

СТАТЬИ

УДК 622.013

DOI 10.17513/use.38339

МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШЕСЫРСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ MICROMINE**Кисляков В.Е., Федотов А.С., Снетков Д.С., Шварцкопф А.В.***ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск,**e-mail: ar.fedotow@yandex.ru*

Цель работы – создание достоверного цифрового двойника месторождения для дальнейшего его использования в исследовании особенности строения месторождения и поиска зависимостей пространственного распределения качественных характеристик пласта. В работе приведен порядок моделирования угольных месторождений в горно-геологической информационной системе Micromine на основе данных геологоразведки Большесырского бурогоугольного месторождения. Для достижения поставленной цели произведено поэтапное моделирование, включающее в себя подготовку и импорт данных, создание базы данных, визуализацию траекторий скважин, создание поверхностей пластов и блочной модели с наполнением данными о качестве полезного ископаемого. Результат исследования показал высокую сходимость с исходными данными, что позволяет заявлять о достоверности блочной модели и дальнейшем ее использовании в исследованиях. Несмотря на то, что государственные органы при экспертизе и постановке запасов на баланс требуют предоставления графических материалов, выполненных традиционным способом, создание цифровой модели остается для исследователей полезным результатом. Наличие достоверного цифрового двойника позволит подробно и с большей точностью исследовать месторождение и увеличивать количество оцениваемых вариантов с меньшими трудозатратами в сравнении с исследованием геологической информации, представленной в классическом виде.

Ключевые слова: уголь, бурогоугольное месторождение, моделирование, стратиграфическое моделирование, Micromine, блочное моделирование

MODELING OF THE BOLSHESYRSKOYE LIGNITE DEPOSIT IN THE MINING AND GEOLOGICAL INFORMATION SYSTEM MICROMINE**Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Snetkov D.S., Shvartskopf A.V.***Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: ar.fedotow@yandex.ru*

The objective of the work is to create a reliable digital twin of the deposit for its further use in the study of the structural features of the deposit and the search for dependencies of the spatial distribution of the qualitative characteristics of the seam. The work presents the procedure for modeling coal deposits in the mining and geological information system Micromine based on the geological exploration data of the Bolshesyrskoye lignite deposit. To achieve this goal, step-by-step modeling was performed, including the preparation and import of data, the creation of a database, the visualization of well trajectories, the creation of seam surfaces and a block model filled with data on the quality of the mineral. The result of the study showed high convergence with the original data, which allows us to declare the reliability of the block model and its further use in research. Despite the fact that government agencies require the provision of graphic materials made in the traditional way during the examination and putting of reserves on the balance sheet, the creation of a digital model remains a useful result for researchers. The presence of a reliable digital twin will allow for a detailed and more accurate study of the deposit and an increase in the number of options being assessed with less labor costs compared to the study of geological information presented in a classical form.

Keywords: coal, lignite deposit, modeling, Micromine, stratigraphic modeling, block modeling

Введение

Цифровизация с течением времени проникает во все отрасли жизни, где применяются различные цифровые технологии на протяжении многих лет. Горное дело не осталось в стороне, и там, как и во многих других сферах, происходит активное внедрение новых цифровых технологий. В современном мире уже невозможно представить проектирование без применения цифровых технологий и специализированных программ. Кроме того, цифровые технологии активно проникают и непосредственно в производственные процессы, где дают возможность

получать актуальную информацию о положении техники, ее состоянии и прочих характеристиках, а также вести статистику работы без постоянного участия человека.

