УДК 622.831:004

Игнатов Юрий Михайлович, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Ignatov Yuri M, associate Professor.
(KuzSTU, Kemerovo)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В МОНИТОРИНГЕ РАБОТ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА

COMPUTER SIMULATION IN MONITORING THE WORK OF A MINING SITE

В статье приводятся результаты исследований по разработке метода прогноза значений показателей геологических условий, которые необходимы при мониторинге работ очистных забоев. Новый метод предлагает цифровой маркшейдерский план горных выработок (ЦМП) импортировать в геоинформационную систему (ГИС) и провести последующие вычисления в прикладных модулях анализа пространственных данных.

Приведены результаты применения предложенного метода по выделению на площади пласта аномальных зон, которые визуализированные на ЦМП показывают их влияние на эффективность работы выемочного участка.

The article presents the results of research into the development of a method for predicting the values of geological condition indicators that are necessary for monitoring the work of stoping faces. The new method involves importing a digital mine survey plan (DMSP) into a geographic information system (GIS) and performing subsequent calculations in application modules for spatial data analysis.

The results of applying the proposed method to identify anomalous zones within the seam area are presented; these zones, visualized on the DMSP, demonstrate their impact on the efficiency of the mining section.

Основной проблемой при составлении паспортов горных выработок, проектов очистных работ и выбора горного оборудования является возможность ошибки в оценке прогнозируемых геологических условий, которые принимаются за исходные. Необходим прогноз впереди забоев горных выработок для проектирования комплекса мер по предупреждению проявления аварий [1].

Компьютерное моделирование, на современном уровне развития технологий, позволяет создать мониторинг работы производственных подразделений шахты с использованием «цифровых советчиков». Определение и нанесение на горную графическую документацию точных границ опасных

зон позволяет разработать профилактические мероприятия и привести решаемую задачу в нужное целевое состояние.

К настоящему времени, для компьютерного моделирования и решения задач с пространственными данными, применяют технологию, которая использует принцип объединения методов цифровой картографии и систем управления базами данных, названную геоинформационной системой (ГИС).

Для создания компьютерной модели целесообразно использовать готовые программные пакеты, реализующие технологию ГИС. В качестве программного ядра актуально выбирать из российских систем: Аксиома, Панорама и др., или из горно-геологических информационных систем (ГГИС): ПАРК. Маинфрэим, Геомикс и др.

Возможно, использовать для моделирования зарубежные ГИС: ArcView, MapInfo, ArcInfo, AtlasGIS и др, а также ГГИС: Micromine, Surpac, Datamine и др.

Метод решения задач с применением компьютерного моделирования представляет собой современный методологический подход, объединяющий теоретический анализ и вычислительный эксперимент для изучения реальных объектов, процессов или систем. Этот метод позволяет получать новые знания, прогнозировать поведение систем и оптимизировать параметры без проведения дорогостоящих или опасных натурных экспериментов.

Для угольных шахт, базовым документом при проектировании и планировании, является маркшейдерский цифровой план (ЦМП) горных выработок, который является картографической основой всей информации по геологии, вентиляции, логистике, работе оборудования и др. На его картографической основе создаётся дежурный цифровой план по отдельным направлениям, с которым работают узкие специалисты.

Компьютерное моделирование объектов и процессов с использованием ЦМП позволяет анализировать и прогнозировать развитие событий путём использования прикладных программных модулей для решения конкретных задач [2, 3].

Далее приводим результаты исследований с применением компьютерного моделирования для оценки геологических условий на примере горных работ шахты «Ерунаковская». Нами выполнялось научное сопровождение отработки лавы 48-9 с проведением комплексных исследований. Произведено прогнозирование показателей горно-геологических условий и напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива. Проводились инструментальные исследования и другие работы. Результаты опубликованы в отчёте [4].

На рисунке №1 представлена копия фрагмента дежурный цифрового плана с маркшейдерскими точками, точками разведочных скважин и подготовительными выработками по шахте Ерунаковская по пласту 48.

