https://doi.org/10.26160/2658-3305-2026-40-97-106

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОХОДОМ С УЧЁТОМ СОВРЕМЕННЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫМИ МАШИНАМИ

Садовец В.Ю., Чичерин И.В., Садовец Р.В.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово

Ключевые слова: горные машины, геоход, геоходная технология, автоматизированная система управления, интеллектуальное управление, позиционирование, цифровой двойник.

Аннотация. В статье выполнен пересмотр общей структуры и требований к многоуровневой системе управления геоходом, сформулированных в 2017 г. Представлены результаты испытаний изготовленных опытных образцов геоходоов в призме разработки и отладки системы управления горной машиной, работающей под землей. Проведен анализ полученных за последние годы результатов проведенных научно-изыскательских работ, направленных на создание подземных (тоннелепроходческих) роботов. Результаты анализа формирования научных основ разработки систем управления геоходов, приведены с учётом полученных результатов стендовых и натурных испытаний опытных образцов геохода и научных результатов 2018-2026 гг. в области интеллектуального управления тоннелепроходческими комплексами, навигации подземных машин без спутниковых сигналов, цифровых двойников и предиктивной диагностики горного оборудования. Показано, что неудовлетворительная работа автоматизированной системы управления геоходом, выявленная при натурных испытаниях опытных образцов, подтверждает необходимость научно обоснованных подходов к созданию системы управления геоходов. Уточнены классы задач, решаемых системой управления геоходом, предложена обновлённая четырёхуровневая структура формирования системы управления, включающая уровень оператора и цифрового двойника, как системы управления, так и машины в целом. Сформулированы двенадцать общих требований к системе управления геоходом. Определены приоритетные направления дальнейших исследований и формирования научных основ создания системы управления геоходом.

FORMATION OF REQUIREMENTS FOR THE GEOCHOD CONTROL SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT MODERN ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF INTELLIGENT CONTROL OF UNDERGROUND MACHINES

Sadovets V.Yu., Chicherin I.V., Sadovets R.V.

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo

Keywords: mining machines, geohod, geohod technology, automated control system, intelligent control, positioning, digital twin.

Abstract. The article provides a review of the overall structure and requirements for the multi-level geohod control system, which were formulated in 2017. The results of tests of the manufactured prototype geohod systems are presented in the context of developing and debugging the control system for a mining machine operating underground. An analysis is carried out of the results obtained in recent years from research and survey work aimed at creating underground (tunnel-boring) robots. The results of the analysis of the formation of the scientific foundations for the development of geohod systems are presented, taking into account the results obtained from bench and full-scale tests of prototype geohod samples and the scientific results of 2018-2026 in the field of intelligent control of tunnel-boring complexes, navigation of underground machines without satellite signals, digital twins, and predictive diagnostics of mining equipment. It is shown that the unsatisfactory performance of the automated geohod control system, identified during full-scale tests of prototype samples, confirms the need for scientifically grounded approaches to the creation of geohod control systems. The classes of tasks solved by the geohazard management system have been clarified; an updated four-level structure for forming the management system has been proposed, including the operator level and the digital twin – both of the management system and of the machine as a whole. Twelve general requirements for the geohazard management system have been formulated. Priority areas for further research and for developing the scientific foundations for creating a geohazard management system have been identified.

Введение

Геоход представляет собой горную проходческую машину нового класса, движущуюся в породном массиве с использованием геосреды, и является базовым функциональным

элементом геовинчестерной (геоходной) технологии проведения горных выработок [1-4]. Конструкция геохода построена по модульному принципу; его основными системами являются исполнительный орган, разрушающий забой, головная и хвостовая секции, внешний движитель, трансмиссия, энергосиловая установка и транспортный модуль [2, 5-7]. Напорное и тяговое усилие геоход формирует за счёт взаимодействия винтового внешнего движителя с законтурным массивом, что предопределяет тесную взаимосвязь всех его систем.

В работе [1] была предложена общая структура многоуровневой системы управления (СУ) геоходом, сформулированы классы решаемых ею задач и десять общих требований к её подсистемам. Сделанный в той работе вывод об отсутствии научно обоснованных подходов, математических моделей и алгоритмов для систем управления геоходами за прошедшие годы получил прямое экспериментальное подтверждение: по итогам натурных испытаний опытного образца геохода модели «401», представленного на рисунке 1, в числе основных недостатков была названа неудовлетворительная работа автоматизированной системы управления [4].

