

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ МАРКШЕЙДЕРСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ

П. Э. Вербило¹, Г. А. Иовлев¹, Н. Е. Петров¹, Г. Д. Павленко¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: В работе представлены основные аспекты моделирования особенных объектов для горных предприятий, которые не встречаются в проектах гражданских и промышленных сооружений, таких как поверхности карьеров, подземные горные выработки различной конфигурации, объемные породные блоки и земляные массы. В статье демонстрируются способы использования активно развивающегося в сфере строительства сооружений информационного моделирования, которое подразумевает создание единой информационной модели объекта, отображающей весь жизненный цикл сооружения – от проекта до эксплуатации и дальнейшей ликвидации месторождения. Это позволит избежать большинства ошибок на этапе проектирования, вести оперативный информационный контроль добычи и переработки во время подготовительных и очистных работ. На примере созданных моделей горнодобывающих предприятий демонстрируются возможности использования программного обеспечения для информационного моделирования и создания единого файла объекта, начиная от стадии проектирования до момента окончания добычных работ, а в дальнейшем учета рекультивации или использования объекта в новом функциональном назначении. Описаны перспективы использования информационных моделей объектов горных предприятий и горных выработок для календарного планирования работ и оптимизации проектов разработки месторождения, а также обмена данными между программами в процессе работы над информационной моделью.

Ключевые слова: BIM (Building information modeling – технологии информационного моделирования, ТИМ), горные работы, месторождения, обмен данными, информационное моделирование, CIVIL 3D, Dynamo, маркшейдерская съемка.

Благодарность: авторы выражают благодарность сотрудникам компании ООО «Сев. Р. Девелопмент» за оказание содействия в написании статьи и подготовке материалов, в особенности директору по цифровым технологиям Попову Александру.

Для цитирования: Вербило П. Э., Иовлев Г. А., Петров Н. Е., Павленко Г. Д. Применение технологий информационного моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–2. – С. 60–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_60.

Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations

P. E. Verbilov¹, G. A. Iovlev¹, N. E. Petrov¹, G. D. Pavlenko¹

¹ Saint Petersburg Mining University, Department of Construction of Mining Enterprises and Underground Structures, St. Petersburg, Russia

Abstract: The paper presents the main aspects of modeling objects that are special for mining enterprises and not found in projects of civil and industrial structures, such as: quarry surfaces, underground mine workings of various configurations, rock blocks and ground masses. The article demonstrates ways to resort to information modeling, which is actively developing in the field of construction of facilities, which implies the use of a single information model of the object, reflecting the entire life cycle of the building – from the project to the operation and further liquidation of the deposit. This will help to avoid most errors at the design stage, to conduct operational information control of production and processing during preparatory and extraction. On the example of the created models of mining enterprises, the possibilities of using software for information modeling and a single object file are demonstrated, starting from the design stage, until the end of mining operations, and then taking into account the reclamation or use of the object in a new functional purpose. The prospects of using information models of mining facilities and mine workings for calendar planning of work and optimization of field development projects, as well as data exchange between programs in the process of working on the information model are described.

Key words: BIM, TIM, mining operations, input/output, information modeling, CIVIL 3D, Dynamo, underground measurement.

Acknowledgements: authors express their gratitude to the employees of Sev. R. Development LLC for their assistance in writing the article and preparing materials, especially to Alexander Popov, Director of Digital Technologies.

For citation: Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):60–79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_60.

Введение

Горные предприятия являются комплексными и динамичными объектами, которые изменяются на протяжении всего жизненного цикла, то есть от этапа прогнозирования запасов до ведения очистных работ и ликвидации месторождения. При этом от временного фактора зависит не только состояние объёмов и форма добычи полезных ископаемых (карьер, рудник, шахта), но и обрабатывающий комбинат, обоганительные фабрики, административные объекты и объекты социального назначения, которые нуждаются в постоянном контроле состояния различных систем: оборудования, инженерных систем производственно-технического обеспечения (вентиляция, пневмопровод, водопровод) и требуют гибкого учёта изменений для соответствия текущему состоянию всего комплекса.

Подземное сооружение необходимо рассматривать как видоизменяемый

георесурс, позволяющий реализовывать его многофункциональное качество. Ввиду этого необходимым элементом проработки вариантов концепции полного инновационного цикла комплексного использования подземного пространства, а также развития теории стратегического управления освоением георесурсов [1] является возможность внедрения ТИМ от предпроектных работ до рекультивации отработанных месторождений и горных выработок.

Использование ТИМ в части BIM-технологий для объектов наземного строительства достаточно распространено в мире и получает всё большее распространение в РФ. В то же время информация о способах и возможностях использования ТИМ для строительства горнодобывающих предприятий и их применения для дальнейшей эксплуатации крайне ограничена. В статье рассматривается возможность внедрения ТИМ на объектах горнодобывающей отрасли

(подземные и открытые месторождения) для отслеживания объемов выполняемых горных работ и скорости их выполнения, при этом перспективы от подобного внедрения гораздо шире, чем те, что рассмотрены в настоящей работе.

Важное отличие применения программ параметрического моделирования, используемых BIM, от традиционных САПР-инструментов — это возможность не только отображать геометрию создаваемого объекта в 3D, но и каждому созданному элементу присваивать определенные параметры [2], на основании которых можно легко выводить сводную информацию. Например, спецификации на этапе проектирования, которые позволяют определить объемы руды по степени подготовленности на этапе эксплуатации.

Решение об использовании информационных технологий уже на этапе проектирования горного предприятия может оправдать трудозатраты на их внедрение и полноценное использование. При правильной реализации такой подход позволит уменьшить ресурсозатраты, связанные с потерей данных и их повторной обработкой в процессе обмена информацией, а также снизить время согласования и контроля заданий [3]. Современный опыт говорит о том, что 3D-моделирование уже применяется при создании детализированных цифровых моделей месторождений с учетом содержания полезных ископаемых, модели рельефа местности, динамической модели системы горных выработок, модели размещения объектов генерального плана горного предприятия и его инфраструктуры. Однако процессы строительства и эксплуатации горного предприятия подразумевают под собой смежные работы по извлечению породы, поэтому статическая 3D-модель горного предприятия не может использоваться на протяже-

нии жизненного цикла месторождения — необходим обязательный учет в информационной модели как минимум еще одного измерения — времени.

Частично эти проблемы решаются в современном программном обеспечении — ГГИС (горно-геологических информационных системах), в которых создается база данных месторождения, анализируются данные геологоразведки и рельефа с дальнейшей возможностью планирования месторождения, оценивается степень подготовленности его запасов. Однако концепция информационного моделирования не реализована в ГГИС как методический подход для обеспечения жизненного цикла горного предприятия.