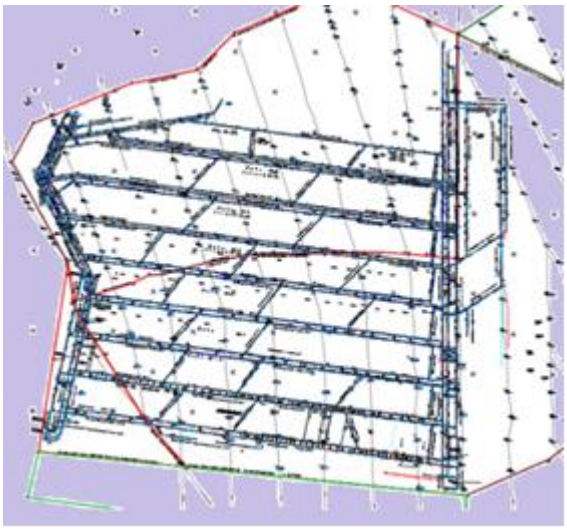

Рис. 1. Копия фрагмента цифрового плана с маркшейдерскими точками.

Для создания цифрового дежурного плана используется программный комплекс CREDO, обеспечивающий возможность обработки материалов топографической съёмки, с последующим экспортированием в nanoCAD. Программа nanoCAD является полноценным отечественным аналогом зарубежного программного обеспечения AutoCAD. Техническими работниками шахты по маркшейдерским точкам составлялся цифровой дежурный план, для разных технических служб шахты.

В наших исследованиях мы экспортировали ЦМП из nanoCAD в ГИС Аксиома и создали пробные компьютерные модели для аэрологии, для планирования горных работ и для геомеханических расчётов.

Компьютерная модель для горной аэрологии, позволяет анализировать системы вентиляции, вести расчёты, определять объёмы дегазации, моделировать разные сценарии и фрагмент её графического файла представлен на рисунке №2.

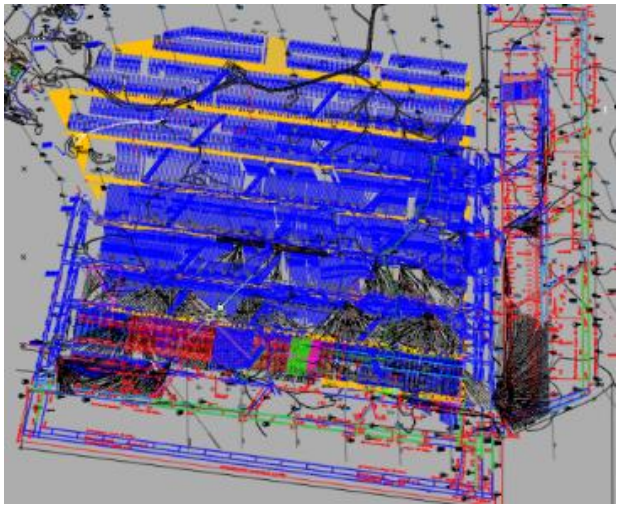

Рис. 2. Копия фрагмента цифрового плана с объектами горной аэрологии.

Компьютерная модель для горной инженерии позволяет определять в каком темпе вести работы, на каком оборудовании и с какими рисками. Она может оптимизировать цикл добычи, и фрагмент её графического файла представлен на рисунке №3.

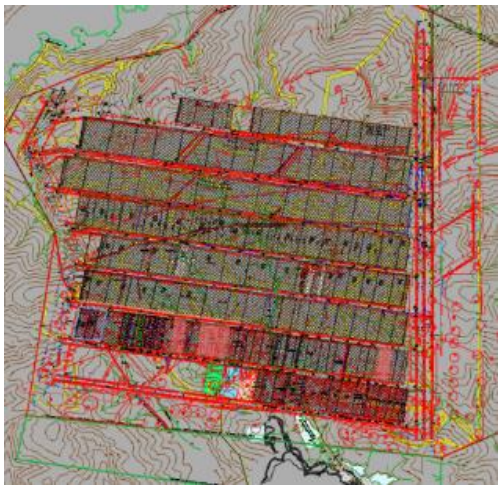

Рис. 3. Копия фрагмента цифрового плана с объектами горной инженерии.

