

УДК 622.2:004.94

Ногин Святослав Александрович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: nsa@igduran.ru

Усанов Сергей Валерьевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: usv@igduran.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ – КРЕПЬ – ВМЕЩАЮЩИЕ ПОРОДЫ» В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ*

Аннотация:

Описано построение на основе разнородных исходных данных компьютерной 3D-модели системы, включающей вертикальную горную выработку – вентиляционный ствол шахты «10-летия независимости Казахстана», крепь с совокупностью поврежденных участков и прилегающих горных пород. Данная модель построена в программной среде Mineframe и состоит из следующих субмоделей: геологической, ствола, повреждений. Геологическая субмодель содержит данные о границах выделенных инженерно-геологических элементов и о геологических слоях внутри них (петрографический состав, коэффициент прочности пород по Протодьяконову, трещиноватость), а также каркасные, твердотельные и блочные модели участков закрепного массива, обследованных в ходе георадиолокационного зондирования. Субмодель ствола содержит каркасную и твердотельную модели самой выработки. Субмодель повреждений, построенная на основе данных обследования ствола, содержит каркасные и твердотельные модели выявленных повреждений крепи (среди таковых отмечены выходы струй воды, расхождения и повреждения гидроизоляции технологических швов, зоны заколообразования и трещиноватости бетона, одиночное нарушение крепления расстрела и течь в месте крепления расстрела). На основе описываемой модели возможно строить разрезы как в вертикальной, так и в произвольной плоскости с использованием условных обозначений, созданных с помощью встроенного в Mineframe инструментария (редакторов классификатора, линий и штриховок, символов, палитр). В ходе работы вычислены объемы целевых для тампонажа пород; сама модель может быть использована для комплексного анализа совокупности данных георадиолокационного зондирования и данных визуального обследования ствола, а также улучшения оценки эффективности запланированных тампонажных работ в данном стволе.

Ключевые слова: 3D-модель, Mineframe, визуализация, компьютерное моделирование, крепь, моделирование выработок, повреждения крепи, тампонаж..

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.090

Nogin Svyatoslav A.

Junior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
8 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: nsa@igduran.ru

Usanov Sergey V.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
e-mail: usv@igduran.ru

MODELING OF THE SYSTEM "MINE WORKINGS – SUPPORT – INTEGRATING ROCKS" WITH THE SOFTWARE VISUALIZATION ENVIRONMENT

Abstract:

The paper describes the construction of a computer 3D model based on heterogeneous initial data. This system model includes a vertical mine working which comprises in a shaft of the "10th anniversary of Kazakhstan's independence mine", a support with a set of damaged areas and adjacent rocks. This model is built in the Mineframe software environment and consists of following submodels: geological submodel, mineshaft's submodel and damage submodel. The geological submodel contains boundaries of the selected engineering geological elements and data related to detailed geological layers within these elements (petrographic composition, the Protodyakonov coefficient, rock fracturing). In addition, it contains solid and block models of the contour massifs sections surveyed with ground-penetrating radar. The mineshaft's submodel contains a wireframe and a solid model of the mine working. The damage submodel is built on the basis of shaft survey data, it contains wireframe and solid models of detected faults to the shaft lining (water jets outflows, damage to the waterproofing and divergences of construction joints, cutter break and cracks zones in concrete, a single attachment violation of the bunton and leak at an attachment point of the bunton). Building of vertical and arbitrary sections is possible on the basis of the described model with using symbols created with built-in Mineframe toolkits (classifier, line and hatch, symbol, palette editors). In a work process, the volumes of target breeds are calculated. The model can be used for a complex analysis of the total data from ground-penetrating radar sensing and visual inspection of the shaft, as well as for improving of efficiency assessment of the planned wellbore operations in this mineshaft.

Key words: 3D model, Mineframe, visualization, computer modeling, support, modeling of workings, damage to the support, tamper.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00581-19-00, тема № 0405-2019-0007

Состояние проблемы

В горном массиве Южно-Кемпирсайских (Донских) месторождений хромовых руд построена вертикальная горная выработка — ствол «Вентиляционный» шахты «10-летия независимости Казахстана» (Донской ГОК). Геологическая обстановка в Кемпирсайском массиве описана в [1, 2], в том числе с позиций иерархически блочной модели – в [3]. Через три года после завершения проходки и крепления возникает необходимость ремонта ствола вследствие сложных горно-геологических условий, проявляющихся в значительном воздействии сил горного давления на крепь (примеры подобного воздействия даны в [4] и [5], изучение напряженно-деформированного состояния крепи на шахтах Донского ГОКа – в [6]) и вмещающие ее породы, что привело к формированию участков повышенной трещиноватости приконтурного массива.

