ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):16-28
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.014.519.67 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_16

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ОСНОВЕ ТИПИЗАЦИИ СХЕМ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ

В.В. Лаптев[1], А.В. Корниенко[1]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: v.laptev@ksc.ru

Аннотация: Развитие цифровых технологий в горном деле сопровождается активным внедрением цифрового моделирования объектов и процессов горного производства, реализуемого средствами горно-геологических информационных систем (ГГИС). На сегодняшний день одной из самых востребованных функциональных возможностей ГГИС является планирование подземных горных работ, требующее наличия целого комплекса моделей горных выработок, количество которых может составлять несколько тысяч. При этом универсальных решений, автоматизирующих создание множества моделей выработок, в отечественных ГГИС не существует. Авторами на платформе ГГИС MINEFRAME были разработаны алгоритмы и программные средства, позволяющие автоматизировать операции создания большого количества моделей выработок на основе шаблонов их типовых конфигураций. Отличительной особенностью предложенного решения является реализация различных типов связей, устанавливаемых между отдельными выработками. Это позволяет оперативно адаптировать каждый шаблон или их группу под конкретные горно-геологические и горнотехнические условия рассматриваемого фрагмента шахтного поля, не меняя при этом структуру исходной схемы шаблона и не выполняя ручного трудоемкого редактирования каждой выработки. Дополнительной возможностью при работе созданных программных средств является автоматическое создание моделей выемочных единиц на основе шаблонов схем выработок для систем разработки, отрабатывающих тонкие пологопадающие пласты. Предложенное решение позволяет многократно сократить трудозатраты на операции, связанные с проектированием и моделированием выработок в цифровой модели горнодобывающего предприятия.

Ключевые слова: проектирование подземных горных работ, горно-геологические информационные системы, моделирование объектов геотехнологии, автоматизация, цифровизация, параметрическое проектирование, планирование горных работ, геотехнология.

Для цитирования: *Лаптев В. В., Корниенко А. В.* Автоматизация проектирования подземных горных выработок на основе типизации схем их расположения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 16–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_16.

Underground mine design automation based on the typification of mine layout schemes

V.V. Laptev[1], A.V. Kornienko[1]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: v.laptev@ksc.ru

© В.В. Лаптев, А.В. Корниенко. 2022.

Abstract: The development of digital technologies in mining is accompanied by the active implementation of digital modelling of mining objects and processes, implemented by means of mining and geological information systems (GIS). Today, one of the most demanded functionalities of GIS is planning of underground mining works, which requires a whole set of mine workings models, the number of which can be several thousands. In this case, universal solutions which automate creation of a set of mine workings models in domestic GIS do not exist. The authors have developed algorithms and software on the platform GIS MINEFRAME, allowing to automate the operation of creating a large number of models of mine workings on the basis of templates of typical configurations. A distinctive feature of the proposed solution is the implementation of different types of links established between individual workings. This allows to adapt each template or its group according to specific mining-geological and mining-technical conditions of the considered mine-field's fragment, without changing the structure of the initial template's scheme and without carrying out the labor-consuming manual editing of each mine. An additional advantage of the new software is the automatic creation of mine workings models on the basis of mine workings patterns for development systems with thin declining seams. The proposed solution allows to reduce labour costs on operations related to designing and modelling of mine workings in the digital model of the mining enterprise.

Key words: underground mining design, mining and geological information systems, geotechnology modeling, automation, digitalization, parametric design, geotechnology, mine planning.

For citation: Laptev V. V., Kornienko A. V. Underground mine design automation based on the typification of mine layout schemes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):16-28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_16.

Введение

Развитие цифровых технологий в горном деле сопровождается активным внедрением цифрового моделирования объектов и процессов горного производства, реализуемого средствами горно-геологических информационных систем (ГГИС) [1, 2]. Возможности современных ГГИС достаточно обширны: создание геологических моделей месторождения, моделирование объектов геотехнологии, сопровождение геологических и маркшейдерских работ, технико-экономические расчеты, проектирование и планирование горных работ. Среди них одним из самых востребованных на сегодняшний день является функционал планирования горных работ [3]. Для планирования и проектирования подземных горных работ в ГГИС требуется наличие целого комплекса моделей горных выработок (количество которых может составлять несколько тысяч), как правило создаваемых на весь срок службы предприятия. При необходимости оценки и сравнения различных вариантов подготовки и отработки участков месторождения количество проектируемых выработок может возрастать кратно числу рассматриваемых вариантов [4, 5].

Анализ

Большая часть операций, выполняемых специалистом горнодобывающего предприятия при создании и редактировании моделей выработок, в том числе при их проектировании, достаточно рутинна и однообразна: дублирование объектов, их перемещение, учет размеров предохранительных целиков, обработка сопряжений и мн. др. Это создает предпосылки к автоматизации проектирова-

ния и моделирования однотипных линейных объектов в ГГИС для снижения трудозатрат на описанные операции.

В настоящее время существующие ГГИС позволяют автоматизировать часть операций при проектировании горных работ, в том числе помогая технологу в автоматизированном режиме подбирать оптимальную траекторию проведения проектной выработки [6 — 7].