С помощью компьютерной модели для геомеханики (геомеханический модуль) можно определить негативные воздействия со стороны горного массива, прогнозировать аварии и фрагмент её графического файла представлен на рисунке №4.

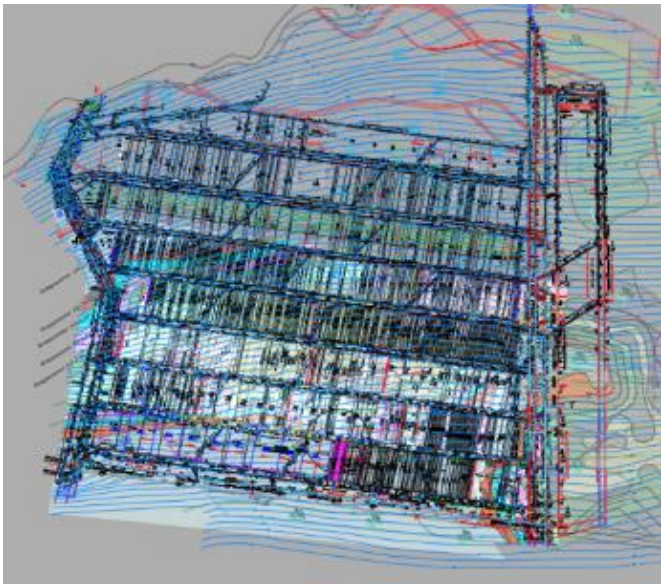

Рис. 4. Копия фрагмента цифрового плана с объектами геомеханики.

Геомеханический модуль является важным слоем в общем цифровом плане шахты и информация в нем хранится в виде комплекта матриц показателей [5]. Фактическая форма угольного пласта определяется по высотным отметкам маркшейдерских точек, расположенных в выработках выемочного участка, которые имеют фиксированные координаты.

Для математического описания гипсометрии пласта принимается квадратичный полином (поверхность второго порядка). Поверхность полинома выступает в роли базового тренда и описывает регулярные изменения формы поверхности как единого целого. Локальные отклонения фактических высотных отметок от этой теоретической поверхности показывают неоднородность деформаций. Большие отклонения от полинома сигнализируют о локальных аномалиях - тектонических нарушениях, наличие скрытых трещин [6].

Метод оценки однородности массива на основе отклонений от квадратичного полинома является лучшим по сравнению с линейной интерполяцией или сплайнами при шаге наблюдений до 100 метров. Он оптимально балансирует между физической природой складкообразования горных пород и математической гладкостью, сглаживая погрешности измерений. На основе квадратичного полинома (второй производной) можно рассчитать такие показатели как кривизну складки и относительные горизонтальные деформации. При линейной интерполяции вторая производная равна нулю. Сплайны обязаны проходить через все заданные точки и случайная ошибка в измерениях вызовет большой скачок. Для изучения отклонений от квадратического полинома используется индекс Хилла.

Такой показатель легко рассчитывается программным обеспечением в автоматическом режиме, позволяя оперативно оценивать целостность массива и вести расчёт НДС по установленным ранее уравнениям связи. После построения модели, делается вычисление прогнозируемых свойств горного массива, с помощью расчётных функций реализованных в пакете программ «Мониторинг поведения вмещающих пород для принятия проектных решений» (МПП).

В модуле МПП создаются прогнозные планы, выполняется пространственный анализ, составляется карта зон концентрации напряжений и риска обрушений. После внесения маркшейдером новых результатов съёмки система пересчитывает места потенциальных вывалов и обновляет сетку для расчёта напряжений.