Повышение требований к точности определения границ рудных тел, границ пластов, границ горных работ, а также снижение трудоемкости и ускорение процесса обработки и представления горно-геологической информации без потери качества привели к необходимости внедрения во все этапы горного дела различных систем автоматизированного проектирования (САПР). Для 2D-проектирования распространены

такие программы, как AutoCAD, NanoCAD. Исследователями достигнуты положительные результаты при создании 3D-моделей в AutoCAD Civil [1], но упомянутые программы полноценно не предназначены для горного дела, и функционал программ не позволяет решать все возникающие задачи. Такие программы, как Surpac [2] или Carlson Software, не нашли широкого применения в исследованиях и проектировании месторождений, хотя имеют ряд полезных функций, которых нет в аналогичных программах или есть, но они могут быть реализованы более сложным путем. На момент исследования наиболее широко применим в моделировании месторождений и решении задач с использованием полученных моделей программный комплекс Micromine [3; 4], а прямую конкуренцию ему составляют такие программы аналоги Leapfrog, Datamine, MineFrame. Учитывая активное развитие и внедрение нейронных сетей в различные сферы, достижения в этой области проникли и в построение цифровых моделей месторождений [5; 6].

В настоящее время с целью повышения точности и повышения скорости обработки информации при разведке и эксплуатации рудных месторождений широко применяют методы цифрового моделирования с использованием возможностей программного комплекса Micromine. Упомянутый комплекс наиболее часто применяют в проектировании, а постоянно пополняемый набор функций дает больше возможностей исследователям, проектировщикам и техническим специалистам на производстве. Micromine применяют на всех этапах исследований и проектирования месторождений, от статистической обработки геологических данных и создания цифровой модели месторождения (в том числе блочной модели) до планирования и построения проектных положений горных работ и отвалов требуемой конфигурации.

Программа также производит расчеты объемов, что позволяет оперативно оценивать проектные решения, а использование блочных моделей позволяет определить качество полезного ископаемого в любой оцениваемой точке или заданном контуре. Такие возможности ускоряют процесс исследований, а в некоторых случаях позволяют оперативно получать требуемую информацию без привлечения дополнительных трудовых ресурсов.

Необходимо отметить, что применение описываемого комплекса не исключает тра-

диционные методы обработки геологических данных. В настоящее время, при постановке геологических запасов на баланс, в Государственную комиссию по запасам (ГКЗ) необходимо в дополнение к предоставляемой блочной модели предоставлять графические материалы, выполненные традиционным методом, для сопоставления и проверки достоверности предоставляемой информации [7].

Тем не менее, несмотря на неполное использование программ как недропользователями, так и государственными органами, их применение в проектировании значительно облегчает труд проектировщиков и исследователей, позволяет повысить качество и точность результатов.

В настоящей работе рассмотрен способ моделирования угольных месторождений с использованием горно-геологической информационной системы (ГГИС) Micromine, используя данные разведки Большесырского бурогоугольного месторождения.

Цель работы – создание цифровой модели месторождения на основе имеющейся геологической информации, для дальнейшего его использования в исследовании особенности строения месторождения и зависимостей пространственного распределения качественных характеристик пласта.

Материалы и методы исследования

Основным методом настоящего исследования является моделирование, а также дальнейший анализ полученной модели. Модель месторождения – это «цифровой двойник» существующего объекта исследования [8; 9]. Моделирование включает в себя метод создания поверхностей с использованием триангуляционных нерегулярных сетей [10]. Также для построения сеток платов, присвоения качественных характеристик блочной модели могут быть использованы различные методы интерполяции данных (метод обратных взвешенных расстояния, кригинг [11, с. 113], кокригинг и другие методы [12; 13]).

Моделирование пластовых месторождений можно разделить на следующие этапы:

- подготовка табличных данных, включающих в себя информацию, описывающую каждую скважину;
- импорт подготовленных данных в программный комплекс и их последующее объединение в единую базу данных (БД) по скважинам;
- проверка БД и исправление ошибок;

- настройка визуализации БД (траектория скважин, штриховка интервалов) для визуального контроля дальнейших результатов;
- моделирование поверхностей почвы, кровли пласта (-ов) и сеток мощностей;
- блочное моделирование и присвоение блочной модели качественных характеристик на основании результатов опробования;
- анализ полученных результатов.