Первоначально возникшие течи в стволе были устранены тампонированием, но спустя три года в нем обнаружены новые дефекты. В настоящее время стоит задача проведения повторного тампонажа (современный взгляд на методику тампонажных работ изложен в [7]). Имеется гипотеза, согласно которой просачивание воды происходит через участки разуплотненных горных пород, поэтому необходимо определить следующее: интервалы ствола, которые необходимо тампонировать в первую очередь, причины обводнения, а также объемы пород, подвергающихся тампонажу, для вычисления требуемого количества заполнителя – смеси MasterRoc 55.

Данные задачи можно решить, построив соответствующую модель. Заметим, однако, что информация, на основе которой строилась модель, находилась в разобщенных источниках и в различных форматах (бумажных, электронных текстовых, растровых и т.д.). Для систематизации и комплексного анализа большого объема данных, способствующих достижению поставленной цели, необходимо выполнить оцифровку этой информации и затем – моделирование с использованием соответствующего программного обеспечения (ПО), которое сводит все интересующие нас исходные данные воедино.

Таким образом, целью работы является создание цифровой 3D-модели системы «горные выработки — крепь — вмещающие породы», позволяющей осуществлять анализ совокупности исходных данных, пополнять и актуализировать данные, устанавливать пространственные связи между ними, визуализировать проявления процессов, связанных с изменением состояния крепи и закрепного пространства, и выполнять необходимые измерения в пространстве данных.

Методы исследования и используемое ПО

В качестве ПО для решения поставленной задачи выбрана система автоматизированного планирования, проектирования и сопровождения горных работ Mineframe (версия 7.0.49.5842), подробно описанная в [8]. Отметим, что существуют программные аналоги данной горно-геологической информационной системы, такие как Micromine, GEOVIA Surpac, ArcGIS (включает модуль ArcScene для работы с 3D-данными) и др. Примеры использования этих систем даны, соответственно, в [9], [10], [11], обзор продуктов ArcGIS сделан в [12]. Можно заключить, что для решения поставленных задач возможно использовать любой программный продукт из указанных.

Для геологической субмодели использовались «Данные инженерно-геологической колонки. Проект института Казгипроцветмет К-226197-ПП, 2004 г.». В частности, были взяты данные о границах инженерно-геологических элементов (ИГЭ), виде горных пород, слагающих геологические слои внутри каждого ИГЭ, коэффициент крепости пород по Протодьяконову, показатель трещиноватости. Для моделирования повреждений крепи привлекались данные из журнала обследования ствола. Среди повреждений отмечены зоны шелушения бетона (заколообразования), зона обильного

течения воды, участки с наличием трещин в бетоне, выходы струй воды, нарушение и течь в местах крепления расстрелов, расхождения и течи технологических швов. Конкретные местонахождения протекания воды в последних не установлены.

Для определения высоты ярусов и расположения швов взяты данные журнала проходки (определено, что на обследованном участке высота ярусов равна 4506 мм, высота бетонных колец – 2000 мм). Также использовались первично обработанные данные профилей георадиолокационного зондирования, содержащие информацию о границах различных блоков горных пород в непосредственной близости от крепи (глубина зондирования 5 м). Последние были в ходе работы дополнительно обработаны средствами Microsoft Excel, чтобы добиться возможности их дальнейшего использования в Mineframe (например, были удалены артефакты первичной обработки). Далее на основе уже вторично обработанных данных строились каркасные модели соответствующих блоков.

Результаты

Построена компьютерная модель пространства ствола «Вентиляционный», бетонной крепи и примыкающих к крепи горных пород с указанием выбранных характеристик последних, представляющая собой технологическую базу ПО Mineframe. Она строилась с применением объектно-ориентированного подхода, раскрытого в [13], в связи с чем структурирована на идейном уровне в субмодели (понятие «субмодели» дано также в [13]):

- геологическую, которая включает в себя каркасные и блочные модели горных пород, их условные обозначения (блочные модели представлены на рис. 1);
- субмодель ствола (каркасная модель выработки);
- субмодель повреждений крепи (каркасные пространственные модели дефектов);

Структурирование проявляется в схеме построения дерева технологической структуры модели в менеджере объектов Mineframe. Для удобства визуализации также отображаются твердотельные модели, построенные на основе каркасных. Создание блочных моделей служит цели определения объема частей массива, в которых будет проведен тампонаж.