Для массового проектирования однотипных объектов существуют решения, основанные на задании правил расположения объектов подземной геотехнологии и дальнейшем расчете алгоритмами программы вероятного размещения выработок. Немногочисленные решения такого типа представлены зарубежными коммерческими программами, входящими в состав крупных ГГИС.

Однако на практике внедрение подобных систем сопровождается множественными сложностями, связанными как с непосредственным применением зарубежных ГГИС [8], так и с техническими трудностями настройки зависимостей и правил относительного расположения выработок.

Существует подход задания правил относительного расположения объектов, основанный на технологиях параметрического проектирования, которые широко применяются в строительной, машиностроительной, приборостроительной и других отраслях с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) [9], таких как AutoCAD, Solid Edge, SolidWorks и другие. Применение параметрического проектирования средствами САПР для моделирования горных выработок в системах ГГИС затруднено в связи с направленностью функционала под нужды строительной отрасли, невозможности учитывать при проектировании горно-геологические условия, окружающие объекты, а также из-за неудобств, связанных с обменом данными между различными программными приложениями [10 — 14].

В отечественных ГГИС универсальных решений для массового полуавтоматического моделирования объектов подземной геотехнологии на сегодняшний день нет. Имеются узкоспециализированные решения по раскройке шахтных полей угольных месторождений на выемочные столбы [15].

На базе ГГИС MINEFRAME, разрабатываемой Горным институтом КНЦ РАН, в рамках работы по созданию систем производственно-календарного планирования подземных горных работ была поставлена задача реализовать в цифровой модели горнодобывающего предприятия возможность автоматизированной раскройки рудничных и шахтных полей.

Постановка задачи

Анализ существующих подходов к проектированию и моделированию подземных горных выработок показал, что самой трудоемкой операцией при проектировании множества однотипных объектов является адаптация положения и геометрических параметров каждой выработки в ручном режиме под конкретные горно-геологические и горнотехнические условия, включая корректировку объектов по контуру залежи, стыковку выработок после их перемещения и редактирования с целью выдержать требуемые параметры конфигурации.

При этом в рамках одного месторождения схемы расположения выработок на его фрагментах, таких как горизонты, блоки, слои, этажи или подэтажи, являются идентичными, т.е. состоят из определенного набора выработок, пространственно распределенных согласно правилам применяемой технологии. Выделить типовые варианты расположения выработок возможно в рамках отдельных фрагментов рудничного (шахтного)

поля, например: горизонтов откатки, буровых подэтажей, других совокупностей выработок очистных блоков, околоствольных дворов, и др. Перечисленные особенности конфигурации выработок напрямую вытекают из определения системы разработки месторождений подземным способом. Например, на рис. 1 показаны планы расположения выработок на подэтажах в очистном блоке, отрабатываемом подэтажной системой разработки, и типовая для подобных подэтажей схема расположения выработок.

Проведенный анализ привел к идее выделения типовых конфигураций выработок в типовые шаблоны схем их расположения и дальнейшего использования этих схем при проектировании. Шаблоны должны иметь возможность соединяться друг с другом в различных комбинациях, чтобы раскраивать шахтные поля или их отдельные фрагменты группами выработок, при необходимости производя адаптацию шаблонов под конкретные горно-геологические и горнотехнические условия разработки в различных областях месторождения.

Описанная идея была положена в основу разработанных авторами алгоритмов и программных средств, предназначенных для группового проектирования выработок и моделей очистных блоков в ГГИС MINEFRAME.

Методы

Созданные программные средства позволяют представить каждый шаблон в виде набора осей проектируемых выработок и работать с ним в двумерном и трехмерном пространствах. В дальнейшем оси автоматически преобразуются алгоритмами в твердотельные модели объектов, на основе которых автоматизированно создаются модели выемочных единиц.

Для создания и редактирования шаблонов в инструменте реализован Редактор шаблонов групп выработок, позво-