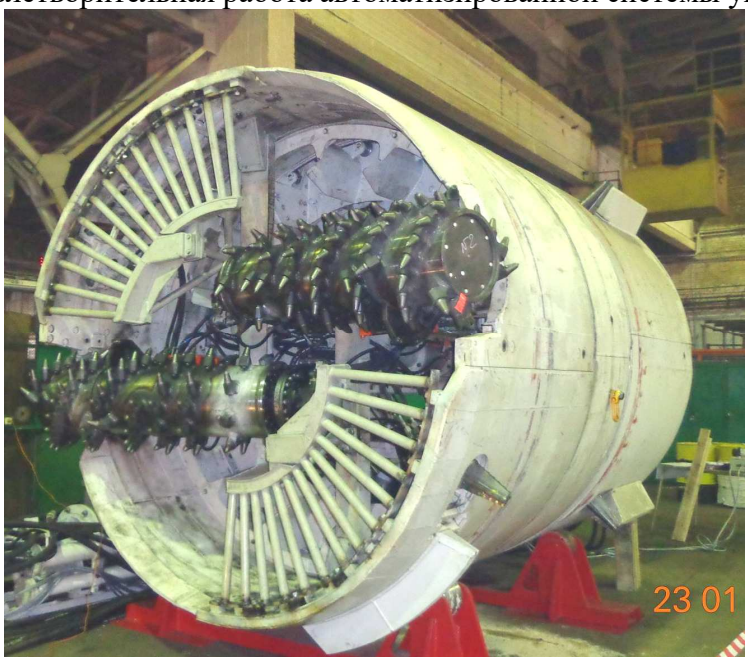


Рис. 1. Опытный образец геохода модели «401»

Одновременно в управлении тоннелепроходческими механизированными комплексами (ТПМК), навигации подземных машин и диагностике горного оборудования за 2018-2026 гг. произошёл качественный скачок, связанный с применением машинного обучения, многосенсорной навигации и цифровых двойников [8-12].

Целью настоящей статьи является актуализация общей структуры и требований к системе управления геоходом на основе анализа результатов испытаний геоходов и научно подтверждённых достижений в области интеллектуального управления подземными машинами. Рассматриваются только те подходы, эффективность которых подтверждена опубликованными экспериментальными или промышленными результатами.

Результаты испытаний геоходов и их значение для системы управления

Развитие геоходов началось в середине 1980-х годов с винтоповоротных проходческих агрегатов типа ЭЛАНГ, натурные испытания которых доказали работоспособность их систем [3, 8]. В 2016 г. на АО «КОРМЗ» были проведены стендовые испытания полноразмерного геохода модели «401» диаметром 3,2 м, в ходе которых было продемонстрировано движение геохода в стенде и штатная, взаимоувязанная работа всех его систем [3, 9, 10]. Последовавшие натурные испытания выявили три ключевых недостатка: неудовлетворительную работу автоматизированной системы управления, крупногабаритную энергосиловую систему и вращающуюся внутреннюю часть головной секции [3].

Управление опытным образцом осуществлялось по проводным каналам, а работа обеспечивалась внешней гидравлической станцией мощностью около 400 кВт, что исключало автономность машины; создание СУ, способной обеспечить дистанционную и автономную работу, рассматривалось как условие применения геоходов для аварийно-спасательных служб [11]. В 2020 г. изготовлен и испытан в стенде с речным песком демонстрационный образец диаметром 0,63 м [3, 4].

В работе [3] показано, что испытания полноразмерных образцов связаны с высокими затратами и низкой гибкостью, а применявшееся компьютерное моделирование базировалось на модели однородной изотропной геосреды и не учитывало неоднородность массива и изменчивость свойств пород. В качестве решения предложено создание лабораторных стендов для испытаний масштабных моделей геохода, изготавливаемых по технологиям трёхмерной печати, с возможностью изменения плотности и влажности эквивалента геосреды, визуализации процессов и регистрации измеряемых параметров [3].

Для системы управления из изложенного следуют три вывода: СУ геоходом является критическим элементом, определяющим работоспособность машины в целом; математическое обеспечение СУ должно строиться в расчёте на неоднородную геосреду с заранее неизвестными параметрами; алгоритмы управления могут отрабатываться на масштабных моделях в управляемых условиях стенда до переноса на полноразмерный образец.

Классы задач, решаемых системой управления геоходом

Выделенные в [1] шесть классов задач (управление движением; повышение эффективности; позиционирование; управление вспомогательными системами; диагностика; взаимодействие с оператором) сохраняют силу, однако их содержание требует уточнения.

Управление движением геохода в первом приближении сводится к управлению гидроцилиндрами и гидромоторами, приводящими в движение исполнительный орган, секции и внешний движитель [1, 6, 10], а в новых компоновочных решениях и электроприводом. В отечественной школе геоходостроения обоснована необходимость унифицированной математической модели геохода, построенной по модульному принципу («ствол модели» с подключаемыми моделями систем и модулей), что позволяет модифицировать модель при изменении компоновочных решений [13]. Существенно, что в области ТПМК задача автоматического управления движением (траекторией и ориентацией машины) уже решена на практике: опубликованы работы по автоматическому слежению за траекторией щита в сложных грунтовых условиях [14], по управлению ориентацией на основе методов машинного обучения и по динамическому прогнозу положения и ориентации щита глубокими нейронными сетями. Для геохода задача усложняется, поскольку траектория определяется согласованным управлением группой приводов при нелинейной и нестационарной реакции массива.