В геологическую субмодель были включены характеристики наличествовавших в исходных данных ИГЭ (21 шт.), условные обозначения присвоены горным породам из верхних семи и части восьмого ИГЭ, вплоть до глубины 340 м (определено, что устье ствола имеет абсолютную отметку 388,15 м), что обеспечивает покрытие обследованного участка. Водоносные породы представлены синим цветом, тампонируемые ранее – оранжевым.

Твердотельная модель ствола, смоделированного штатными средствами Mineframe, в поперечном сечении представляет собой правильный 24-угольник. Аналогично твердотельной моделью представлена крепь (для удобства визуализации ее модель сделана прозрачной).

Кроме того, в модели учтены 17 швов, не имеющих обнаруженных дефектов, 9 расходящихся швов, 12 швов с признаками течи, 50 выходов струй воды (часть из них лежит выше участка, подвергнутого зондированию). Каждому объекту определенного типа (блок пород, шов, выход струи воды и т.п.) в модели присвоен номер.

Ниже на рис. 1 – 6 проиллюстрированы геологическая субмодель, субмодель повреждений крепи и создание разрезов на их основе.

На рис. 2 представлены течи швов (кольца синего цвета) и выходы струй воды (сферические объекты, диаметр в модели – 5 см) внутри прозрачного слоя водоносных пород голубого цвета, целевого для тампонажа.

Процесс создания блочной модели проиллюстрирован на рис. 3, одновременно автоматически подсчитывается количество блоков и суммарный объем модели

выбранного участка вмещающего массива. Перед созданием блочной модели были выделены однородные по своему составу и водоносности части массива горных пород, заключение делалось на основании геофизических данных. Соответствующие профили зондирования сводились в один связный блок. Для каждого подобного блока пород была построена собственная блочная модель, состоящая из кубов со стороной 1 м.

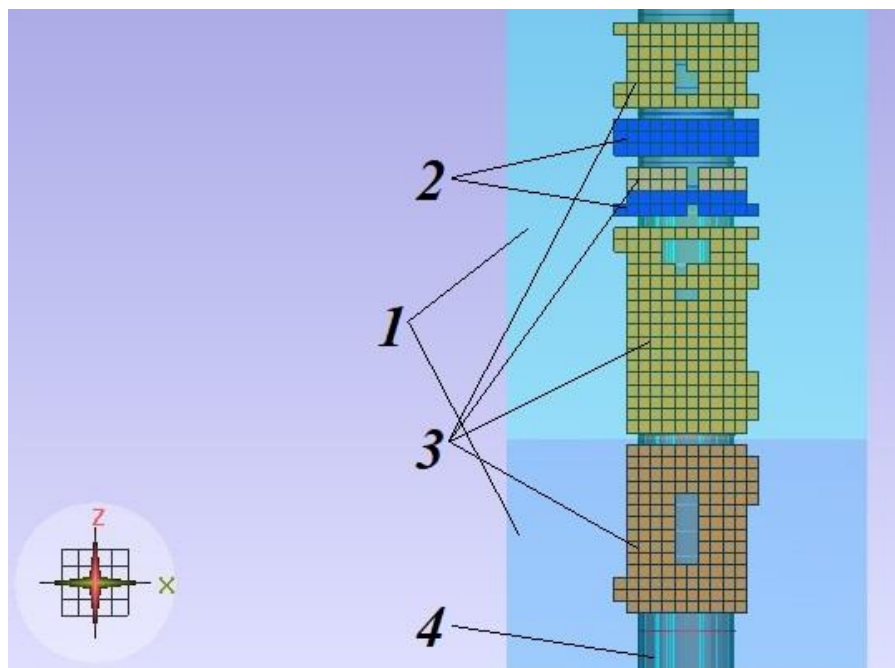


Рис. 1. Блочные модели целевых объемов пород, вид сбоку:
1 – ИГЭ, включающие обследованный участок; 2 – водообильные блоки;
3 – тампонируемые блоки; 4 – зона обильного течения воды