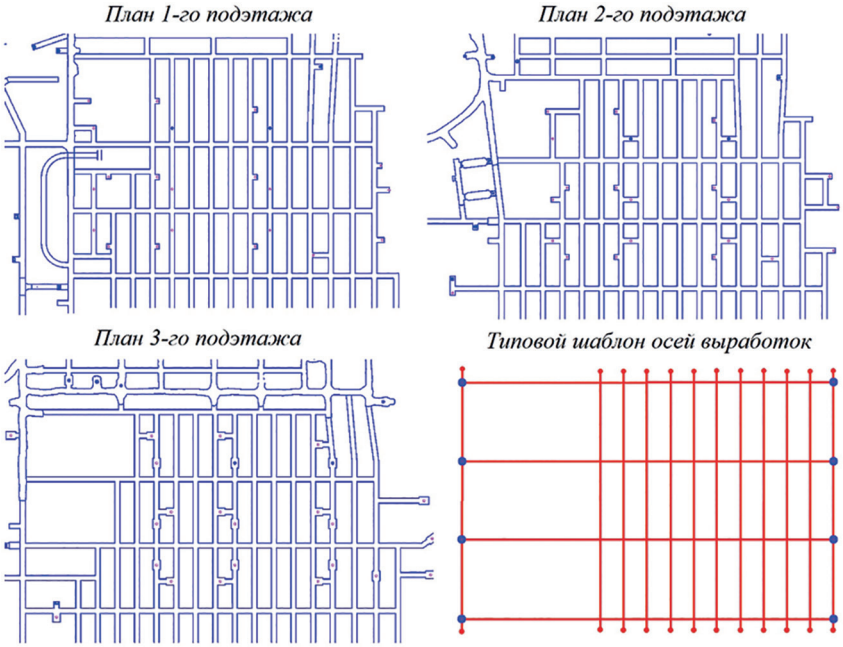

Рис. 1. Типизация расположения выработок подэтажей очистного блока
Fig. 1. Typification of location of the workings of sub-floors of cleaning unit

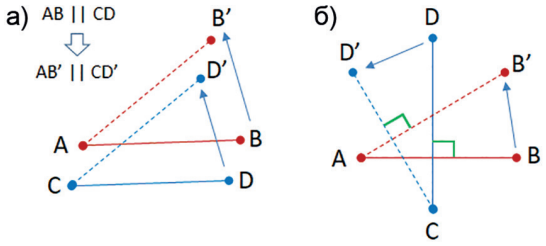

Рис. 2. Действие связей параллельности и ортогональности отрезков
Fig. 2. Action of parallelism and orthogonality links of segments

ляющий в двумерном режиме интерактивно работать с их осями. Ключевой особенностью Редактора является возможность настраивать правила взаимного расположения осей выработок. Правила и алгоритмы их автоматического учета при редактировании были разработаны на основе анализа существующих схем расположения выработок в наиболее часто применяемых системах разработки угольных и рудных месторождений.

Задание правил по аналогии с параметрическим проектированием в САПР необходимо для исключения трудоемких операций по адаптации шаблонов под конкретные горно-геологические и горнотехнические условия на проектируемом участке отработки месторождения. Правила реализуются через назначение связей и зависимостей, устанавливаемых между осями выработок. В основе работы алгоритма лежит представление осей выработок в виде отрезков, между которыми могут быть установлены связи различного типа:

- задание параллельности, ортогональности выбранных осей и равенства их длин;
- соблюдение заданного расстояния между параллельными осями;
- фиксация длины «свободных» частей оси (от ее конца до ближайшего сопряжения с другими элементами шаблона);
- задание «отрезков скольжения»;
- установка «точек скольжения».

Алгоритмы

При установке параллельности отрезков и последующем редактировании шаблона алгоритм обработки связей будет корректировать положение связанных отрезков при изменении пространственного положения одного из них (в частности — при повороте (рис. 2, *а*)). Связь, устанавливающая ортогональность отрезков, действует аналогично — при повороте одного из отрезков в результате редактирования схемы, связанный отрезок изменит свое положение таким образом, чтобы сохранялось условие ортогональности (рис. 2, *б*).

Расстояние между отрезками с установленной связью параллельности друг другу может быть зафиксировано. В таком случае алгоритм обработки связей будет изменять положение связанного отрезка в том числе и с учетом заданного расстояния, т.е. перемещать связанный отрезок при необходимости в дополнение к его повороту.

Связь, фиксирующая длину «свободной» части отрезка, подразумевает фиксацию расстояния одного из двух фрагментов отрезка, образованного концом отрезка и ближайшим к нему пересечением с другими элементами шаблона. При редактировании шаблона алгоритм обработки связей будет корректировать положение соответствующего конца отрезка с учетом заданного расстояния. Данный тип связи позволяет упростить последующую стыковку шаблонов между собой.

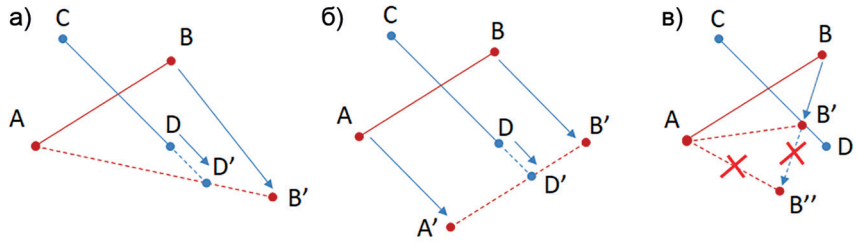

Рис. 3. Действие связи «отрезки скольжения»
Fig. 3. Action of the connection «sliding segments»

При установленной связи «отрезки скольжения» алгоритм обработки связей будет отслеживать обязательное наличие точки пересечения отрезков. Например, пусть отрезки *AB* и *CD* являются «отрезками скольжения» и изначально пересекаются между собой. При изменении положения отрезка *AB* (при перемещении одного из его концов (рис. 3, *а*) либо перемещении всего отрезка (рис. 3, *б*)) в случае, если изначальная длина отрезка *CD* будет недостаточна для существования точки пересечения *AB* и *CD*, отрезок *CD* будет увеличен в соответствующем направлении. При этом если редактирование отрезка *AB* будет приводить к отсутствию точки пересечения с *CD*, алгоритм обработки связей будет ограничивать редактирование *AB* в таких пределах, в которых будет обеспечиваться наличие точки пересечения с *CD* (рис. 3, *в*).