Полноценное использование преимуществ информационного моделирования может происходить и в рамках ГГИС в совокупности с программным обеспечением, активно применяющимся в гражданском строительстве [4] и промышленности, которое бы дополняло ГГИС возможностью оперативного контроля ведения работ, временным графиком, а также удовлетворяло текущим требованиям к автоматизации и цифровизации проектных и иных работ на протяжении жизни модели объекта. Под временным графиком в процессе информационного моделирования понимается не визуализация процесса строительства сооружения, а более широкая задача — стратегия планирования и взаимной увязки технологических и вспомогательных процессов на протяжении возведения объекта. В мире уже есть примеры удачного выбора технологии строительства и концепции эксплуатации сооружения на основе создания временных графиков [5 — 7]. Следует отметить, что помимо включения временного фактора в модель (4D) возможно учитывать также сметные затраты на этапе строительства горно-

добывающего предприятия и связанных с ним объектов (5D) или другие количественные показатели — объемы работ, а также использовать созданный информационный прототип для отслеживания состояния различных систем на этапе эксплуатации (6D), в совокупности с оценкой рисков, которая в настоящее время в ключе развития баз данных и нейронных сетей становится все более рентабельной и необходимой [8—10].

В работе приведен пример реализации ТИМ при проектировании и контроле ведения горных работ с помощью базового функционала продуктов Autodesk: Revit, Navisworks, CIVIL 3D, ReCap, а также модуля для визуального программирования Dymato. Исходные данные, такие как контуры карьера или схема разработки месторождения подземным способом, могут быть получены из ГГИС экспортом в dxf-файл. ПО компании Autodesk использовано в работе следующим причинам:

- с помощью комплекта программ могут быть охвачены все разделы проектирования, а обмен данными между разделами не отражается на качестве данных и прост в реализации;

- поддержка ПО сторонними производителями, возможность использования плагинов, в том числе и пользовательских, для расширения функционала программ;

- свободный обмен данными с ПО других производителей;

- широкое сообщество пользователей и возможность обмена опытом в решении нестандартных задач.

В статье рассмотрены проблемы методов, которыми на сегодняшний день осуществляется контроль ведения горных работ на предприятиях по добыче и обогащению полезных ископаемых, разрабатываемых открытым и подземным способами.

Методы

В работе рассматривались возможность обмена информацией между организациями по контролю ведения горных работ, а также среди программ на различных этапах проектирования горно-обогатительного комбината и разработки месторождения, необходимость применения визуального программирования. В качестве программного комплекса для создания проектной модели и контроля ведения горных работ использовались продукты компании Autodesk, предназначенные для информационного моделирования объектов капитального строительства.

Контроль ведения очистных/подготовительных работ на горном предприятии на сегодняшний день может быть осуществлен различными способами, примеры которых показаны на рис. 1.

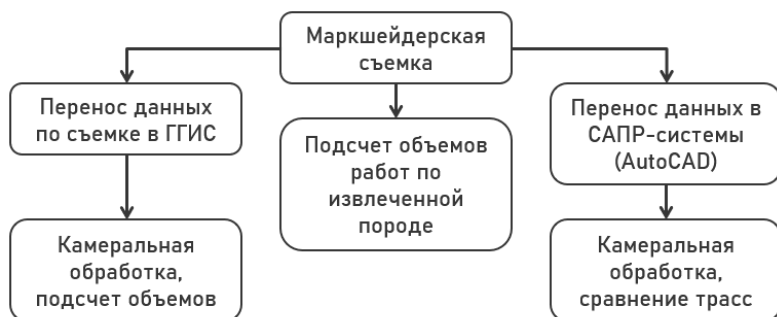


Рис. 1. Пути осуществления контроля ведения горных работ (составлено авторами)
 Fig. 1. Methods of control of mining operations (compiled by the authors)

Для осуществления учета извлеченной горной/рудной массы вручную или с помощью САПР-систем пользуются, например, методом вертикальных сечений — то есть вычислением объема между двумя параллельными сечениями примерно одинаковой (среднее арифметическое площадей на длину участка) или разной формы (рис. 2). На рис. 2, а представлены сечения проектной и фактической выработок в одном поперечном сечении. Если осуществлена съемка соседнего сечения, то подсчет объемов работ становится возможным. Помимо методов вертикальных сечений для контроля и учета ведения открытых работ применяют методы горизонтальных сечений и объемной палетки [11].

Оперативный учет добычи производится по объемам вскрыши/горной/рудной массы, которые фактически поступают из подземных горных выработок либо из карьера и обычно выражаются в массовой или весовой форме.

Еще один вариант контроля ведения горных работ — импорт и обработка данных в ГГИС, которые содержат в себе инструменты для вычисления объемов горных масс.

Однако контроль и учет горных работ осложняется следующими факторами:

- высокая стоимость комплектов лицензий и узкий круг специалистов, работающих в современных ГГИС;

- невозможность работы с данными маркшейдерской съемки как с твердотельной геометрией, и как итог — получение данных об объемах лишь в численной форме;

- существует определенная погрешность при работе в САПР и вычислении объемов одним из вышеперечисленных методов, ввиду приближения вычислений к нахождению объемов правильных геометрических фигур;

- при оперативном учете разубоживание породы затрудняет подсчет объемов рудной массы.

Итак, контроль ведения горных работ существующими методами обладает недостатками, главный из которых заключается в невозможности визуализации получаемой информации и своевременном обновлении результатов съемки.

В процессе возведения объектов капитального строительства, в соответствии с техническим регулированием строительной отрасли, мероприятия по контролю качества и объемов выполняемых работ осуществляются строительным контролем (заказчика, генподрядчика и в ряде случаев службами

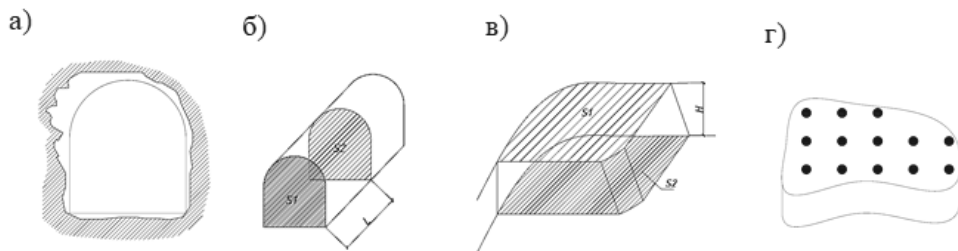


Рис. 2. Методы учета извлеченной горной/рудной массы: а — проектное и фактическое сечения выработок; б — метод вертикальных сечений; в — метод горизонтальных сечений; г — метод объемной палетки (авторский)

Fig. 2. Methods for accounting extracted rock/ore mass: a — design and actual sections of workings; b — the method of vertical sections; c — the method of horizontal sections; d — volumetric pallet method creator-owned (compiled by the authors)

государственного архитектурно-строительного надзора). Функционал данных служб по отслеживанию объемов выполняемых работ во многом соответствует мероприятиям по контролю ведения работ на горном предприятии. Использование методов отслеживания хода выполняемых работ с помощью технологий информационного моделирования в строительной сфере может быть заимствовано для мероприятий по контролю ведения работ на горном предприятии.

При этом в среде информационного моделирования необходимо достигнуть ряда задач:

- беспрепятственно переходить к твердотельной геометрии извлекаемых горных масс или создаваемых земляных сооружений;
- находить объемы извлеченных пород (или насыпей) для вычисления объемов горных работ;
- совмещать геометрию горных выработок и информационную модель поверхностных сооружений для созда-

ния полной информационной модели горного предприятия.

Создание проектной модели подземных горных выработок

В качестве исходных данных для создания проектной модели рудника служил файл формата .dxf, экспортированный из ГГИС MICROMINE. Полученный файл использовался как подложка для моделирования в программном комплексе Autodesk Revit, причем при импорте .dxf подложки ее абсолютные координаты сохраняются.