Исходными данными для моделирования служат данные геологоразведки с результатами анализов по каждой пробе и результаты маркшейдерской съемки. Основная информация, без которой невозможно начать моделирование, следующая:

- координаты устьев скважин (x, y, z);
- данные геофизических исследований по каждой скважине с указанием литотипов пород, их интервалов по глубине в формате «от» и «до», а также описание инклинометрии скважин при ее наличии;
- результаты анализов отобранных проб (определение зольности, влажности, выхода летучих веществ, теплоты сгорания);
- прочая информация, описывающая керн;
- результаты маркшейдерской съемки;
- описание тектонических нарушений (при наличии).

Указанный перечень представляет фундамент для дальнейшего процесса моделирования.

При моделировании были использованы данные по 360 разведочным скважинам, более 1500 результатов анализов угольных проб.

Последовательность создания модели

Используя подготовленные заранее табличные материалы, формируют два, а при наличии данных об инклинометрии скважин – три файла с данными. Информацию импортируют в ГИС и осуществляют ее проверку с помощью встроенных функ-

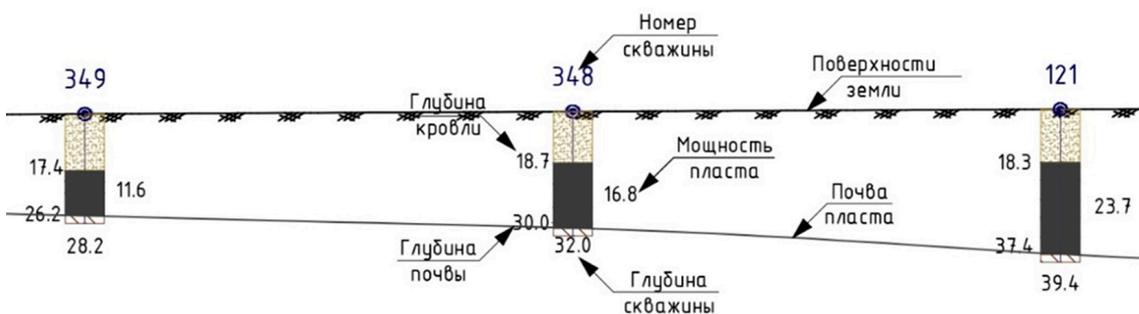
ций программы, которые позволяют найти ошибки, не позволяющие вести дальнейшую корректную работу. Наиболее распространенные ошибки: наличие пустых строк, интервалы с мощностью 0 метров, наличие дублирующих записей, разница между общей глубиной скважины и глубиной опробования. После проверки файлы объединяют в единую базу данных скважин.

Для наглядного отображения и возможности визуального анализа геологической информации настраивают визуализацию скважин. Процесс визуализации включает выбор информации, которую необходимо отобразить (устье скважины и ее траектория, название скважины, ее глубина). Для отображения литологических разностей задают штриховки и цвета интервалам вдоль траектории скважин в зависимости от типа пород.

Также возможно добавлять дополнительную информацию вдоль осей скважин для определенных литотипов или для каждого интервала (мощность, глубину, абсолютную отметку, зольность или другие характеристики). Пример визуализации представлен на рис. 1.

Визуальный анализ вынесенных скважин позволяет оценить сложность строения месторождения, а также выявить некорректно внесенные данные по скважинам и осуществить их дальнейшую оперативную корректировку.

На следующем этапе моделирования необходимо создать стратиграфическую иерархию. Процесс задания стратиграфической иерархии имеет ключевое значение и определяет последовательность пластов, а также наличие зон слияния и расщепления пластов (при их наличии). Исследуемое месторождение имеет простое строение, поэтому описание процесса стратиграфического моделирования не приведено. Описание процесса упомянуто в работе [14].