Связь «точка скольжения» позволяет выполнить привязку одного из концов отрезка к другому отрезку: пусть точка *C* отрезка *CD* связана с отрезком *AB* связью «точка скольжения», т.е. изначально принадлежит обоим отрезкам. При редактировании отрезка *AB* (при перемещении одного из его концов либо перемещении всего отрезка) алгоритм обработки связей будет отслеживать обязательное выполнение условия принадлежности точки *C* обоим отрезкам, т.е. при необходимости как изменять длину *CD* (рис. 4, *а*), так и осуществлять его поворот вокруг *D* (рис. 4, *б*). При этом перемещение отрезка *CD* возможно только вдоль прямой, на которой лежит отрезок *AB*, и в случае, если длина *AB* окажется недостаточна для принадлежности *C* обоим отрезкам, она будет увеличена в соответствующем направлении (рис. 4, *в*). Изменение положения точки *D* выполняется без каких-либо ограничений и корректировок, т.к. при этом не изменяется положение точки *C*. Перемещение же точки *C* возможно только вдоль прямой *AB* с соответствующей корректировкой длины отрезка *AB* в требуемом направлении при необходимости (рис. 4, *г*).

Результаты и обсуждение

Таким образом, после настройки шаблона пользовательское изменение по-

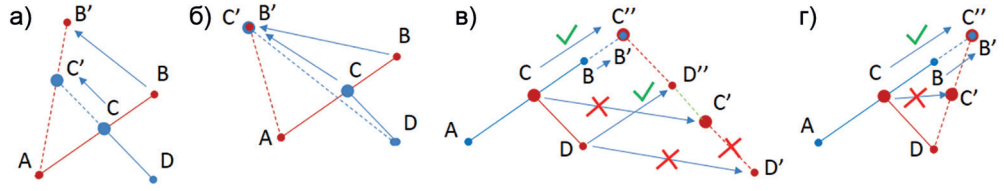

Рис. 4. Действие связи «точка скольжения»
Fig. 4. Action of the «slip point» connection

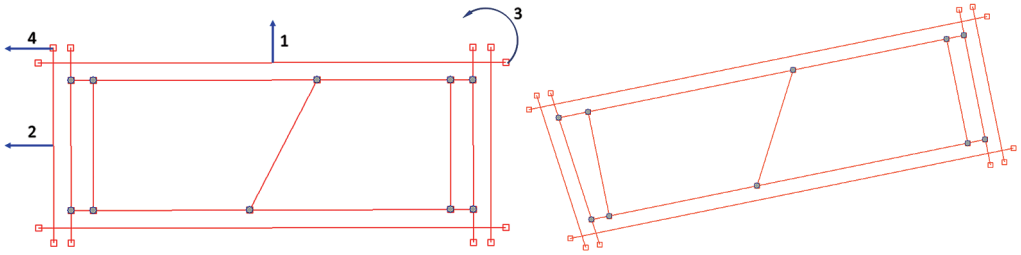

Рис. 5. Изменение шаблона осей выработок в Редакторе: начальное положение (а); измененное (б)
Fig. 5. Changing template of the axes of workings in Editor: initial position (a); changed position (b)

ложения или размеров одной оси или группы осей запускает алгоритм корректировки связанных с нею объектов, чтобы сохранить установленные правила взаимного расположения. В результате в шаблоне выработок при редактировании одной из осей остальные оси автоматически сохраняют настроенные проектировщиком конфигурации относительного положения, а именно: взаимное расположение осей (параллельность, ортогональность, расстояния и углы между осями) и установленные типы их сопряжений (прямо- и остроугольные пересечения, примыкания, ответвления и разветвления).

Например, на рис. 5 приведено изменение шаблона столба (столбовая система разработки с обрушением), произведенное несколькими простыми операциями: 1 — увеличение высоты перемещением верхней оси; 2 — увеличение длины столба перемещением крайней правой оси; 3 — поворот шаблона за крайнюю точку оси; 4 — поворот крайней левой оси. Каждое изменение оси влекло за собой перемещение (поворот) связанных с ней осей, что в дальнейшем при создании моделей объектов не потребует дополнительных операций по доработке положения и сопряжений объектов. Созданные шаблоны сохраняются в библиотеке, из которой они в произвольном порядке могут быть размещены в трехмерном пространстве моделирования. При этом имеется возможность стыковки шаблонов между собой, а также с ранее созданными моделями выработок (рис. 6).