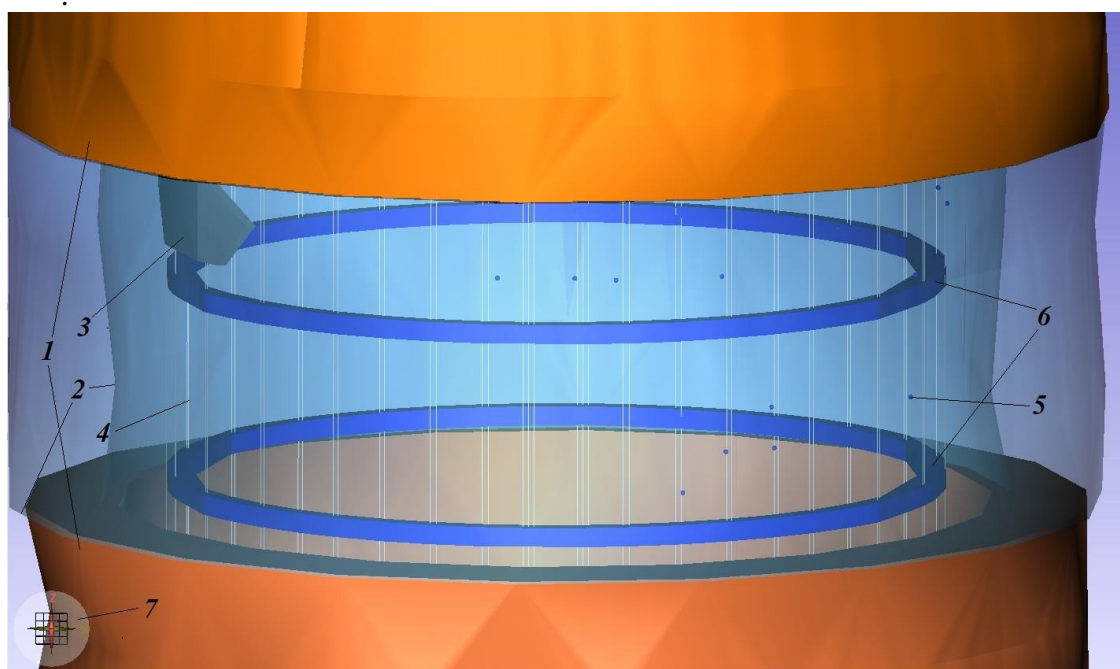


Рис. 2. Водообильный блок в интервале 68–72 м с наличием текущих швов:
1 – тампонируемые участки закрепного массива;
2 – внутренняя и внешняя поверхности водообильного блока;
3 – зона трещиноватости бетона; 4 – проволочная модель ствола;
5 – выход струи воды; 6 – швы с нарушением гидроизоляции; 7 – проекция плоскости O_{xz}

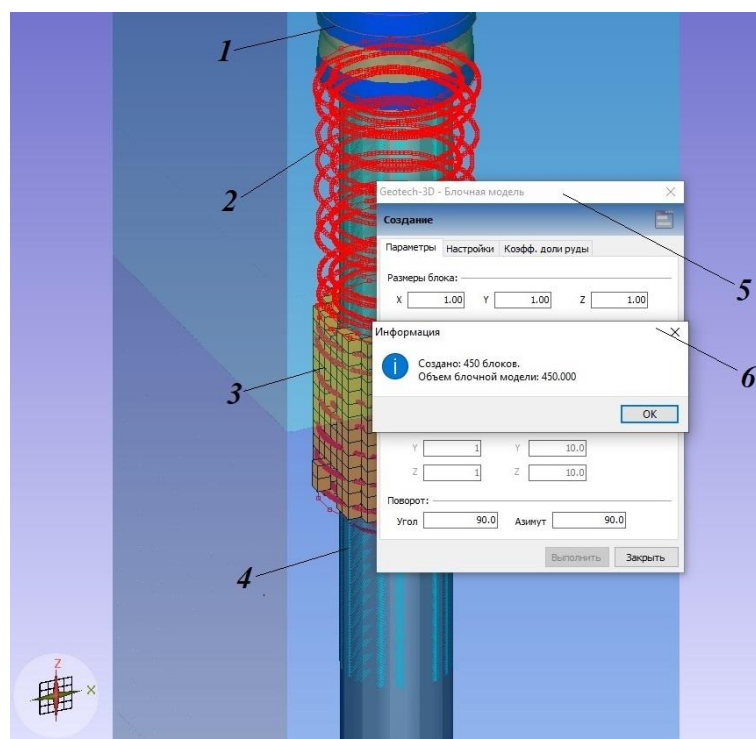


Рис. 3. Создание блочной модели для одного из целевых участков:

- 1 – твердотельные модели вышележащих участков; 2 – каркас, для которого строится блочная модель;
3 – уже построенные блочные модели нижележащих участков; 4 – зона обильного течения воды;
5 – окно параметров блочной модели; 6 – окно результатов построения блочной модели

На рис. 4 можно видеть объемную зону заколообразования бетона, из которой бьют струи воды (отображение самого ствола отключено, видны текущие швы).

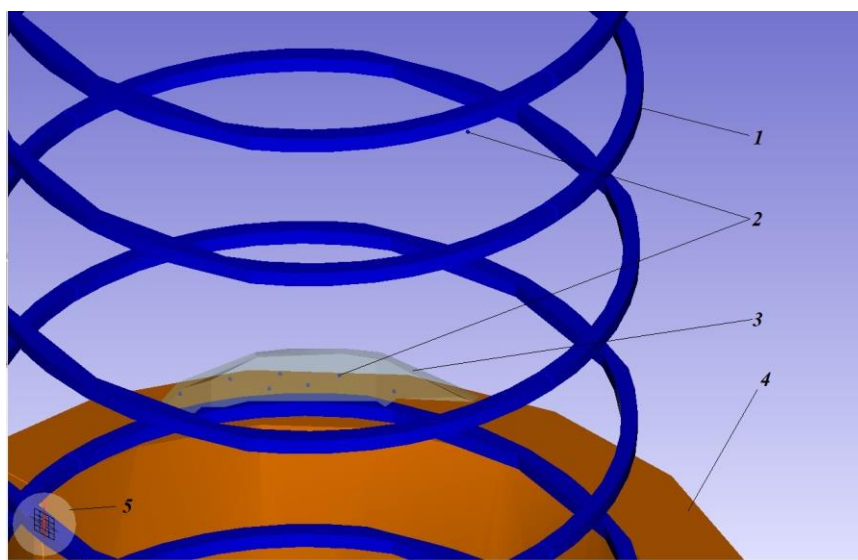


Рис. 4. Зона заколообразования бетона с выходами струй воды:

- 1 – шов с нарушениями гидроизоляции; 2 – выходы струй воды; 3 – зона заколообразования;
4 – тампонируемый участок закрепного массива; 5 – проекция плоскости O_{yz}

Возможности создания разрезов продемонстрированы на рис. 5. Имеются отметки глубины ствола. Различные типы пород обозначены выбранными цветами и штриховками (условные обозначения и их привязка к соответствующим слоям созданы с помощью встроенных инструментов Mineframe: редакторов классификатора, линий и штриховок, символов, палитр). Видны контуры целевых для тампонажа участков массива.