Повышение эффективности работы геохода подразделяется на оптимизационную и адаптивную подзадачи. Для ТПМК обе подзадачи решаются совместно: обучаемая на данных мониторинга модель «машина – геосреда» используется в контуре многокритериальной оптимизации по скорости проходки, энергопотреблению, износу инструмента и безопасности [15]; проверены подходы на основе глубокого обучения с подкреплением [16] и методы идентификации геологических условий по данным о работе машины и изображениям забоя [17, 18]. В качестве критериев оптимизации для геохода, наряду с энергозатратами на единицу пути и точностью траектории, целесообразно рассматривать ресурс режущего инструмента ножевого исполнительного органа, параметры которого исследованы в работах [7, 17, 18].

Позиционирование геохода в пространстве остаётся наиболее сложной задачей, поскольку сигналы спутниковых систем под землёй недоступны, а инфраструктурные системы позиционирования (радиометки, считыватели) невозможно заранее установить по трассе движения проходческой машины. Современное состояние этой задачи рассмотрено в разделе 3.

Управление вспомогательными системами и диагностика состояния с учётом результатов испытаний [3] и развития методов предиктивной диагностики [9, 10]

приобретают новое содержание: управление энергосиловой установкой становится частью контура энергоэффективного управления, а диагностика переходит от индикации параметров к прогнозу остаточного ресурса узлов.

Взаимодействие с оператором, помимо пульта и устройства отображения, должно предусматривать дистанционное управление с поверхности и поддержку принятия решений. Для ТПМК апробированы системы поддержки оператора, формирующие рекомендации по корректировке режима на основе обученной модели, а также концепция перехода от тоннелепроходческой машины к «тоннелепроходческому роботу» путём постепенной интеграции интеллектуальных модулей в традиционную систему управления [8, 9].

Современное состояние технологий, определяющих облик системы управления геоходом

1. Интеллектуальное управление тоннелепроходческими машинами

ТПМК являются ближайшим по функциям аналогом геохода, а накопленные при их эксплуатации данные стали основой для развития методов интеллектуального управления. В систематическом обзоре [8] зафиксирован переход от традиционных ТПМК к «тоннелепроходческим роботам» и предложена рамочная архитектура автономной работы как на уровне отдельной машины, так и на уровне группы машин; нерешёнными названы обобщающая способность моделей «машина – грунт», автоматическая настройка регуляторов, создание интеллектуальных платформ и экспериментальное подтверждение результатов. В работе [9] описаны интеллектуальные системы, методы и практический опыт создания самоуправляемого щита и отмечено, что на исполнительном уровне по-прежнему широко применяется ПИД-регулирование, тогда как интеллектуальные методы сосредоточены на уровнях принятия решений.

Обзор методов прогноза грунтовых условий впереди ТПМК [10] показывает, что наиболее широко применяются ансамблевые и глубокие методы обучения; подчёркнута важность частоты регистрации данных выше 1 Гц и их стандартизации. Для диагностики ТПМК проверены методы обнаружения неисправностей главного подшипника по вибрационным сигналам и забивания режущей головки; для оценки энергопотребления приводной системы применены глубокое обучение и гибридные физико-статистические модели.

Вместе с тем в литературе зафиксированы и ограничения: модели, обученные на действиях операторов, наследуют субъективность и случайность этих действий и едва ли могут превзойти квалифицированного оператора, что побудило к разработке моделей геологического отклика, обучаемых на объективной реакции массива на управляющие воздействия, с последующей оптимизацией методами обучения с подкреплением по накопленным данным. Отмечаются также нехватка качественных наборов данных, ограниченная оценка обобщающей способности моделей и их слабая интерпретируемость. Для геохода, по которому объём эксплуатационных данных на порядки меньше, эти ограничения являются определяющими и указывают на необходимость сочетания физически обоснованных моделей с обучаемыми компонентами [3].

2. Навигация и позиционирование в условиях отсутствия спутниковых сигналов

Базовым подходом к позиционированию без сигналов ГНСС является комплексирование инерциальной навигационной системы (ИНС) с внешними источниками коррекции: ошибки ИНС накапливаются со временем, а методы одновременной локализации и построения карты (SLAM) по лазерным сканерам деградируют в средах с малым числом геометрических признаков; их объединение в едином фильтре Калмана компенсирует недостатки каждого из методов. Дальнейшее развитие этого направления – интеграция ИНС, лазерного дальномера и стереокамер в расширенном фильтре Калмана, обеспечившая снижение среднеквадратической ошибки положения более чем на 80% по сравнению с автономной ИНС при полном отсутствии спутниковых сигналов.