Размещенные в трехмерном пространстве шаблоны при необходимости могут

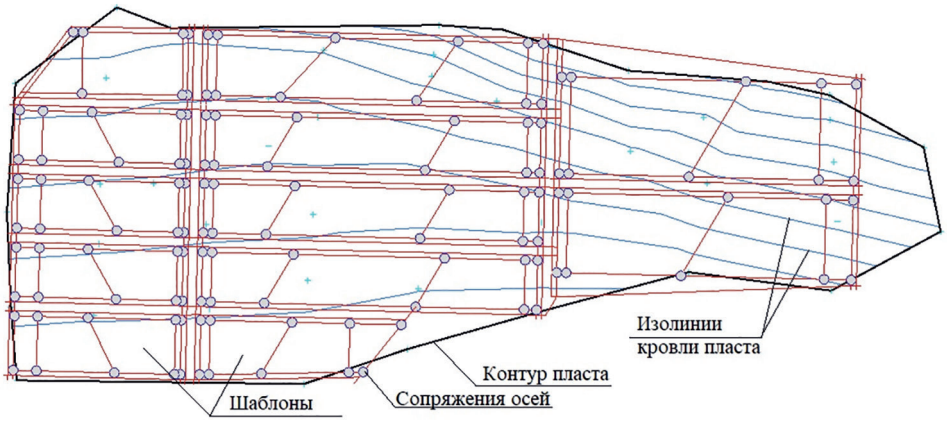

Рис. 6. Группа шаблонов, раскраивающая угольный пласт на выемочные столбы
Fig. 6. Group of templates that divides the coal seam into excavation pillars

быть адаптированы под текущие горно-геологические и горнотехнические условия отработки. Принципы редактирования, реализованные в Редакторе шаблонов, сохраняются и в трехмерном пространстве: возможно интерактивно поворачивать, удлинять или укорачивать как отдельные оси проектируемых выработок, так и шаблоны целиком, возможно создание дополнительных осей или удаление лишних, редактирование связей осей и т.п. Данный функционал позволяет адаптировать шаблон под конкретные условия, сохраняя заданные правила конфигурации осей, диктуемые технологией и безопасностью ведения горных работ. В качестве подложки и средств привязки имеется возможность использовать различные графические материалы (отсканированные планы, разрезы, координатные сетки) и существующие модели рудных тел, выемочных единиц и созданных ранее выработок [16].

В ряде ситуаций, например при отработке тонких пластовых месторождений, очистные, нарезные и подготовительные выработки должны располагаться по рудо-породным контактам или вблизи них: например, по почве или кровле пласта, следуя особенностям его залегания [17, 18]. Инструмент позволяет автоматизированно спроецировать оси выработок на контакты пласта с вмещающими породами с учетом особенностей применяемой геотехнологии.

Еще одной важной особенностью массового создания выработок в полуавтоматическом режиме является необходимость учета возможного разнообразия форм и размеров поперечных сечений выработок: внутри одной типовой схемы, как правило, выработки имеют различные размеры, а иногда и формы, поперечных сечений. Для того чтобы учитывать эту особенность при автоматизированном моделировании объектов, инструмент позволяет создавать списки типов выработок, группируемых по различным критериям.

Каждому типу присваиваются следующие параметры:

- форма и размеры поперечного сечения;
- принадлежность выработки к видам работ, блокам, горизонтам, слоям, и пр.;
- типовое имя, создаваемое с помощью конструктора имен, использующего в качестве базовых элементов принадлежность выработки к блокам, горизонтам и другим геометрическим и структурным элементам, имя типа выработки и другие переменные параметры.

Каждой оси в шаблоне присваивается тип выработки, который ей соответствует. Это позволяет при создании твердотельных моделей выработок учитывать описанные выше переменные параметры каждого объекта, в том числе автоматически именовать их.

В результате работы алгоритмов по подготовленным в трехмерном пространстве шаблонам производится автоматическое построение моделей горных выработок. При этом каждая выработка создается по свойственным ей характеристикам, определяемым ее типом (см. рис. 7).

Для моделирования условий разработки пластовых месторождений имеется возможность автоматического создания моделей выемочных единиц на основе созданных по шаблонам моделей выработок. По заданным в шаблоне геометрическим ограничениям очистного пространства и по настройкам мощности выемки, которые варьируются в зависимости от мощности пласта и технических возможностей применяемой техники, определяются горизонтальные и вертикальные границы очистного пространства и формируется модель выемочной единицы. Это позволяет учитывать осо-