В дальнейшем процесс создания проектной модели можно будет ускорить, если разработать средство для корректного переноса геометрии из ГГИС в Revit. В данном случае проектная модель создавалась вручную, тем не менее временные трудозатраты можно оценить как несущественные. Смоделированная сеть выработок общим объемом 261 тыс. м³ и общей длиной трассы 12 км представлена на рис. 3.

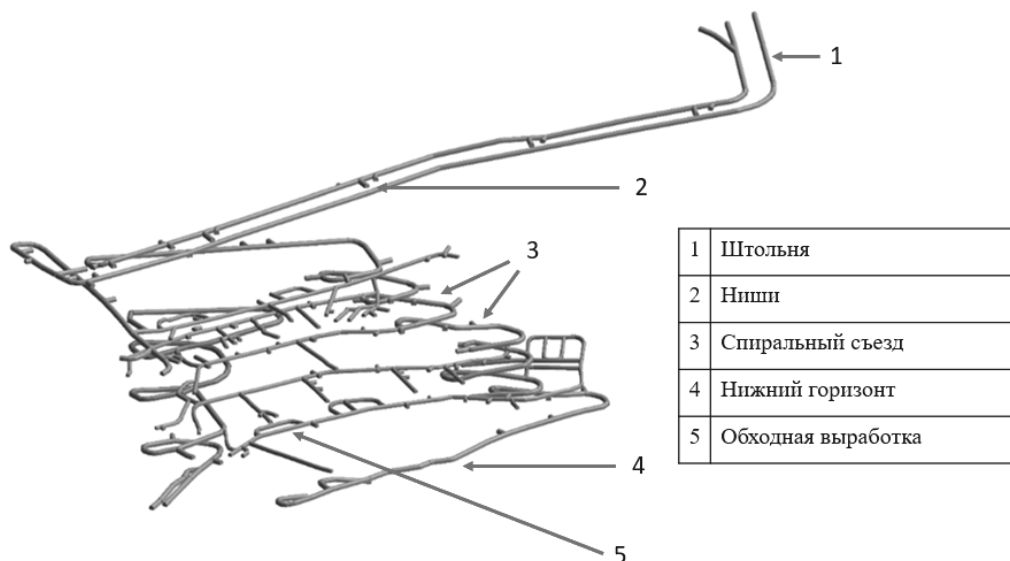


Рис. 3. Проектная модель сети подготовительных выработок (составлено авторами)
 Fig. 3. Project model of a network of preparatory mines (compiled by the authors)

Сравнение объемов на обходной выработке
Comparison of volumes on by-path

Объемы участков переходов между камерами, м ³	Варианты построения криволинейных участков горных выработок			
	а — пересекающиеся объемы выработок	б — плавные переходы между сечениями камер	в — объединение в сплошное тело	г — удлинение до перекрытия
1	45.8	44.5	—	48.8
2	9.2	9.4		9.6
3	14.5	15.2		16
4	46.2	44.2		48.6
5	17.6	17.6		18.1
6	14.2	14.3		14.5
7	11.8	12		12.3
8	32.6	32		33.7
9	31.1	30.6		32.3
10	17.7	17.7		18.2
11	16.3	16.4		16.7
12	25.1	24.9		25.7
13	17.7	17.7		17.8
Общий итог	299.8	296.5	285.56	312.3
Объемы выработок, м ³	1264.14			
Суммарный объем камер, м ³	1563.94	1560.64	1549.7	1576.44
Отличие, %	0.92	0.71	Эталонный	1.73

При создании проектной модели рудника, представленной выше, возник ряд трудностей. Одна из проблем заключалась в том, что в Autodesk Revit нет базовых инструментов, которые бы позволяли свободно моделировать подземные горные выработки. Встроенный модуль для визуального программирования Dymato позволяет расширить возможности Revit по работе с геометрией и создать несколько вспомогательных инструментов, которые бы сделали возможной работу по созданию подземных горных выработок.

В качестве вспомогательного инструмента был использован скрипт в среде Dymato, создающий сопряжение двух прямолинейных участков выработок заданного сечения и при этом позволя-

ющий вычислять объем получившейся геометрической фигуры. Различные варианты такого сопряжения представлены в таблице и на рис. 4.

Сравнение различных способов показало, что существенной разницы в объемах выемочных работ на одном криволинейном участке практически не наблюдается, а в масштабах рудника разница между истинным и моделируемым объемами будет меньше 1%.

Поэтому был принят второй способ как наиболее достоверно отображающий геометрию горных выработок.

Также существует необходимость расширять выработанное пространство на крутых поворотах или сопряжениях различных горных выработок, для того чтобы эти участки удовлетворяли экс-

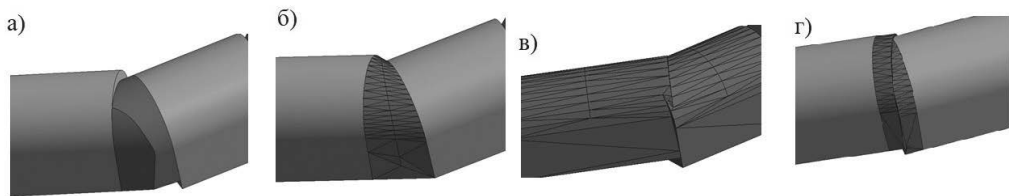


Рис. 4. Варианты сопряжения двух прямолинейных участков выработок: а — пересекающиеся объемы выработок; б — плавные переходы между сечениями; в — объединение в сплошное тело; г — удлинение до перекрывания (авторский)

Fig. 4. Options for pairing two straight sections of workings: a — overlapping volumes of workings; б — smooth transitions between sections; в — merging into a solid body; г — lengthening to an intersection (compiled by the authors)

платационным требованиям к подземным горным выработкам, а также для бесперебойной работы техники. Для этого необходимо было разработать скрипт, который бы подбирал допустимое (большее в объеме) сечение для участка сопряжения. Результат работы скрипта представлен на рис. 5.

Результаты исследования

Так как горные работы чаще всего ведутся буровзрывным способом и контур выработок может сильно отличаться от их проектных сечений, как на рис. 6, — не менее важным аспектом является перенос съемочных данных, полученных в ходе строительства или эксплуатации горного предприятия, в проектную модель для осуществле-

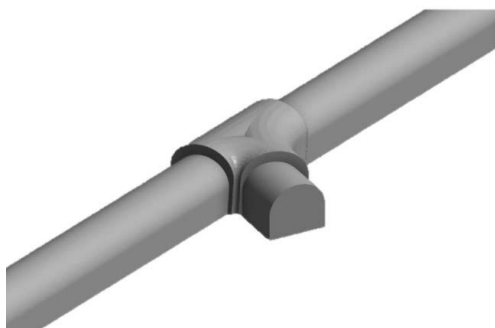


Рис. 5. Сопряжение горных выработок (составлено авторами)

Fig. 5. Coupling of mine workings (compiled by the authors)

ния контроля объёмов выполненных работ.