**выноски добавлены авторами самостоятельно для пояснений
Рис. 1. Пример визуализации скважин*

На основании созданной стратиграфии, используя функционал программы, создают поверхности пластов и пустых пород, используя ранее загруженные данные по скважинам. Полученные поверхности используют для дальнейшего моделирования, а также для самостоятельного представления в виде изолиний почвы (кровли), мощности пластов. Поверхности пласта программа создает, не учитывая его границы в плане, поэтому заранее следует подготовить замкнутый контур выхода пласта под наносы для дальнейших корректных построений.

Следующий этап моделирования – блочное моделирование. Суть блочного моделирования заключается в создании множества параллелепипедов заданного размера, которые располагаются в пространстве, ограниченном дневной поверхностью и созданными поверхностями пластов, и повторяют форму залежи. Центры созданных 3D-блоков заданных размеров имеют уникальные ко-

ординаты x , y , z , а также принадлежность к тому или иному типу породы. Такую модель называют пустой блочной моделью, так как в ней отсутствуют характеристики полезного ископаемого и, используя ее, можно получить только объем пласта [15]. На рис. 2 представлен фрагмент блочной модели Большесырского месторождения.

Опытным путем определено, что размеры блоков в плане и по высоте стоит определять для каждого моделируемого месторождения. Высота не должна быть слишком большой, иначе участки пласта, имеющие мощность меньше высоты блока, не будут заполнены, что в дальнейшем приведет к некорректной оценке объема. А слишком большие размеры блоков в плане не отразят особенности гипсометрии пласта. Установка минимальных значений для всех трех параметров увеличит количество блоков и затруднит дальнейшую работу, а точности значительно не прибавится.