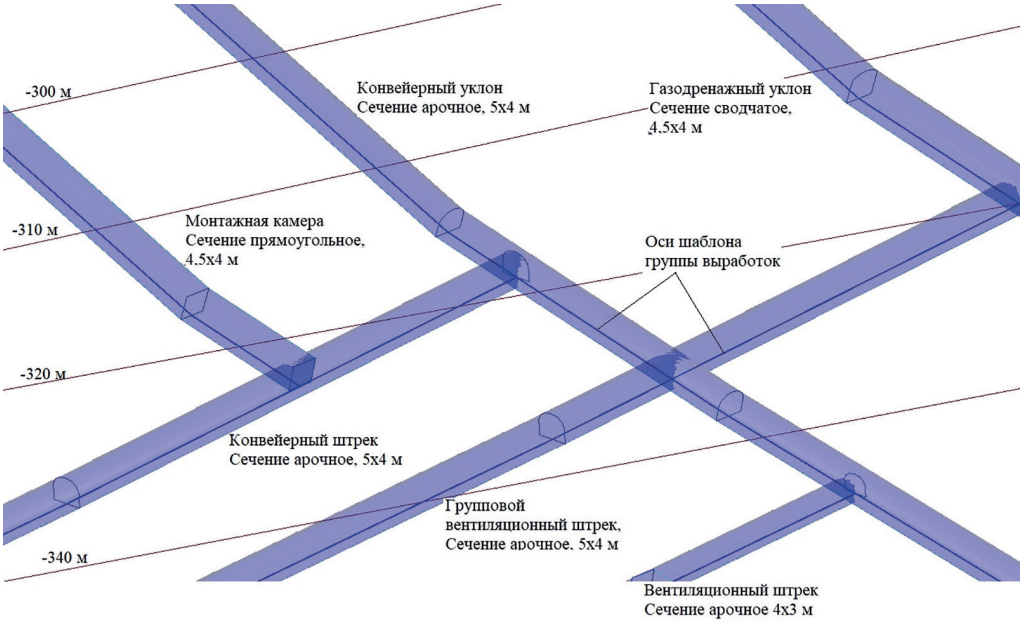

Рис. 7. Твердотельные модели выработок (фрагмент выемочного столба) следуют форме почвы угольного пласта

Fig. 7. Solid-state models of workings (fragment of a dredging column) follow shape of the soil of the coal seam

бенности отработки тонких пластовых месторождений.

Так, например, применяемые при столбовой системе разработки с обрушением очистные комбайны имеют характеристики максимально- и минимально возможной выемочной мощности. В местах, где мощность пласта будет мень-

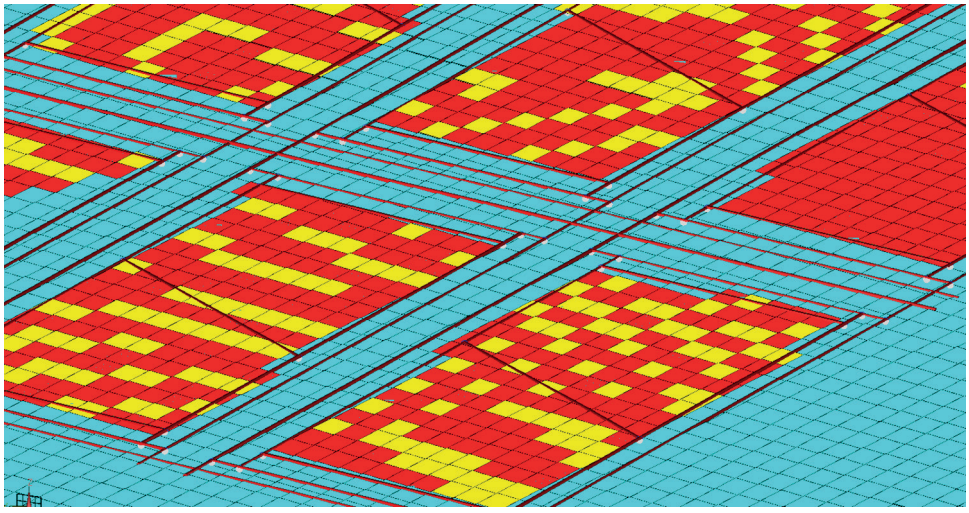

Рис. 8. Автоматически созданные по шаблонам твердотельные модели выработок и блочные модели выемочных единиц на модели пласта

Fig. 8. Automatically generated solid-state models of workings and block models of excavation units on the reservoir model

ше минимальной выемочной, комбайн отработает минимальную мощность с прирезкой вмещающих пород; где больше минимальной, но меньше максимальной — комбайн может пойти по границам пласта; где больше максимальной — извлекается только максимально возможная мощность.

Данные особенности выемки автоматически учитываются при моделировании выемочных единиц: алгоритмы инструмента формируют вертикальные границы выемочной единицы согласно заданным настройкам технологии с разделением на рудную и породную составляющие. На смоделированные выемочные единицы автоматически переносится блочная модель рудного тела со всеми имеющимися характеристиками для возможности дальнейшего учета качественных и количественных характеристик извлекаемой рудной массы в инструментах цифрового планирования подземных горных работ (см. рис. 8) [19—20].

Заключение

Разработанные авторами алгоритмы и программные средства позволяют автоматизированно на основе шаблонов создавать множественные однотипные объекты подземной технологии, формировать выемочные единицы и получать документацию по планируемым объемам проходки и добычи с учетом содержания полезных компонентов. Реализованные в шаблонах связи между осями выработок позволяют оперативно адаптировать каждый шаблон или их группу под конкретные условия каждого участка месторождения, не меняя структуру исходной типовой схемы и не выполняя ручного трудоемкого редактирования каждой выработки.

Инструмент при создании моделей выемочных единиц позволяет учитывать особенности технологии выемки полезных ископаемых на пологопадающих пластовых месторождениях.

Перечисленные возможности инструмента позволяют автоматизировать трудоемкие однотипные операции при проектировании подземных горных работ, многократно уменьшая трудозатраты на создание моделей выработок.