Для того чтобы получать истинные размеры и формы подземной выработки, необходимо производить маркшейдерскую съемку на протяжении всего времени возведения участка и переносить эти данные в информационную модель, используя скрипт. Для повышения скорости и достоверности создания фактической модели выработанного пространства при выполнении съемки следует соблюдать следующие условия:

1) количество точек в каждом сечении должно быть одинаковым для отдельно взятого участка модели, который необходимо отобразить;

2) съемка для каждого сечения должна начинаться из одной и той же характерной точки поперечного сечения и в одном направлении (по/против часовой стрелки).

От количества точек напрямую зависит точность модели, причем на криволинейные участки сечения (своды) должно приходиться большее число точек. Результат работы скрипта представлен на рис. 6, а.

С помощью данного метода можно также отражать геометрические формы любой сложности, однако стоит придерживаться вышеописанных правил съемки, что в ситуации ведения под-

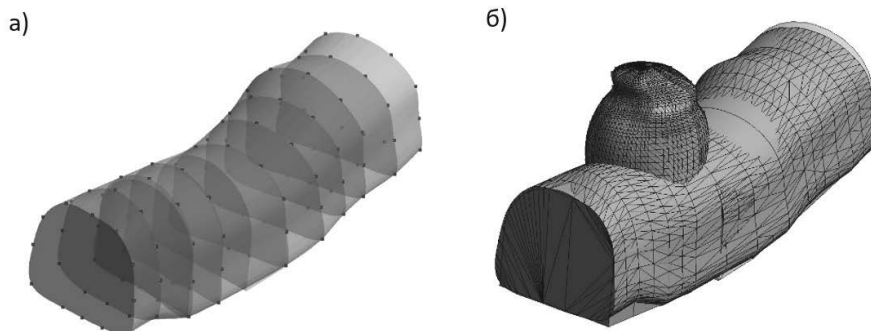


Рис. 6. Построение модели выработки по результатам маркшейдерской съемки: а – результат построения по маркшейдерским данным выработки изменяющегося поперечного сечения; б – результат построения вывала при обрушении в своде выработки (составлено авторами)

Fig. 6. Construction of a working model based on the results of mine surveying: a – the result of the construction according to the surveying data of the workings of a changing cross-section; b – the result of the modeling of a rock failure during a collapse in the arch of the mine (compiled by the authors)

земных горных работ не всегда простая задача. Тем не менее такая возможность существует, если будет необходима дальнейшая детализация модели. Так, например, можно отображать вывалы, произошедшие при обрушении свода (см. рис. 6, б).

Перспективой дальнейшего развития может служить создание софта или инструмента, который бы позволил мгновенно отображать фактические выполненные работы по полученным данным с приборов маркшейдеров, при этом инженерная работа будет связана не с редактированием геометрии, а с её проверкой после автоматического создания на корректность отображения.

Связь моделей, обработка данных

В результате имеются проектная модель – то, как должна выглядеть сеть горных выработок, и фактическая модель – то, как сеть горных выработок выглядит по факту выполненных работ (рис. 7). Используя программный комплекс Autodesk Navisworks, можно осуществлять контроль ведения горных работ в информационной модели.

Функционал программы также позволяет связывать имеющиеся модели с графиком ведения работ и осуществлять оперативный мониторинг проходки горных выработок.

Благодаря такой связи появляется возможность постоянного обновления информации о пройденных участках главных, подготовительных или очистных выработок, а также добавления замечаний или комментариев во время ведения горных работ (см. рис. 7, а).

Отслеживание во времени процесса проходки осуществляется за счёт применения цветовой индикации в зависимости от этапа создания горной выработки, например: зарядание шпуров (желтый), проходка, выемка породы, крепление (красный), эксплуатируемый участок горной выработки (зеленый) и так далее (рис. 7, б).

Контроль ведения горных работ на разработке открытым способом

Контроль ведения открытых горных работ на этапе эксплуатации подразумевает отслеживание объемов извлекаемых горных масс и полезного ископа-

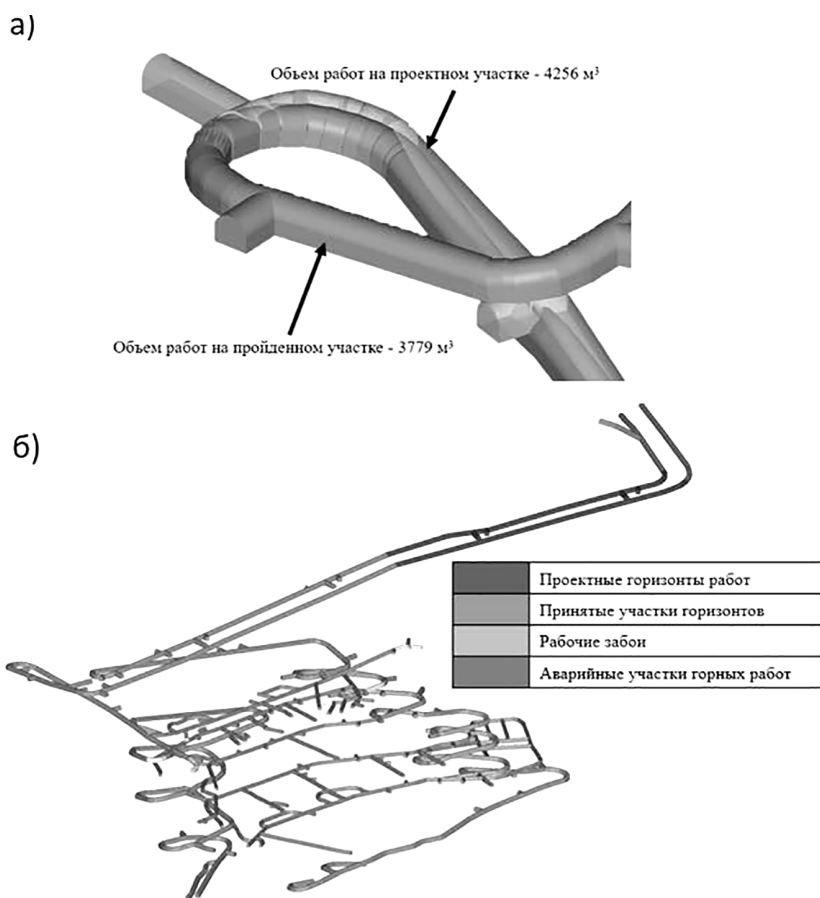


Рис. 7. Сравнение проектных и фактических объемов работ с использованием моделей: а – на локальном участке выработки; б – на глобальном участке рудника (составлено авторами)
 Fig. 7. Comparison of design and actual volumes of work using models: a – at the local area of working; b – on the global site of the mine (compiled by the authors)

емого, создаваемых земляных насыпей и откосов, планирование территории и горных предприятий, а также соблюдение соответствия плановых и фактических показателей добычи на горном предприятии.

В связи с этим возникает необходимость создания трехмерной геометрии на основе следующих исходных данных (рис. 8):

- данные лазерного сканирования и облачной съемки [12];
- данные маркшейдерской съемки [13, 14];

- импортированные данные из ГГИС в форматах .dxf и др [15, 16].

Ниже описаны основные методы построения поверхностей по съемочным данным и инструменты работы с ними. Также представлены алгоритмы, применяемые для получения объемов работ, и перспективы создания единой строительной модели горного предприятия.