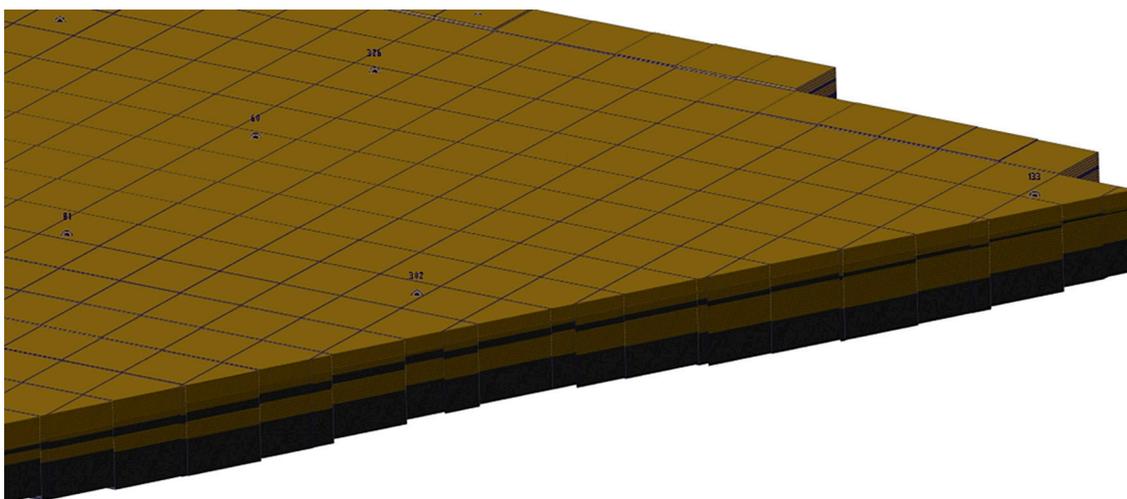


Рис. 2. Блочная модель

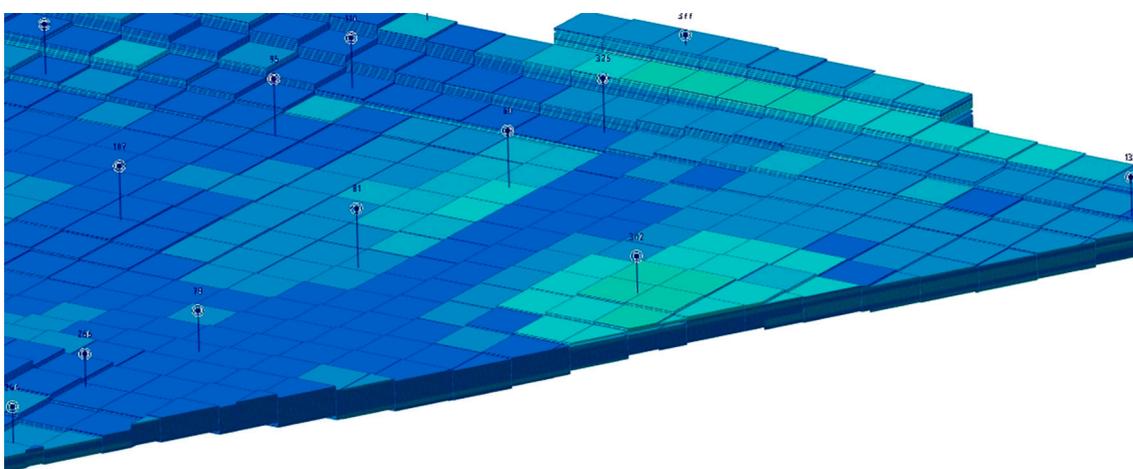


Рис. 3. Блочная модель пласта «Верхнесырский»

В дальнейшем, используя имеющиеся данные опробования по скважинам, созданным блокам присваивают качественные характеристики полезного ископаемого, которые ранее внесены в созданную базу данных. Программа позволяет использовать различные методы интерполяции, перечень которых приведен выше по тексту. В настоящем исследовании использован метод обратных взвешенных расстояний. Для анализа полученной модели пласта, используя инструменты фильтрации и визуализации, настраивают отображение блочной модели с учетом качественных характеристик (отключают отображение пустых пород и задают диапазоны штриховки по значениям зольности). Фрагмент блочной модели пласта с присвоенными качественными характеристиками (зольность) представлен на рис. 3. Цветами выделены интервалы с различными значениями зольности.

Созданная блочная модель позволяет всесторонне исследовать строение месторождения и проводить статистический анализ распределения качественных характеристик полезного ископаемого. Кроме того, функционал программы позволяет оценить объем, тоннаж, площадь полезного ископаемого, его качество в определенном контуре или на определенном горизонте.

Оценка результата моделирования

Используя полученную блочную модель, определен объем полезного ископаемого и произведено сопоставление с утвержденным количеством по месторождению, в результате сопоставления расхождение результатов составило 1%, что является допустимой погрешностью и не окажет существенного влияния на результаты дальнейших исследований. Таким образом, можно сделать вывод о высокой достоверности модели, а следовательно, правомерности дальнейшего использования модели для исследований.

Выводы

1. В процессе моделирования была создана база данных по скважинам, которая содержит информацию по каждой выработке и может быть пополнена с течением времени; получены поверхности почвы, кровли, мощности пластов; на основании поверхностей создана блочная модель месторождения и ей присвоены качественные характеристики (зольность).

2. Модель может быть использована в различных направлениях, если наличие

имеющейся геологической информации не позволяет оперативно получить те или иные сведения. Например, геологический разрез между разведочными линиями, геологический разрез по произвольной линии, план изолиний зольности на определенном горизонте или в границах определенной заходки. Результаты приведенного моделирования позволяют оперативно решать эти вопросы и подобные задачи в кратчайшее время с высокой точностью, что не только снижает трудоемкость, но и позволяет рассматривать большее количество вариантов развития при исследованиях, а 3D-визуализация обеспечивает наиболее наглядное представление сложных участков месторождений.

3. Применение программного комплекса Micromine и описанной методики позволяет получить достоверную цифровую модель месторождения и всесторонне ее анализировать. Учитывая, что использование цифровых технологий снижает трудоемкость исследований, возникает возможность рассматривать большее количество различных вариантов исследуемого объекта, что, в свою очередь, повышает достоверность получаемых результатов.