В дальнейшем созданные модели подземных горных выработок и выемочных единиц могут быть использованы при планировании горных работ программными средствами ГГИС MINEFRAME.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nagovitsyn O. V.*, *Lukichev S. V.* Temporal approach to modeling objects within a mining technology // Journal of Mining Science. 2020, vol. 6, no. 6, pp. 1046—1052. DOI: 10.1134/S1062739120060174.

2. *Наговицын О. В.*, *Возняк М. Г.* К вопросам управления роботизированным горнодобывающим предприятием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-1. — С. 326—335. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

3. *Lukichev S. V.*, *Nagovitsyn O. V.*, *Laptev V. V.* Short- and medium term planning of underground mining operations / Proceedings of the 40th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, APCOM 2021. 2021, pp. 45—54.

4. *Белогородцев О. В.*, *Наговицын Г. О.* Выбор технологии и порядка отработки подземных запасов участка Гакман Юкспорского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5-1. — С. 19—28. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_19.

5. *Ren Hong-gang, Wei Zheng* Application of digital optimum design technology in mining design of a large gold mine in Ethiopia // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2019, vol. 304, no. 3, article 032087. DOI: 10.1088/1755-1315/304/3/032087.

6. *Хомкин Е. Е.* Автоматизированное планирование и проектирование подземных горных работ в ГГИС MINEFRAME / Геотехнология и обогащение полезных ископаемых: Материалы VII Конференции-школы молодых ученых. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — С. 46—50.

7. *Лукичев С. В.*, *Белогородцев О. В.* Решение задач проектирования подземных горных работ с использованием геоинформационных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № S37. — С. 205—213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-205-213.

8. *Кутовой С. Н.*, *Катаев А. В.*, *Васенин Д. А.*, *Баталов И. А.*, *Свинцов Д. И.* Автоматизация решения маркшейдерских задач в рамках создания горно-геологической информационной системы ПАО «Уралкалий» // Недропользование. — 2021. — Т. 21. — № 3. — С. 131—136. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.5.

9. *Бузало Н. А.*, *Царитова Н. Г.*, *Платонова И. Д.*, *Лысенко В. Н.* Параметрическое моделирование конструкций в среде визуального программирования // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 4.

10. *Барабаш М. С.*, *Киевская Е. И.* Принципы параметрического моделирования строительных объектов // Современное строительство и архитектура. — 2016. — № 1(01). — С. 16—22. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4.

11. *Пикалов В. А.*, *Соколовский А. В.*, *Терешина М. А.* Проблемы проектирования горнодобывающих предприятий в условиях высокой изменчивости внешней среды // Уголь. — 2022. — № 8. — С. 100—105. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-8-100-105.

12. *Farkaš B., Hrastov A.* Multi-criteria analysis for the selection of the optimal mining design solution — A case study on quarry «Tambura» // Energies. 2021, vol. 14, article 3200. DOI: 10.3390/en14113200.

13. *Nesbitt P., Sipeki L., Flamand T., Newman A. M.* Optimizing underground mine design with method-dependent precedences // IISE Transactions. 2020, vol. 53, no. 6, pp. 643—656. DOI: 10.1080/24725854.2020.1823534.

14. *Nesbitt P., Blake L. R., Lamas P., Goycoolea M., Pagnoncelli B. K., Newman A., Brickey A.* Underground mine scheduling under uncertainty // European Journal of Operational Research. 2021, vol. 294, no. 1, pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.011.

15. *Шек В. М.*, *Вознесенский Ю. С.*, *Кравченко И. А.*, *Закиев Р. М.*, *Литвинов А. Г.* Разработка компьютерного метода выбора наилучшего варианта раскроя шахтного поля // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № S6. — С. 321—326.

16. *Лукичев С. В., Наговицын О. В., Билин А. Л. и др.* Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности: монография. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 192 с.

17. *Любин А. Н.*, *Лаптев В. В.*, *Мамцева О. А.* Обоснование выемочной мощности в очистных выработках на руднике «Карнасурт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — СВ 37. — С. 224–232. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-224-232.

18. *Сидоренко А. А.*, *Дмитриев П. Н.*, *Ярошенко В. В.* Комплексное обоснование технологической структуры угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 8. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_5.

19. *Lukichev S. V.*, *Nagovitsyn O. V.*, *Laptev V. V.* Digital tools for underground mine planning: Cut-and-fill mining // Eurasian Mining. 2021, no. 1, pp. 75–78.

20. *Белогородцев О. В.*, *Савин Е. М.* Автоматизированное планирование подземных горных работ / Вопросы осушения, геологии и геоинформатики, геомеханики, специальных горных работ и горных технологий: Материалы 12 международного симпозиума

«Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». — Белгород: ОАО «ВИОГЕМ», 2013. — С. 276—283. ГИАБ

REFERENCES

1. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. Temporal approach to modeling objects within a mining technology. *Journal of Mining Science*. 2020, vol. 6, no. 6, pp. 1046—1052. DOI: 10.1134/S1062739120060174.

2. Nagovitsyn O. V., Voznyak M. G. Robotic mine management. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-1, pp. 326—335. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_326.

3. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Laptev V. V. Short- and medium term planning of underground mining operations. *Proceedings of the 40th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, APCOM 2021*. 2021, pp. 45—54.

4. Belogorodtsev O. V., Nagovitsyn G. O. Choice of technology and order of mining underground reserves of the Gakman section of the Yukspor deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-1, pp. 19—28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_19.

5. Ren Hong-gang, Wei Zheng Application of digital optimum design technology in mining design of a large gold mine in Ethiopia. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 304, no. 3, article 032087. DOI: 10.1088/1755-1315/304/3/032087.

6. Khomkin E. E. Automated planning and design of underground mining in MGIS MINEFRAME. *Geotekhnologiya i obogashchenie poleznykh iskopaemykh: Materialy VII Konferentsii-shkoly molodykh uchenykh* [Geotechnology and mineral processing: Proceedings of VII Conference-School of Young Scientists], Apatity, KNTS RAN, 2016, pp. 46—50. [In Russ].

7. Lukichev S. V., Belogorodtsev O. V. Solving problems of underground mining design using geoinformation technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. S37, pp. 205—213. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-205-213.

8. Kutovoy S. N., Kataev A. V., Vasenin D. A., Batalov I. A., Svintsov D. I. Automation of surveyor tasks solution within the creation of mining and geological information system of PJSC Uralkali. *Nedropol'zovanie*. 2021, vol. 21, no. 3, pp. 131—136. [In Russ]. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.3.5.

9. Buzalo N. A., Tsaritova N. G., Platonova I. D., Lysenko V. N. Parametric modeling of structures in visual programming environment. *Eurasian Scientific Journal*. 2021, vol. 13, no. 4. [In Russ].

10. Barabash M. S., Kievskaya E. I. Principles of parametric modeling of construction objects. *Construction & Architecture*. 2016, no. 1(01), pp. 16—22. [In Russ]. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4.

11. Pikalov V. A., Sokolovskiy A. V., Tereshina M. A. Challenges of mine designing in conditions of high alterability of the environment. *Ugol'*. 2022, no. 8, pp. 100—105. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-8-100-105.

12. Farkaš B., Hrastov A. Multi-criteria analysis for the selection of the optimal mining design solution — A case study on quarry «Tambura». *Energies*. 2021, vol. 14, article 3200. DOI: 10.3390/en14113200.

13. Nesbitt P., Sipeki L., Flamand T., Newman A. M. Optimizing underground mine design with method-dependent precedences. *IISE Transactions*. 2020, vol. 53, no. 6, pp. 643—656. DOI: 10.1080/24725854.2020.1823534.

14. Nesbitt P., Blake L. R., Lamas P., Goycoolea M., Pagnoncelli B. K., Newman A., Brickey A. Underground mine scheduling under uncertainty. *European Journal of Operational Research*. 2021, vol. 294, no. 1, pp. 340–352. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.011.

15. Shek V. M., Voznesensky Y. S., Kravchenko I. A., Zakiev R. M., Litvinov A. G. Development of a computer method for selecting the best option for cutting a mine field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. S6, pp. 321—326. [In Russ].

16. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Bilin A. L., etc. *Nauchnye i prakticheskie aspekty primeneniya tsifrovykh tekhnologiy v gornoy promyshlennosti*: monografiya [Scientific and practical aspects of digital technologies application in mining industry: monograph], Apatity, Izd-vo FITs KNTs RAN, 2019, 192 p.

17. Lubin A. N., Laptev V. V., Mamtseva O. A. Justification of the excavation capacity in the clearing workings at the Karnasurt mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, special edition 37, pp. 224–232. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-224-232.

18. Sidorenko A. A., Dmitriyev P. N., Yaroshenko V. V. Integrated justification of technological structure for coal mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 8, pp. 5–22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_5.

19. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Laptev V. V. Digital tools for underground mine planning: Cut-and-fill mining. *Eurasian Mining*. 2021, no. 1, pp. 75–78.

20. Belogorodtsev O. V., Savin E. M. Automated planning of underground mining. *Voprosy osusheniya, geologii i geoinformatiki, geomekhaniki, spetsial'nykh gornykh rabot i gornykh tekhnologiy: Materialy 12 mezhdunarodnogo simpoziuma «Osvoenie mestorozhdeniy mineral'nykh resursov i podzemnoe stroitel'stvo v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviyakh»* [Issues of drainage, geology and geoinformatics, geomechanics, special mining operations and mining technology: Proceedings of the 12th International Symposium on «Mineral Deposit Development and Underground Construction in Complex Hydrogeological Conditions»], Belgorod, OAO «VIOGEM», 2013, pp. 276 — 283. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лаптев Владимир Викторович[1] — научный сотрудник,
e-mail: v.laptev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1525-1211,
Корниенко Андрей Викторович[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: a.kornienko@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7751-8164,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.
Для контактов: Лаптев В.В., e-mail: v.laptev@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Laptev[1], Researcher,
e-mail: v.laptev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1525-1211,
A.V. Kornienko[1], Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
e-mail: a.kornienko@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7751-8164,
[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: V.V. Laptev, e-mail: v.laptev@ksc.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 18.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 18.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.