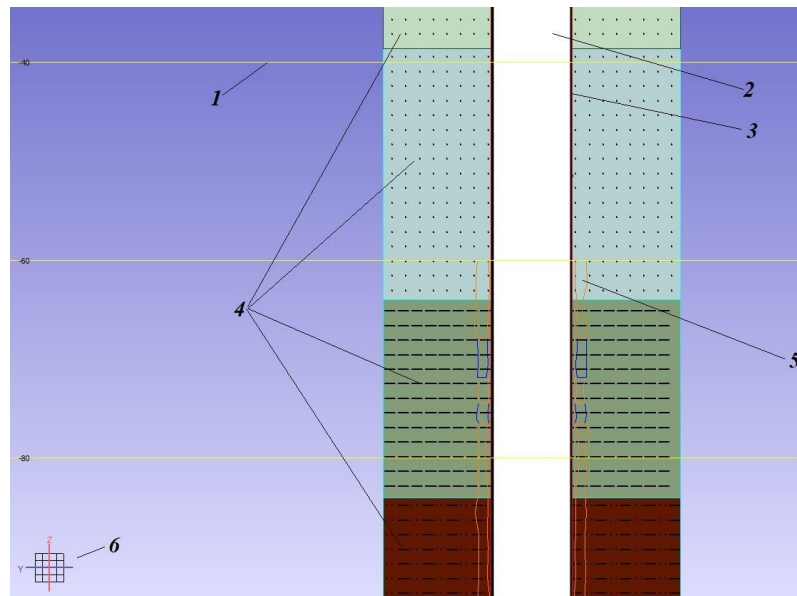


Рис. 5. Вертикальный разрез целевого участка:
1 – отметка глубины; 2 – ствол; 3 – крепь; 4 – литологические разности; 5 – контур целевого участка;
6 – проекция плоскости разреза на видовой экран

На рис. 6 отображен процесс создания разреза в выбранной плоскости. Зеленым помечена сфера вращения для ручного выбора положения секущей плоскости, красным – получаемые сечения.

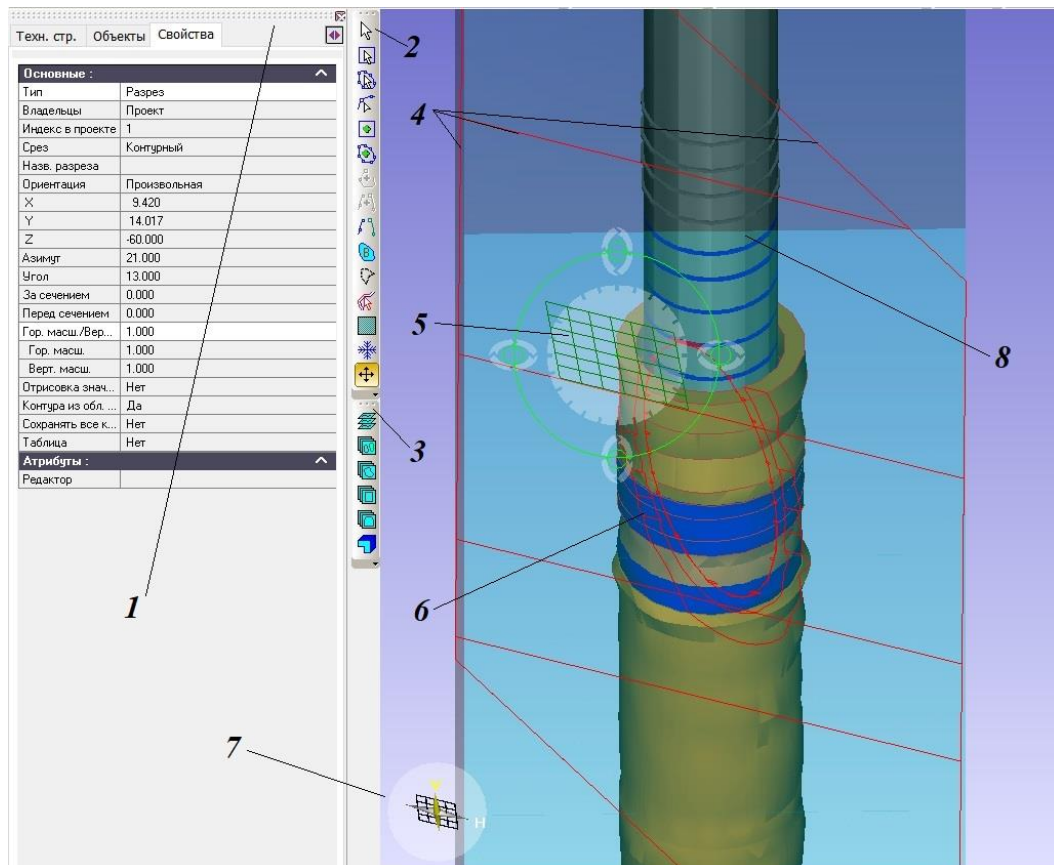


Рис. 6. Создание произвольного разреза:
1 – окно менеджера объектов; 2 – панель редактирования; 3 – панель объектов; 4 – сечения ИГЭ плоскостью разреза; 5 – плоскость разреза и сфера вращения; 6 – сечения ствола и целевых участков массива;
7 – проекция плоскости разреза; 8 – ствол и технологические швы

Также при построении блочных моделей были определены объемы целевых пород (табл. 1).