Создание поверхностей на основе данных маркшейдерской съемки

Данные маркшейдерской съемки, часто являющиеся табличным файлом



Рис. 8. Способы воссоздания топоповерхности: а – топоповерхность карьера в CIVIL, полученная с помощью алгоритмов триангуляции; б – топоповерхность Revit; в – данные маркшейдерской съемки в пространстве Dynamo (составлено авторами)

Fig. 8. Methods to recreate a toposurface: a – the toposurface of a open-cast in CIVIL, obtained using triangulation algorithms; b – toposurface Revit; c – surveying data in the Dynamo space (compiled by the authors)

с записанными координатами точки, ее высотной отметкой, именем и уникальным кодом (который может означать, например, к какому геометрическому объекту относится точка), для дальнейшей работы в CIVIL 3D следует импортировать в текстовый формат или привести к иному виду.

После этого необходимо импортировать данные съемки и воссоздать по ним поверхность, выбрав необходимый массив точек, с помощью алгоритмов триангуляции (результатом будут являться данные формата «mesh» или «сетка»):

Таким образом, анализ группы точек и построение поверхности [17] происходит достаточно быстро, далее ее необходимо экспортировать в формат .dxf для подгрузки САПР-данных и построения на ее основе топоповерхности в Autodesk Revit (рис. 8, а, б):

Альтернативный способ получения топоповерхности в Revit [18, 19] – создание ее непосредственно в пространстве Дупато после анализа .xls-файла (рис. 8, в). Создать ее без скрипта не представляется возможным из-за ошибок совпадения у некоторых точек X, Y – координат, ввиду чего сначала нужно применить фильтр к точкам и отсеивать совпадающие (алгоритмы

CIVIL 3D делают это самостоятельно без участия пользователя).

Итоговые данные получаем в формате топоповерхности (для Дупато – сетка или mesh), поэтому в дальнейшем может понадобиться использование пакетов-расширений для Дупато в целях преобразования сетки в топографию Revit [20].

После этого топоповерхность готова к дальнейшему созданию на ее основе твердотельной геометрии (рис. 9).

При необходимости элемент можно обрезать по контуру требуемой формы, например, если нужно провести локальное сравнение объемов (на одном горизонте, в пределах дна котлована).

Также стоит отметить, что топография, полученная на основе любых исходных данных, подлежит редактированию как средствами Revit для работы с топографией, так и множеством инструментов CIVIL по работе с поверхностями и рельефом.

Создание поверхностей на основе облаков точек и данных лазерного сканирования

Существуют различные способы построения поверхности на основе данных облачной съемки, однако после получения поверхности способ соз-

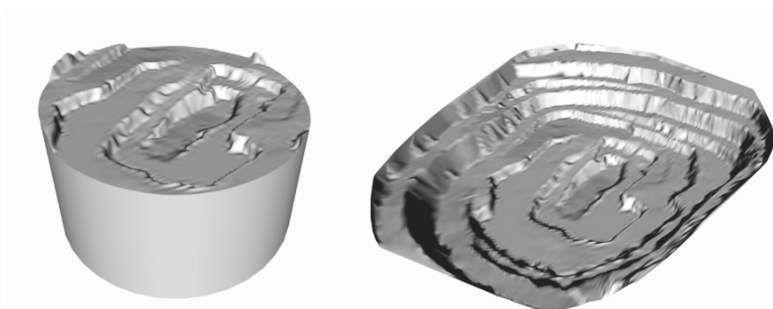


Рис. 9. Тело, полученное из топоповерхности (составлено авторами)
 Fig. 9. Solid from toposurface (compiled by the authors)

дания на ее основе геометрии Revit не отличается от всего вышеперечисленного, при этом стоит упомянуть только некоторые различия.

Данные маркшейдерской съемки могут быть получены в формате .las, после чего их необходимо обработать в Autodesk Recap, при необходимости обрезать, удалить лишние точки и пересохранить в формате .gcr, который можно использовать как один из форматов облаков точек в CIVIL 3D (рис. 10).

Инструменты для работы с облаком точек позволяют воссоздать поверх-

ность рельефа на основе таких параметров, как количество точек, способ триангуляции и аппроксимации поверхности.

Полученная поверхность редко удовлетворяет требованиям качества из-за так называемых «шумов» — строительной техники, антенн и радиопередатчиков, стрел кранов и прочего, то есть точек, не принадлежащих земной поверхности, поэтому необходимо проанализировать полученную поверхность на наличие нарушений и дефектов, искажающих данные об объеме работ.

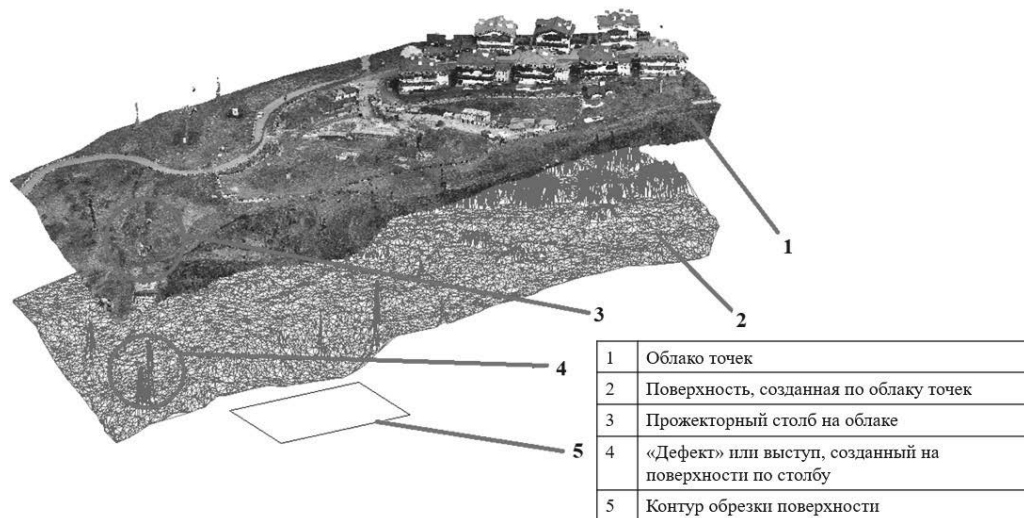


Рис. 10. Облако точек в CIVIL 3D и процесс анализа облака точек (составлено авторами)
 Fig. 10. Point Cloud in CIVIL 3D and the point cloud analysis process (compiled by the authors)

После редактирования поверхность экспортируется в .dxf-файл и далее присоединяется к Revit как связь для создания топографии.

Скрипт Дупато позволяет найти объемы, заключающиеся между двумя поверхностями, то есть отразить геометрию выемочного пространства или насыпи (рис. 11).

На рис. 11, а, б бежевым цветом показан объем от ранней поверхности до поздней (объем насыпи), а коричневым — объем от поздней поверхности до ранней (объем выемки).

Цветовая индикация позволяет классифицировать породные блоки на степень их разработки, например: подготовленные к буровзрывным работам (зеленый), извлекаемые (желтый), балансовые, забалансовые и так далее.

Информационная модель также позволяет вести календарное планирование и отслеживание хода ведения горных работ (рис. 12).