Для горных выработок с однородными бестекстурными поверхностями и взрывоопасной средой исследованы многосенсорные схемы: лидар-инерциальная одометрия

с данными колёсного одометра и сверхширокополосных (UWB) мето; лидар-центричный SLAM с данными камер и инерциального блока для взрывозащищённого робота угольной шахты; сопоставление открытых лидарных SLAM-алгоритмов в подземном тоннеле. Комплексирование волоконно-оптической ИНС с лазерным измерителем скорости обеспечило на руднике Каллио (Финляндия) погрешность положения 2,83 м на трёх петлях по 6 км (0,047% пути) и 15,98 м на траверсе 22,9 км (0,070%) без внешней коррекции.

Для геохода эти результаты применимы ограниченно, поскольку машина движется в массиве, а поле зрения оптических датчиков ограничено внутренним пространством секций. Тем не менее они подтверждают предложенный в [1] принцип сочетания технологий: инерциальная и гироскопическая ориентация как основа, лазерное позиционирование относительно устья или опорных точек выработки, одометрия по ходу винтового движителя и компьютерная модель подземного пространства как средство коррекции накопленной ошибки. Дополнительным источником информации о положении и условиях работы геохода могут служить данные о нагрузках на приводы, которые для ТПМК успешно используются для распознавания геологических условий [18, 19].

3. Цифровые двойники и предиктивная диагностика

Систематический обзор [12] показывает, что цифровые двойники в сочетании с методами машинного обучения позволяют точно оценивать техническое состояние оборудования и прогнозировать срок службы критических компонентов. В горной промышленности цифровые двойники применяются для предиктивного обслуживания, оптимизации буровзрывных работ и мониторинга парка машин, однако их применение пока ограничено отдельными областями [13]. Нерешёнными проблемами остаются дефицит данных об отказах, слабая объяснимость моделей и сложность физических моделей.

Для геохода цифровой двойник на этапе создания машины служит средством отработки алгоритмов управления и обучения оператора; достоверность модели определяется адекватностью описания геосреды и должна верифицироваться по результатам стендовых испытаний масштабных моделей [3]. На этапе эксплуатации двойник становится ядром подсистемы диагностики, прогнозирующей остаточный ресурс подшипниковых узлов, гидроаппаратуры и режущего инструмента; методы, подтверждённые для ТПМК, переносимы на геоход при накоплении собственной базы сигналов.

Обновлённая общая структура системы управления геоходом

С учётом изложенного трёхуровневая структура [1] дополнена уровнем оператора и цифрового двойника, а состав подсистем среднего уровня уточнён (рис. 2).

Верхний уровень по-прежнему представляет собой информационно-управляющую систему, координирующую работу нижестоящих подсистем и обмен информацией между ними; дополнительно в него включаются модули планирования траектории, многокритериальной оптимизации режима и адаптивная модель взаимодействия геохода с геосредой. Связь между уровнями осуществляется по единой шине данных на основе открытых протоколов.

Средний уровень образуют четыре группы подсистем (рис. 2). Подсистема навигации и позиционирования выделена в самостоятельную, поскольку именно она обеспечивает верхний уровень информацией для автоматического и автономного режимов; подсистема диагностики дополнена функцией прогноза состояния.

Нижний уровень включает подсистемы управления конкретными приводами основных систем (исполнительного органа, головной и хвостовой секций, внешнего движителя) и вспомогательных систем (энергосиловой установки, транспортного модуля), а также комплекс первичных измерительных средств: гироскопические и инерциальные датчики, лазерные и лидарные измерители, датчики давления, расхода, тока, вибрации и температуры. На исполнительном уровне, как показывает опыт ТПМК [9], сохраняются классические регуляторы, а адаптивные и обучаемые компоненты располагаются на верхнем и среднем уровнях.