4. Предложенный порядок моделирования может быть использован в обучении при ознакомлении студентов и технических специалистов с программным комплексом. Основным преимуществом является простота моделирования, что, в свою очередь, позволит освоить основной функционал программы для дальнейшего применения при моделировании более сложных месторождений.

5. Необходимо отметить, что авторы считают, что нет оснований безусловного доверия блочной модели и результаты решения какой-либо задачи с ее использованием требуют критической оценки, а в случаях, когда возникают сомнения в достоверности предоставляемой информации, необходимо обращаться к первичной геологической документации для сопоставления и в случае необходимости вносить корректировки.

Список литературы

1. Чижов М.Н., Лаптева М.И., Маслянюк В.Я., Сюняев Ш.И. 3D-моделирование, проектирование открытых горных работ в среде САПР AutoCAD Civil 3D с использованием геопространственных данных полученных по технологии ДЗЗ с применением беспилотных летательных аппаратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S1–1. С. 339–355.

2. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья // Проблемы недропользования. 2016. № 4 (11). С. 170–176. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.170.

3. Наставко Е.В., Наставко А.В., Кайзер Ф.Ю., Соловьевский А.Н. О цифровой модели угольного месторождения в Кузбассе в ГИС Micromine // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 1 (127). С. 1–4. DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.23.
4. Маниковский П.М., Васютин Л.А., Сидорова Г.П. Методика моделирования рудных месторождений в ГИС // Вестник ЗабГУ. 2021. № 2. С. 6–14. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14.
5. Мельниченко И.А., Кожухов А.А., Омельченко Д.Р., Мосейкин В.В. Построение трехмерной модели месторождения с использованием принципов блочного моделирования и искусственных нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 5–19. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-10-0-5.
6. Sahoo S., Jha M.K. Pattern recognition in lithology classification: modeling using neural networks, self-organizing maps and genetic algorithms // Hydrogeology Journal. 2017. Vol. 25, Is. 2. P. 311-330. DOI: 10.1007/s10040-016-1478-8.
7. Агафонов И.А., Малофеев Д.В. Опыт защиты блочных моделей по угольным месторождениям в ГКЗ // Уголь. 2022. № 3 (1152). С. 90–94. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-90-94.
8. Захаров В.Н., Кубрин С.С. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5–2. С. 31–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_31.
9. Keyan Xiao, Cheng Li, Mingjing Fan, Li Sun, Rui Tang, Nan Li, Xianglong Song, Quantitative prediction methods and applications of digital ore deposit models // Ore Geology Reviews. 2024. Vol. 168. P. 1–16. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2024.106049.
10. Jia Q., Li W., Che D. A Triangulated Irregular Network Constrained Ordinary Kriging Method for Three-Dimensional Modeling of Faulted Geological Surfaces // In IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 85179–85189. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993050.
11. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика: теория и практика / под ред. Р.В. Арутюняна; Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: Наука, 2010. 327 с.
12. Che D., Jia Q. Three-Dimensional Geological Modeling of Coal Seams Using Weighted Kriging Method and Multi-Source Data // in IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 118037–118045. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936811.
13. Qingren Jia, Defu Che, Wenwen Li. Effective coal seam surface modeling with an improved anisotropy-based, multiscale interpolation method // Computers & Geosciences. 2019. Vol. 124. P. 72–84. DOI: 10.1016/j.cageo.2018.12.008.
14. Сидорова Г.П., Маниковский П.М. Прогнозирование качества угля с применением блочной модели пласта (на примере Кутинского бурогоугольного месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 55–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_55.
15. Лихман А.А. Геологическая блочная модель как главный актив горнодобывающего предприятия // Недропользование XXI век. 2020. № 4 (87). С. 170–175.