Обсуждение результатов

Рассмотрены различные возможности информационной модели, выполненной в определенной программной среде, для контроля ведения подземных и открытых горных работ. Современные методы позволяют создать единую модель горного предприятия для наполнения ее информацией о проекте выполнения работ, о модели наземного обрабатывающего комплекса, дополнять постоянно обновляющейся информацией о проходке и выемке, а также об экономических показателях данного процесса на каждом этапе разработки месторождения полезных ископаемых.

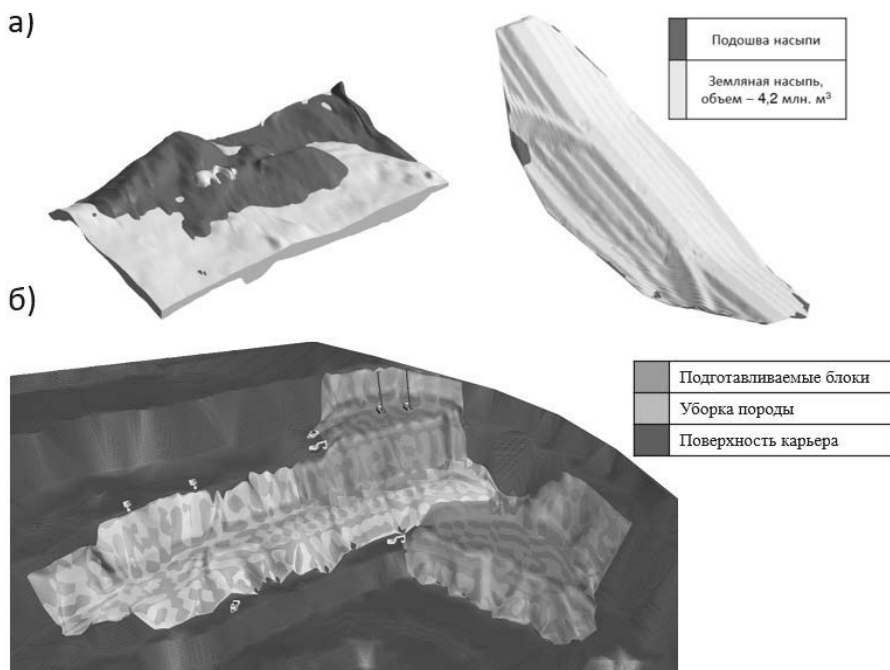


Рис. 11. Определение объемов работ: а — визуализация объемов работ; б — цветовая индикация породных блоков (составлено авторами)

Fig. 11. Definition of scope of work: a — visualization of the scope of work; б — color indication of the rock blocks (compiled by the authors)

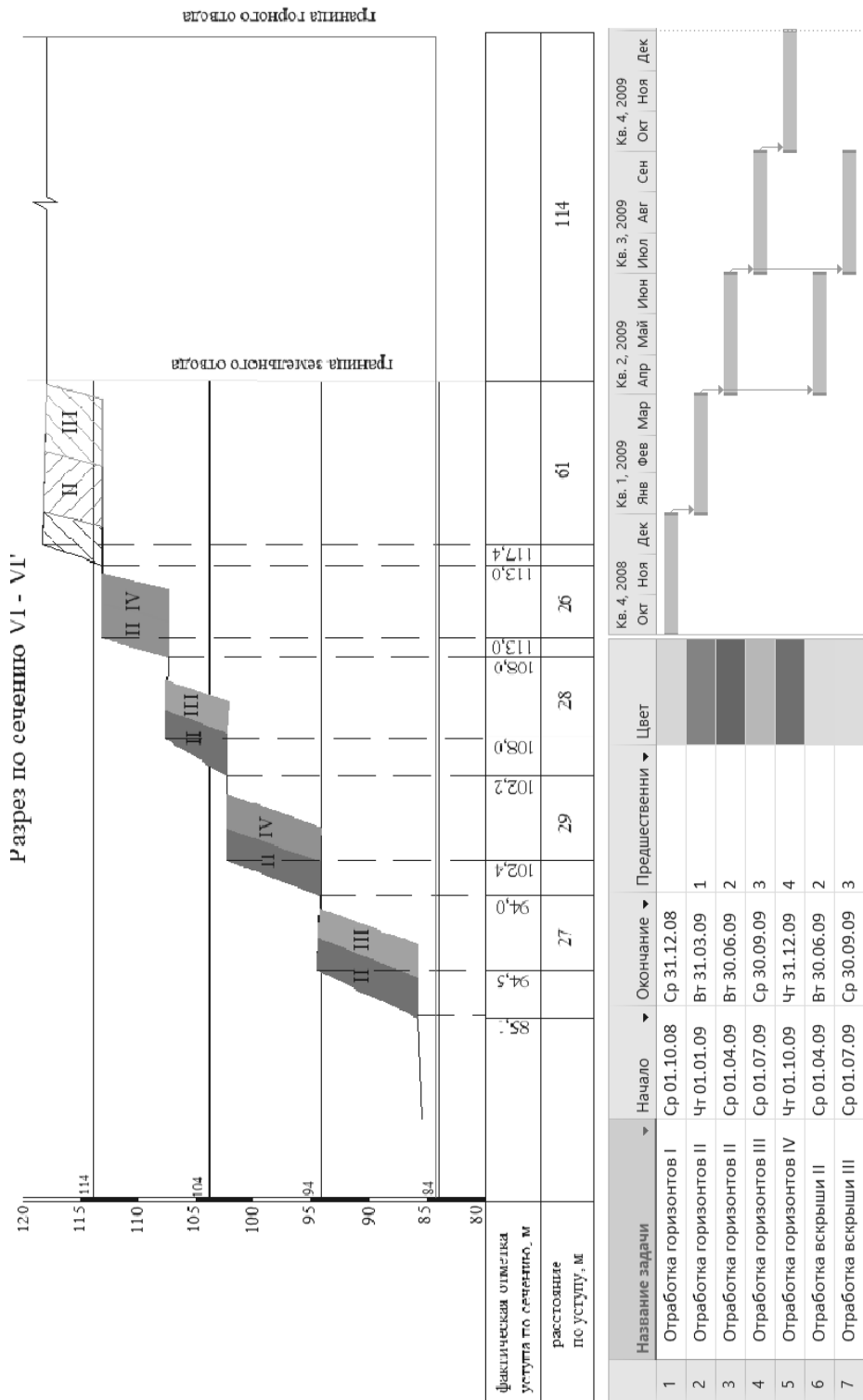


Рис. 12. Временной график и диаграмма Ганта (составлено авторами)
 Fig. 12. Timeline and Gantt chart (compiled by the authors)

В рамках комплексного освоения подземного пространства в работе представлен пример связи проектной и фактической моделей горных работ, выполняемых во время стадии проекта разработки и эксплуатации месторождения полезных ископаемых соответственно, что позволяет контролировать правильность ведения горных работ, а также отслеживать временные и экономические показатели.

Результаты исследования также показали, что несмотря на сложность внедрения технологий информационного моделирования, а также трудоемкость автоматизации и увязки процессов в единую систему разработки проекта, такие инновации позволяют в дальнейшем реализовать комплексный информационный подход к разработке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и обеспечить достижение технически более совершенного подхода к планированию горных работ.