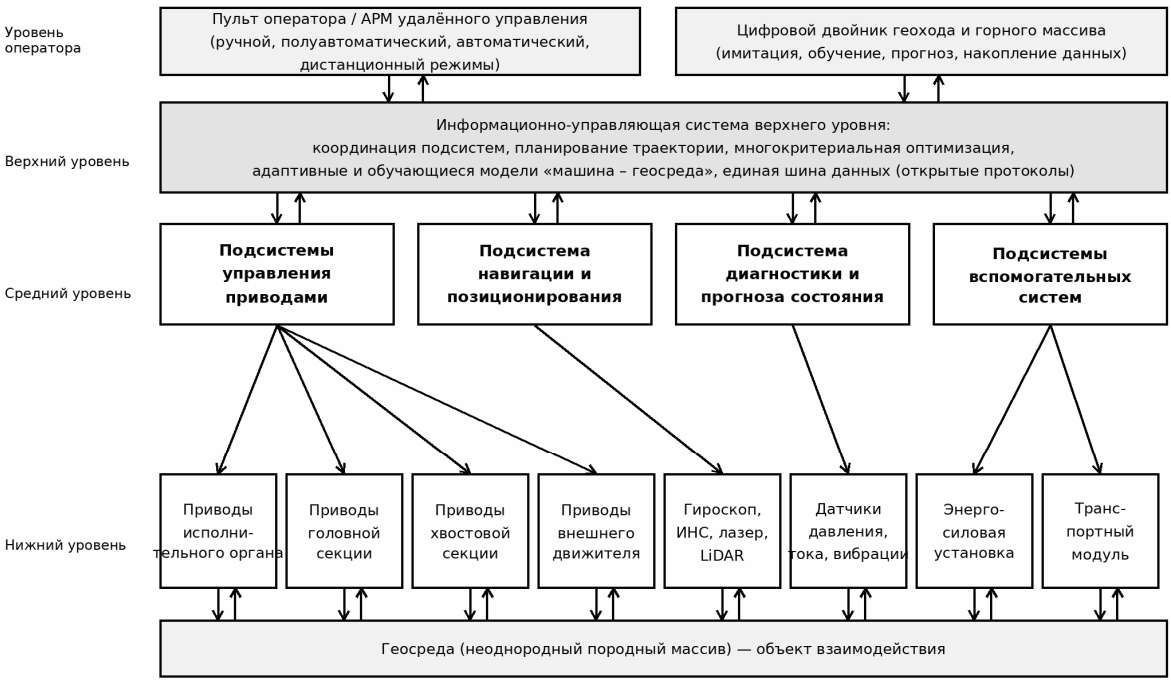


Рис. 2. Обновлённая общая структура системы управления геоходом

Уровень оператора объединяет пульт управления и автоматизированное рабочее место дистанционного управления с поверхности, реализующие ручной, полуавтоматический, автоматический и дистанционный режимы, а также цифровой двойник геохода и горного массива. Цифровой двойник связан с верхним уровнем двусторонне: он получает данные мониторинга для обновления своего состояния и передаёт верхнему уровню результаты имитационного прогноза и уточнённые параметры моделей. В таблице 1 сопоставлены функции подсистем в структуре 2017 г. и в обновлённой структуре.

Табл. 1. Сопоставление функций подсистем системы управления геоходом

Подсистема	Функции	Дополнительные функции (настоящая работа)
Верхний уровень (ИУС)	Координация подсистем, обмен информацией, взаимодействие с оператором	Планирование траектории; многокритериальная оптимизация режима; адаптивная модель «геоход – геосреда»; обмен с цифровым двойником
Управление приводами	Автоматическое управление исполнительными механизмами с учётом критериев оптимизации	Согласованное управление группой приводов для отслеживания траектории; ограничение нагрузок по данным диагностики
Навигация и позиционирование	Сочетание лазерного позиционирования, радиометок, гироскопов и компьютерной модели пространства	Комплексирование ИНС, лазерных измерений и одометрии; коррекция по модели выработки; нагрузки на приводы как косвенный источник информации
Диагностика состояния	Контроль технического состояния путём измерения и индикации параметров	Обнаружение неисправностей по вибрационным и гидравлическим сигналам; прогноз остаточного ресурса
Вспомогательные системы	Управление энергосиловой установкой, транспортным модулем, освещением	Энергоэффективное управление энергосиловой установкой; согласование транспортного модуля со скоростью проходки
Уровень оператора	Пульт управления, устройство отображения, сигнализация	Дистанционное управление с поверхности; поддержка принятия решений; цифровой двойник для обучения и прогноза

Требования к системе управления геоходом

Формирование требований к автоматизированной системе является первой стадией её создания. Следует учитывать, что в Российской Федерации стандарт ГОСТ 34.601-90, на который опирались требования 2017 г., заменён стандартом ГОСТ Р 59793-2021 «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания», а стандарты серии ГОСТ Р 51330 на взрывозащищённое электрооборудование заменены стандартами серий ГОСТ 31610 и ГОСТ IEC 60079; требования промышленной безопасности в угольных шахтах установлены федеральными нормами и правилами «Правила безопасности в угольных шахтах». Ниже приведены общие требования ко всем подсистемам СУ геоходом, уточнённые и дополненные по сравнению с [1].

1. Учёт тяжёлых условий эксплуатации (влажность, угольная пыль, метан, вибрация) и соответствие действующим требованиям промышленной безопасности и взрывозащиты.

2. Работа в реальном масштабе времени. Для каждой подсистемы должно быть обосновано время выполнения функций, обеспечивающее синхронизацию всех систем геохода. Частота регистрации данных мониторинга должна быть достаточной для применения методов машинного обучения (для ТПМК – выше 1 Гц [8]).