Таблица 1

Объемы пород, подлежащих тампонажу

Глубина, м	Горные породы	Трещиноватость	Объем, м ³	Количество выходов струй воды
60,0–67,906	габбро-амфиболиты	раздробленные	232	6
67,906–71,862			90	25
71,862–74,415			53	нет данных (зона обильного течения воды)
74,415–76,518			60	
76,518–94,892			450	
94,892–109,063	амфиболиты		348	

Как видно из табл. 1, половина из отмеченных выходов струй воды (25 из 50) концентрируется на уровне водообильного слоя на глубине 68 – 72 м. Следовательно, данные обследования ствола и результаты геофизического обследования согласуются между собой. Однако отсутствие актуальных данных о водопитоке в стволе на различных глубинах и точных значений обводненности массива не позволяет сделать окончательный вывод о доле различных участков в обводнении ствола.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующий вывод: полученная компьютерная 3D-модель обеспечивает не только визуализацию заложенных в базу данных объектов, что облегчает планирование дальнейшего ремонта, но и позволяет повысить эффективность оценки требуемого для проведения тампонажных работ материала благодаря учету в модели характеристик пород, подвергающихся тампонажу, и их объема. Также она может использоваться в качестве электронного учебного пособия при обучении горному делу.

Имеются следующие перспективы дальнейшего развития данной работы:

- получение закономерностей расположения участков, на которых были отмечены повреждения крепи в ходе визуального обследования ствола «Вентиляционный»;
- разработка алгоритмов анализа данных и создание рейтинговой блочной модели приконтурного горного массива, которая позволит оцифровать участки с неблагоприятными условиями;
- описание методического подхода к моделированию систем типа «вмещающий горный массив — горные выработки — повреждения крепи» для рейтинговой оценки влияния геологических условий на срок службы выработок;
- модель может быть дополнена за счет более точного учета толщины бетонной крепи, а также наличия тубингов на определенных участках;
- данная модель служит базисом для проведения комплексного анализа пространственных связей между повреждениями крепи и целевыми блоками пород на основе данных запланированных исследований нижележащих участков ствола;
- предполагается расширение модели посредством добавления в нее модели близлежащего ствола «Скиповой», расположенного в пределах той же промплощадки, что и ствол «Вентиляционный».

Список литературы

1. Балек А.Е., Панжин А.А., 2018. Мониторинг деформационных процессов в породном массиве Донских хромитовых месторождений: учет влияния иерархической блочности. *Современные проблемы механики*, № 33 (3), С. 83 – 91.
2. *Горное производство черной металлургии Урала*. Под ред. И.В. Дементьева, В.Л. Яковлева, 2006. Екатеринбург: Изд-во ГГУ, 737 с.
3. Балек А.Е., Панжин А.А., 2017. Решение проблем геомеханического обеспечения подземных горных работ на хромитовых месторождениях Донского ГОКа. *Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: VI Международная научно-техническая конференция (г. Екатеринбург, 18–19 апреля 2017 г.): сборник докладов*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, С. 241–249.
4. Балек А.Е., 2014. Особенности формирования напряжений в крепи вертикальных выработок в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния скальных породных массивов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 202 – 212.
5. Озорнин И.Л., Балек А.Е., Каюмова А.Н., 2020. Формирования нагрузок на крепь шахтных стволов в иерархически блочной среде под влиянием современных геодинамических движений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 - 1, С. 161 – 169.
6. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Сентябов С.В., 2019. Особенности формирования напряженно-деформированного состояния в бетонной крепи стволов Донского и Гайского ГОКов. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 4, С. 12 - 23.
7. Лисковец А.С., Тациенко В.П., Мешков А.А., 2020. Направления развития и совершенствования тампонажной крепи. *Горная промышленность*, № 2, С. 88 – 93.
8. *Научные и практические аспекты применения цифровых технологий в горной промышленности*. Под науч. ред. С.В. Лукичева, 2019. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 192 с.
9. Басаргин А.А., 2016. Моделирование месторождений рудных полезных ископаемых с использованием геоинформационной системы Micromine. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 1., № 2, С. 151 – 155.
10. Огородова И.В., 2019. Методика создания трехмерных геологических моделей в программе Surpac. *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*, № 2 (39), С. 227 - 230.
11. Аль-Дамлахи Июссеф, 2019. Problem solving experience in data visualization using ArcGIS software. *Software & Systems*, № 1, С. 146 – 149.
12. Линейка программных продуктов ArcGIS. Общество с ограниченной ответственностью "Компания Совзонд" (Москва), 2013. *Геоматика*, № 1, С. 92 – 98.
13. Шек В.М., 2000. Объектно-ориентированное моделирование горнопромышленных систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 161–165.