Заключение

Современные реалии развития горно-геологических информационных систем, а также повышение качества и сложности горных работ требуют комплексного информационного подхода к их планированию и контролю в единой цифровой среде [21]. Необходимо использовать все инструменты ГГИС по обработке и хранению данных, а также экономическому обоснованию схемы освоения месторождения, логистическому и диспетчерскому сопровождению горных работ, но при этом в полной мере руководствоваться теми достижениями практики промышленного и гражданского строительства, которые применяются на сегодняшний день в строительной отрасли.

Компании, выделяющие средства на внедрение информационных техно-

логий и развитие комплексного подхода к процессу создания и реализации проекта, отмечают многочисленные преимущества ТИМ [22–24] при проектировании и эксплуатации подземных сооружений, инфраструктурных сооружений и горных предприятий. Опыт таких организаций, как зарубежных, так и отечественных, позволяет сделать вывод о том, что финансовые риски оправданы не только повышением качества проектов и готовой продукции, но также долговечностью, безопасностью [25] и прибыльностью в долгосрочной перспективе таких объектов. Этот тезис подтверждается еще тем, что строительство и эксплуатация горного предприятия всегда сопровождаются крупными финансовыми затратами, а также высоким уровнем ответственности сооружений и требований к организации работ. В то же время крупные предприятия, в отличие от средних и малых [26], способны выделить больше средств на внедрение и развитие технологий информационного моделирования, повысив качество выполняемых работ [27]. Также стоит отметить немаловажный фактор — в особенности для современных тенденций освоения месторождений полезных ископаемых — влияние на окружающую среду [28]. Наличие возможности создания полноценного цифрового прототипа горнодобывающего предприятия на этапе проектирования или эксплуатации позволяет реализовать комплексный подход при освоении подземного пространства, принимая своевременные решения по реагированию на возможные негативные последствия для экологии.

Вклад авторов

Вербилло П. Э. — постановка задачи исследования, выполнение работы по систематизации материала, анализ

данных исследования, редакция текста статьи.

Иовлев Г. А. — постановка задачи исследования, выполнение работы по систематизации материала, анализ данных исследования, редакция текста статьи.

Петров Н. Е. — генерация идеи для исследования, получение данных

для анализа, анализ данных исследования, написание текста статьи.

Павленко Г. Д. — генерация идеи для исследования, получение данных для анализа, анализ данных исследования, написание текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наговицын О. В.* Концепция и методы формирования горно-геологической информационной системы (ГГИС MINEFRAME). — Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2018. — 339 с.

2. *Стадник Д. А., Габараев О. З., Стадник Н. М., Григорян К. Л.* Повышение качества цифровых «двойников» горнодобывающих предприятий на базе стандартизации атрибутивного наполнения технологических 3D-моделей в ГГИС // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11–1. — С. 202–212. DOI: 10.25018/02361493-2020-111-0-202-212.

3. *Шестаков К. И., Соколов И. М., Пирогов М. А., Соловьев С. Г.* Опыт развития, внедрения и стандартизации BIM (ТИМ)-проектирования в горнодобывающей отрасли // Горная промышленность. — 2021. — № 5. — С. 40–50. DOI 10.30686/1609-9192-2021-5-40-50.

4. *Петров Н. Е., Павленко Г. Д., Иовлев Г. А.* BIM-технологии при проектировании пересадочного станционного комплекса метрополитена // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры. — 2021. — №4. — С. 297–309.

5. *Голдобина Л. А., Орлов П. С.* BIM-технологии и опыт их внедрения в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» // Записки Горного института. — 2017. — № 224. — С. 263–272. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.263.

6. *Geng D., Voitasik K.* Application of BIM Technology in Subway Station Construction // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2018, vol. 05, pp. 195–198.

7. *Goldobina L. A., Demenkov P. A., Trushko V. L.* The implementation of building information modeling technologies in the training of bachelors and masters at Saint-Petersburg Mining university // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, pp. 803–813.

8. *M. Hosseini R., Banihashemi S., Chileshe N., Oraee Namzadi M., Udaeja C.* BIM adoption within Australian Small and Medium-sized Enterprises (SMEs): an innovation diffusion model // Construction Economics and Building. 2016, vol. 16(3), pp. 71–86. DOI: 10.5130/AJCEB.v16i3.5159.

9. *Rodnichenko E. K.* Augmented Reality Techniques in Industrial Warehouse Logistics in Mining Industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 688, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/688/1/012008.

10. *Потапова Е. В.* Методика оценки геотехнических рисков для объектов метрополитена с использованием ресурса Big Data // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2–1. — С. 164–173. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-164-173.

11. *Григорьев А. А., Капитонова Ю. С.* Маркшейдерский контроль и учет объемов горных работ. — Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013. — 22 с.

12. *Blischenko A. A., Gusev V. N.* Anovar of Errors in Surveying Photogrammetric Measurements of Mountain Objects with the Help of Unmanned Aerial Vehicles // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 720, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012103.

13. *Blischenko A. A.* Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (Quarries) // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 58–62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.

14. *Kiselev V. A., Porshukov D. V.* Justification of parameters of the photoplanimetric method for determining the cross section area of the horizontal openings. Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 173–178.

15. *Afanasyev A. S.* Simulation model of the organization of technological transport movement at a mining enterprise // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012008.

16. *Smirnova O. M., Potemkin D. A.* Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, pp. 874–880.

17. *Фомин С. И., Лигоцкий Д. Н., Аргимбаев К. Р.* Планирование открытых горных работ. — СПб.: Издательство «Лань», 2018. — 60 с.

18. *Bętkowski P.* Modeling of information on the impact of mining exploitation on bridge objects in BIM // E3S Web of Conferences 36. 2018, vol. 01002, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20183601002.

19. *Biancardo S. A., Intignano M., Viscione N., Guerra De Oliveira S., Tibaut A.* Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway design // Journal of Advanced Transportation. 2021, vol. 2021, pp. 1–17. DOI: 10.1155/2021/8839362.

20. *Hodorog A., Petri I., Rezgui Y., Hippolyte J.-L.* Building information modelling knowledge harvesting for energy efficiency in the Construction industry // Clean Technologies and Environmental Policy. 2021, vol. 23, pp. 1215–1231. DOI: 10.1007/s10098-020-02000-z.

21. *Komolov V. V., Belikov A. A., Kankhva V. S., Mezina N.* Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system, VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. Warsaw, Polish Academy of Sciences, 2020, vol. 908, pp. 487–490.

22. *Meng L., Hongliang Y., Ping L.* An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM // Automation in Construction. 2018, vol. 91, pp. 284–292. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.013.

23. *Vignali V., Mariapola-Accerra E., Lantieri C., Di Vincenzo F., Piacentini G., Pancaldi S.* Building information modeling application for an existing road infrastructure // Automation in Construction. 2021, vol. 128, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103752.

24. *Wenjing L., Siyi L., Lin Z., Li Q.* Information modeling of mine working based on BIM technology // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021, vol. 115, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103978.

25. *Зиновьева О. М., Кузнецов Д. С., Меркулова А. М., Смирнова Н. А.* Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2–1. — С. 113–123. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.

26. *Protosenya A. G., Demenkov P. A., Trushko O. V., Verbilo P. E.* Justification of Safe Plugging Options for Subway Tunnels Flooded in an Accident Based on Risk Assessment // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, pp. 7897–7906.

27. Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design – Engineering consultant’s aspect // *Geomechanics and Tunnelling*. 2016, vol. 6, pp. 674–682. DOI: 10.1002/geot.201600054.

28. Пашкевич М. А., Петрова Т. А. Оценка площадного загрязнения атмосферного воздуха в мегаполисе с использованием геоинформационных систем // *Записки Горного института*. – 2017. № 228. – С. 738–742. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.738. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Nagovicyn O. V. The concept and methods of formation of the mining and geological information system (MGIS MINEFRAME), Apatites, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2018, 339 p. [In Russ].

2. Stadnik D. A., Gabaraev O. Z., Stadnik N. M., Grigoryan K. L. Improving the quality of digital «doubles» of mining enterprises on the basis of standardization of attributive filling of technological 3D models in GIS. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11–1, pp. 202–212. [In Russ]. DOI: 10.25018/02361493-2020-111-0-202-212.

3. SHestakov K. I., Sokolov I. M., Pirogov M. A., Solov’ev S. G. Experience in the development, implementation and standardization of BIM design in the mining industry. *Mining Industry*. 2021, vol. 5, pp. 40–50. [In Russ].

4. Petrov N. E., Pavlenko G. D., Iovlev G. A. Use of BIM in designing a metro interchange station. *BIMAC 2021*. 2021, vol. 4, pp. 297–309. [In Russ].

5. Goldobina L. A., Orlov P. S BIM technologies and the experience of their implementation in the educational process during the preparation of bachelors in the direction 08.03.01 “Construction”. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 224, pp. 263–272. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.263. [In Russ].

6. Geng D., Voitasik K. Application of BIM Technology in Subway Station Construction. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2018, vol. 05, pp. 195–198.

7. Goldobina L. A., Demenkov P. A., Trushko V. L. The implementation of building information modeling technologies in the training of bachelors and masters at Saint-Petersburg Mining university. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, pp. 803–813.

8. M. Hosseini R., Banihashemi S., Chileshe N., Oraee Namzadi M., Udaaja C. BIM adoption within Australian Small and Medium-sized Enterprises (SMEs): an innovation diffusion model. *Construction Economics and Building*. 2016, vol. 16(3), pp. 71–86. DOI: 10.5130/AJCEB.v16i3.5159.

9. Rodnichenko E. K. Augmented Reality Techniques in Industrial Warehouse Logistics in Mining Industry. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 688, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755–1315/688/1/012008.

10. Potapova E. V. Methodology for assessing geotechnical risks for metro facilities using the big data resource. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 164–173. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-164-173.

11. Grigor’ev A. A., Kapitonova YU. S. Surveying control and accounting of mining volumes, Vladivostok, Publishing house of Far Eastern Federal University, 2013, 22 p. [In Russ].

12. Blischenko A. A., Gusev V. N. Anovar of Errors in Surveying Photogrammetric Measurements of Mountain Objects with the Help of Unmanned Aerial Vehicles. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 720, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755–1315/720/1/012103.

13. Blischenko A. A. Modern mine survey techniques in the process of mining operations in open pit mines (Quarries). *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues, Proceedings of the Russian- German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 58–62. DOI: 10.1201/9781003017226-8.
14. Kiselev V. A., Porshukov D. V. Justification of parameters of the photoplanimetric method for determining the cross section area of the horizontal openings, *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. London, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 173–178.
15. Afanasyev A. S. Simulation model of the organization of technological transport movement at a mining enterprise. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, pp. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/1753/1/012008.
16. Smirnova O. M., Potemkin D. A. Influence of ground granulated blast furnace slag properties on the superplasticizers effect. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, pp. 874–880.
17. Fomin S. I., Ligockij D. N., Argimbaev K. R. Open-pit mining planning. Saint Petersburg, Publishing house “Lan”, 2018, 60 p. [In Russ].
18. Bętkowski P. Modeling of information on the impact of mining exploitation on bridge objects in BIM. *E3S Web of Conferences* 36. 2018, vol. 01002, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20183601002.
19. Biancardo S. A., Intignano M., Viscione N., Guerra De Oliveira S., Tibaut A. Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway design. *Journal of Advanced Transportation*. 2021, vol. 2021, pp. 1–17. DOI: 10.1155/2021/8839362.
20. Hodorog A., Petri I., Rezgui Y., Hippolyte J-L. Building information modelling knowledge harvesting for energy efficiency in the Construction industry. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021, vol. 23, pp. 1215–1231. DOI: 10.1007/s10098-020-02000-z.
21. Komolov V. V., Belikov A. A., Kankhva V. S., Mezina N. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system. *VIII International Scientific Conference Transport of Siberia*. Warsaw, Polish Academy of Sciences, 2020, vol. 908, pp. 487–490.
22. Meng L., Hongliang Y., Ping L. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM. *Automation in Construction*. 2018, vol. 91, pp. 284–292. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.03.013.
23. Vignali V., Mariapola-Accerra E., Lantieri C., Di Vincenzo F., Piacentini G., Pancaldi S. Building information modeling application for an existing road infrastructure. *Automation in Construction*. 2021, vol. 128, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103752.
24. Wenjing L., Siyi L., Lin Z., Li Q. Information modeling of mine working based on BIM technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021, vol. 115, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103978.
25. Zinovieva O. M., Kuznetsov D. S., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2–1, pp. 113–123. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123.
26. Protosenya A. G., Demenkov P. A., Trushko O. V., Verbilo P. E. Justification of Safe Plugging Options for Subway Tunnels Flooded in an Accident Based on Risk Assessment. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, pp. 7897–7906.
27. Daller J., Žibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design – Engineering consultant’s aspect. *Geomechanics and Tunnelling*. 2016, vol. 6, pp. 674–682. DOI: 10.1002/geot.201600054.
28. Pashkevich M. A., Petrova T. A. Assessment of areal air pollution in a megalopolis using geoinformation systems. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 738–742. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.738. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вербило Павел Эдуардович — канд. техн. наук, доцент каф. строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Verbilo_PE@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>, РИНЦ Author ID: 883483, Author ID Scopus: 57190859525;

Иовлев Григорий Алексеевич — канд. техн. наук, ассистент каф. строительства горных предприятий и подземных сооружений, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, lovlev_ga@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8615-390X>, РИНЦ Author ID: 1100244, Author ID Scopus: 57208318410;

Петров Никита Евгеньевич — студент, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, ohneblut@gmail.com;

Павленко Георгий Дмитриевич — студент, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2, gosha.906@mail.ru.

Для контактов: *Вербило Павел Эдуардович*, e-mail: Verbilo_PE@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Verbilo P. E., Cand. Sci. (Eng.), assistant of Department of Mining Enterprises and Underground Structures, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia, Verbilo_PE@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6776-5866>, РИНЦ Author ID: 883483, Author ID Scopus: 57190859525;

Iovlev G. A., Cand. Sci. (Eng.), assistant of Department of Mining Enterprises and Underground Structures, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia, lovlev_ga@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8615-390X>, РИНЦ Author ID: 1100244, Author ID Scopus: 57208318410;

Petrov N. E., student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia, ohneblut@gmail.com, +79215726129;

Pavlenko G. D., student, Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia, gosha.906@mail.ru.

For contacts: *Verbilo Pavel Eduardovich*, e-mail: Verbilo_PE@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 20.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 20.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