3. Наличие разных режимов управления: ручного, полуавтоматического, автоматического по заданной программе и дистанционного с поверхности. Должна быть предусмотрена возможность поэтапного наращивания автономности [10].

4. Преимущественно программная реализация и конфигурируемость: большая часть функциональности реализуется программно, перенастройка осуществляется изменением программных, а не аппаратных средств. Архитектура ПО должна допускать замену моделей и алгоритмов без перепроектирования системы [12].

5. Адаптивность и обучаемость. Приспособление к горно-геологическим условиям с использованием методов адаптации и самообучения. Обучаемые компоненты должны сочетаться с физически обоснованными моделями и верифицироваться на стендовых [3] и натурных данных; обучение только на действиях оператора не гарантирует превышения его результатов.

6. Использование открытых спецификаций аппаратных и программных средств для независимости от отдельных производителей. Обмен данными между уровнями – по открытым промышленным протоколам, хранение данных – в документированных форматах.

7. Надёжность. Для подсистем СУ должна быть выработана собственная система показателей надёжности. Функции, критичные для безопасности, должны реализовываться с учётом принципов функциональной безопасности; на исполнительном уровне предпочтительны детерминированные регуляторы [9].

8. Точность. Для каждой подсистемы указываются требования к точности выполнения функций, обусловленные характеристиками оборудования и математического обеспечения. Для подсистемы позиционирования точность задаётся в долях пройденного пути; ориентиром могут служить достигнутые безынфраструктурными системами значения 0,05–0,10 %.

9. Достоверность операций передачи, обработки и сохранения информации при использовании проводных и беспроводных каналов. Дополнительно: контроль целостности и подлинности команд дистанционного управления.

10. Компактность. Стремление к снижению массогабаритных характеристик всех систем геохода, включая СУ. Требование актуализировано результатами испытаний [3] и задачей создания геохода уменьшенного диаметра для аварийно-спасательных работ [4].

11. Диагностируемость и прогнозируемость состояния. Система должна обеспечивать сбор данных, достаточных для обнаружения неисправностей и прогноза остаточного ресурса критических узлов, и передавать результаты прогноза в контур управления [11, 12].

12. Верифицируемость на моделях. Алгоритмы управления должны допускать отработку на цифровом двойнике и на масштабных моделях геохода в стенде с управляемыми параметрами геосреды [3, 8].

Направления дальнейших исследований

Проведённый анализ позволяет выделить приоритетные направления исследований, опирающиеся на имеющийся научный задел.

– Разработка математической модели взаимодействия геохода с неоднородной геосредой, пригодной для синтеза управления. Основой служат унифицированная модульная математическая модель геохода [12, 19], модели ножевого исполнительного органа [7, 19] и параметры трансмиссии [13, 14]; недостающим звеном является описание неоднородности массива, требующее стендовых экспериментов [3].

– Создание подсистемы навигации и позиционирования на основе комплексирования инерциальных, лазерных и одометрических измерений с коррекцией по модели выработки. Специфической задачей для геохода является учёт винтового характера движения и использование нагрузок на приводы как источника информации [16, 17].

– Разработка подсистемы диагностики и прогноза состояния с накоплением базы вибрационных и гидравлических сигналов на стендовых и натурных образцах. Методы, подтверждённые для ТПМК [17, 18], подлежат адаптации к конструкции геохода.

– Построение цифрового двойника геохода, верифицируемого по результатам испытаний масштабных моделей [3], для отработки алгоритмов управления, обучения операторов и поддержки принятия решений [18].

– Разработка программной архитектуры системы управления, допускающей поэтапное наращивание автономности от дистанционного управления до автономного движения [8, 10], с разделением детерминированных функций исполнительного уровня и интеллектуальных функций верхнего уровня [9].

– Формирование частных требований к каждой подсистеме СУ на основе общих требований и действующей нормативной базы.

Выводы

1. Вывод [1] об отсутствии научно обоснованных подходов к созданию систем управления геоходами подтверждён экспериментально: неудовлетворительная работа автоматизированной СУ названа одним из основных недостатков опытного образца геохода модели «401» [3]. СУ должна разрабатываться совместно с механическими системами геохода.

2. В 2018-2026 гг. в смежных областях получены результаты, применимые к управлению геоходом: автоматическое управление траекторией ТПМК, многокритериальная оптимизация по обучаемым моделям, комплексирование инерциальных и лазерных измерений, предиктивная диагностика на основе цифровых двойников; их перенос требует сочетания обучаемых компонентов с физическими моделями.

3. Предложена обновлённая четырёхуровневая структура СУ геоходом с уровнем оператора и цифрового двойника, самостоятельной подсистемой навигации и позиционирования и подсистемой диагностики и прогноза состояния.