References

1. Balek A.E., Panzhin A.A., 2018. *Monitoring deformationnykh protsessov v porodnom massive Donskikh khromitovykh mestorozhdenii: uchet vliyaniya ierarkhicheskoi blochnosti* [Monitoring of deformation processes in the rock mass of the Don chromite deposits: accounting for the influence of hierarchical blockage]. *Sovremennye problemy mekhaniki*, № 33 (3), Pp. 83 – 91.
2. *Gornoe proizvodstvo chernoii metallurgii Urala* [Mining production of ferrous metallurgy of the Urals]. Pod red. I.V. Dement'eva, V.L. Yakovleva, 2006. Ekaterinburg: Publ. GGU, 737 p.
3. Balek A.E., Panzhin A.A., 2017. *Reshenie problem geomekhanicheskogo obespecheniya podzemnykh gornykh rabot na khromitovykh mestorozhdeniyakh Donskogo*

GOKa [Solving the problems of geomechanical supporting of underground mining operations at the chromite deposits of the Don GOK]. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdenii: VI Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* (g. Ekaterinburg, 18–19 aprelya 2017 g.): sbornik dokladov. Ekaterinburg: Publ. UGGU, Pp. 241–249.

4. Balek A.E., 2014. *Osobennosti formirovaniya napryazhenii v krep'i vertikal'nykh vyrabotok v usloviyakh zapredel'nogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya skal'nykh porodnykh massivov* [Features of the formation of stresses in the support of vertical workings in the conditions of the exorbitant stress-strain state of rock massifs]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, Pp. 202 – 212.

5. Ozornin I.L., Balek A.E., Kayumova A.N., 2020. *Formirovaniya nagruzok na krep'i shakhtnykh stvolov v ierarkhicheski blochnoi srede pod vliyaniem sovremennykh geodinamicheskikh dvizhenii* [Formation of loads on the support of mine shafts in a hierarchically blocky environment under the influence of current geodynamic movements]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 - 1, Pp. 161 – 169.

6. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Sentyabov S.V., 2019. *Osobennosti formirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v betonnoi krep'i stvolov Donskogo i Gaiskogo GOKov* [Features of the formation of the stress-strain state in the concrete support of shafts of the Donsky GOK and Gaisky GOK]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 4, Pp. 12 – 23.

7. Liskovets A.S., Tatsienko V.P., Meshkov A.A., 2020. *Napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya tamponazhnoi krep'i* [Directions of development and improvement of grouting support]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2, Pp. 88 – 93.

8. *Nauchnye i prakticheskie aspekty primeneniya tsifrovyykh tekhnologii v gornoi promyshlennosti* [Scientific and practical aspects of the application of digital technologies in the mining industry]. Pod nauch. red. S.V. Lukicheva, 2019. Apatity: Publ. FITs KNTs RAN, 192 p.

9. Basargin A.A., 2016. *Modelirovanie mestorozhdenii rudnykh poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnoi sistemy Micromine* [Modeling of ore mineral deposits using the Micromine geoinformation system]. *Interekspo Geo-Sibir*, T. 1., № 2, Pp. 151 – 155.

10. Ogorodova I.V., 2019. *Metodika sozdaniya trekhmernykh geologicheskikh modelei v programme Surpac* [Methodology for creating three-dimensional geological models in the Surpac geoinformation system]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala*, № 2 (39), Pp. 227 - 230.

11. Al'-Damlakhi Iussef, Problem solving experience in data visualization using ArcGIS software. *Software & Systems*, № 1, Pp. 146 – 149.

12. *Lineika programmnykh produktov ArcGIS*. Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Kompaniya Sovzond" (Moscow), 2013 [The ArcGIS software product line. Limited Liability Company "Sovzond Company" (Moscow), 2013]. *Geomatika*, № 1, Pp. 92 - 98.

13. Shek V.M., 2000. *Ob"ektno-orientirovannoe modelirovanie gornopromyshlennykh system* [Object-oriented modeling of mining systems]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, Pp. 161–165.