4. Сформулированы двенадцать общих требований к СУ геоходом: основные из которых в уточнённой редакции [1] и два новых – диагностируемость и прогнозируемость состояния и верифицируемость алгоритмов на моделях; учтена смена нормативной базы.

5. Приоритетные направления дальнейших исследований: разработка модели взаимодействия геохода с геосредой для синтеза управления, разработка и обоснование многосенсорной системы навигации, разработка системы диагностики и прогноза состояния, разработка верифицируемого цифрового двойника, разработка архитектуры с поэтапным наращиванием автономности.

Список литературы

1. Аксенов В.В., Чичерин И.В. Общая структура и требования к системе управления геоходом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – №6. – С. 41-46. – DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-41-46.
2. Аксенов В.В., Казанцев А.А., Пашков Д.А. Геоходная технология строительства подземных выработок: необходимость создания // Горная промышленность. – 2023. – №S2. – С. 83-89. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-83-89.

3. Аксенов В.В., Буялич Г.Д., Пашков Д.А., Романов Ю.А., Мягких И.Д. Обоснование необходимости создания стендов для испытаний моделей геохода // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – №5(181). – С. 81-87. – DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-81-87.
4. Ефременков А.Б. Разработка научных основ создания систем геохода: Дисс. … докт. техн. наук. – Кемерово, 2016. – 314 с.
5. Khoreshok A., Ananyev K., Ermakov A., Babarykin A. Estimation of the Overall Dimensions of the Outer Elements of Geokhod // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 105, p. 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503007.
6. Blaschuk M.Yu., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of geometrical parameters of geokhod transmission with hydraulic cylinders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 142, p. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012128.
7. Blaschuk M.Y., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of Free Interior Dimensions in Geohod Transmission with Hydraulic Cylinders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 127, p. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012033.
8. Аксенов В.В., Бегляков В.Ю., Гановичев С.И. Обоснование необходимости разработки унифицированной математической модели геохода // Технологии и материалы. – 2015. – №3. – С. 9-13.
9. Zhang Y., Gong G., Yang H., Li J., Jing L. From tunnel boring machine to tunnel boring robot: perspectives on intelligent shield machine and its smart operation // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2024, vol. 25, no. 5, pp. 357-381. DOI: 10.1631/jzus.A2300377.
10. Hu M., Wu B., Zhou W., Wu H., Li G., Lu J., Yu G., Qin Y. Self-driving shield: Intelligent systems, methodologies, and practice // Automation in Construction. 2022, vol. 139, p. 104326. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104326.
11. Ayawah P.E.A., Sebbeh-Newton S., Azure J.W.A., Kaba A.G.A., Anani A., Bansah S., Zabidi H. A review and case study of Artificial intelligence and Machine learning methods used for ground condition prediction ahead of tunnel boring Machines // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, vol. 125, p. 104497. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104497.
12. Барановский К.В., Рожков А.А. Особенности цифровизации и автоматизации подземной геотехнологии при переходе к роботизированным технологическим процессам на действующих рудниках // Горная промышленность. – 2025. – №5S. – С. 64-68. – DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5S-64-68.
13. Abd Wahab N.H., Hasikin K., Lai K.W., Xia K., Bei L., Huang K., Wu X. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices // PeerJ Computer Science. 2024, vol. 10, p. e1943. DOI: 10.7717/peerj-cs.1943.
14. Wang L., Yang X., Gong G., Du J. Pose and trajectory control of shield tunneling machine in complicated stratum // Automation in Construction. 2018, vol. 93, pp. 192-199. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.020.
15. Wang X., Wu J., Yin X., Liu Q., Huang X., Pan Y., Yang J., Huang L., Miao Sh. QPSO-ILF-ANN-based optimization of TBM control parameters considering tunneling energy efficiency // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2023, vol. 17, no. 1, pp. 25-36. DOI: 10.1007/s11709-022-0908-z.
16. Elbaz K., Zhou A., Shen S.-L. Deep reinforcement learning approach to optimize the driving performance of shield tunnelling machines // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023, vol. 136, p. 105104. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105104.
17. Zhang Q., Liu Z., Tan J. Prediction of geological conditions for a tunnel boring machine using big operational data // Automation in Construction. 2019, vol. 100, pp. 73-83. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.022.
18. Chen L., Liu Z., Su H., Lin F., Mao W. Automated rock mass condition assessment during TBM tunnel excavation using deep learning // Scientific Reports. 2022, vol. 12, p. 1722. DOI: 10.1038/s41598-022-05727-5.
19. Садовец В.Ю., Садовец Р.В., Резанова Е.В. Разработка параметрической модели контура режущей кромки ножа исполнительного органа геохода // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – №1. – С. 16-24. – DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-16-24.

References

1. Aksenov V.V., Chicherin I.V. General structure and requirements for the geohod management system // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2017, no. 6, pp. 41-46. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-41-46.
2. Aksenov V.V., Kazantsev A.A., Pashkov D.A. Geotechnical technology for the construction of underground workings: the need to develop it // Russian Mining Industry. 2023, no. S2, pp. 83-89. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S2-83-89.
3. Aksenov V.V., Buyalich G.D., Pashkov D.A., Romanov Yu.A., Myagkikh I.D. Justification of the need to create test benches for geohod models // Mining Equipment and Electromechanics. 2025, no. 5(181), pp. 81-87. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-5-81-87.
4. Efremenkov A.B. Development of the scientific foundations for creating geohod systems: Diss. … doct. of tech. sc. – Kemerovo, 2016. – 314 p.
5. Khoreshok A., Ananyev K., Ermakov A., Babarykin A. Estimation of the Overall Dimensions of the Outer Elements of Geokhod // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 105, p. 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/201910503007.
6. Blaschuk M.Yu., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of geometrical parameters of geokhod transmission with hydraulic cylinders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 142, p. 012128. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012128.

7. Blaschuk M.Y., Dronov A.A., Ganovichev S.S. Calculation of Free Interior Dimensions in Geohod Transmission with Hydraulic Cylinders // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 127, p. 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/127/1/012033.
8. Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Ganovichev S.I. Substantiation of the need to develop a unified mathematical model of geohod // Technologies and Materials. 2015, no. 3, pp. 9-13.
9. Zhang Y., Gong G., Yang H., Li J., Jing L. From tunnel boring machine to tunnel boring robot: perspectives on intelligent shield machine and its smart operation // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2024, vol. 25, no. 5, pp. 357-381. DOI: 10.1631/jzus.A2300377.
10. Hu M., Wu B., Zhou W., Wu H., Li G., Lu J., Yu G., Qin Y. Self-driving shield: Intelligent systems, methodologies, and practice // Automation in Construction. 2022, vol. 139, p. 104326. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104326.
11. Ayawah P.E.A., Sebbeh-Newton S., Azure J.W.A., Kaba A.G.A., Anani A., Bansah S., Zabidi H. A review and case study of Artificial intelligence and Machine learning methods used for ground condition prediction ahead of tunnel boring Machines // Tunnelling and Underground Space Technology. 2022, vol. 125, p. 104497. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104497.
12. Baranovsky K.V., Rozhkov A.A. Features digitalization and automation of underground geotechnology in the transition to robotic technological processes in existing mines // Russian Mining Industry. 2025, no. 5S, pp. 64-68. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-5S-64-68.
13. Abd Wahab N.H., Hasikin K., Lai K.W., Xia K., Bei L., Huang K., Wu X. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices // PeerJ Computer Science. 2024, vol. 10, p. e1943. DOI: 10.7717/peerj-cs.1943.
14. Wang L., Yang X., Gong G., Du J. Pose and trajectory control of shield tunneling machine in complicated stratum // Automation in Construction. 2018, vol. 93, pp. 192-199. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.05.020.
15. Wang X., Wu J., Yin X., Liu Q., Huang X., Pan Y., Yang J., Huang L., Miao Sh. QPSO-ILF-ANN-based optimization of TBM control parameters considering tunneling energy efficiency // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2023, vol. 17, no. 1, pp. 25-36. DOI: 10.1007/s11709-022-0908-z.
16. Elbaz K., Zhou A., Shen S.-L. Deep reinforcement learning approach to optimize the driving performance of shield tunnelling machines // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023, vol. 136, p. 105104. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105104.
17. Zhang Q., Liu Z., Tan J. Prediction of geological conditions for a tunnel boring machine using big operational data // Automation in Construction. 2019, vol. 100, pp. 73-83. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.022.
18. Chen L., Liu Z., Su H., Lin F., Mao W. Automated rock mass condition assessment during TBM tunnel excavation using deep learning // Scientific Reports. 2022, vol. 12, p. 1722. DOI: 10.1038/s41598-022-05727-5.
19. Sadovets V.Yu., Sadovets R.V., Rezanova E.V. Development of a parametric model of the cutting edge contour of the geohod's actuator blade // News of universities. Mining Journal. 2023, no. 1, pp. 16-24. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-1-16-24.

Сведения об авторах:	*Information about authors:*
Садовец Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных и автоматизированных производственных систем	**Sadovets Vladimir Yuryevich** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of information and automated production systems
Чичерин Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Информационных и автоматизированных производственных систем	**Chicherin Ivan Vladimirovich** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of information and automated production systems
Садовец Роман Владимирович – младший научный сотрудник, Исследовательский центр искусственного интеллекта	**Sadovets Roman Vladimirovich** – junior researcher, artificial intelligence research center
svyu.pmh@kuzstu.ru	

Получена 01.09.2026