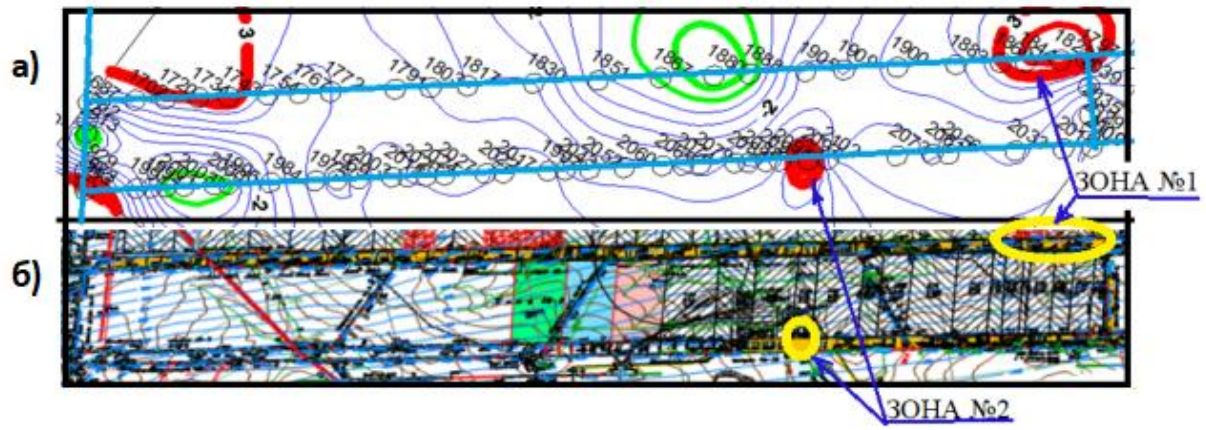

Рис. 5. Копия фрагмента цифрового плана для лавы 48-9 с объектами геомеханики.

а – прогнозный план; **б** – план горных работ.

На рис. 5 представлена копия фрагмента цифрового плана горных выработок лавы 48-9 с зонами аномалий. Аномальные зоны №1 и №2, для данного участка лавы, это антиклинальные складки (флексуры), в которых поверхность пласта на 3 метра откланяется от аналитической поверхности. Их форма получилась в результате сочетания первоначальной и наложенных деформаций [6].

Производится определение показателя деформированности массива (D), как величина отклонения от аналитической поверхности. Предложено установить границы изменений показателя D для классификации. Так при величине D до 5 метров считать, что деформированность массива низкая, в диапазоне (5.1-10) м умеренная, а более 10 м - сильная.

Величина амплитуды аномалии 3 метра в лаве 48-9 соответствует низкой степени деформированности массива, и большое количество газа оказалось запертым в куполах данных двух флексур. При горных работах по добыче угля в зонах аномалии №1 и № 2 были проблемы и осложнения, месячный план не выполнялся см. рис 5б.

Таким образом, внедрение цифровых технологий преобразует традиционные подходы к аналитическим расчётам, обеспечивая исследователей инструментами для оперативного и наглядного анализа величин деформаций и напряжений в период работ в лаве.

Применение прикладных программ с библиотеками искусственного интеллекта, и при наличии информации с датчиков, позволяет разработать «цифровые советчики» для операторов техники и линейного персонала. Это повысит достоверность прогнозов, и сделает возможным переход к управлению геомеханическими рисками на всех этапах освоения месторождения, создав цифровой двойник.

ВЫВОДЫ

1. Применения показателя деформированности является новым эффективным подходом в оценке геомеханического состояния массива и позволяет повысить точность прогноза при использовании компьютерного моделирования.

2. Метод прогноза НДС по аналитическим зависимостям даёт возможность зонировать площадь выемочного столба по горно-геологическим условиям для последующего учёта такой детализации при принятии проектных решений.

3. Экономический эффект от более точных прогнозов может быть получен за счёт оптимизации параметров горных работ с учётом НДС массива, сокращения простоев из-за аварий, увеличения производительности работ, снижения затрат на ремонт выработок, и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по геологическим работам на угольных месторождениях Российской Федерации. СПб, 1993. 147 с.

2. Игнатов Ю.М. Компьютерный прогноз геологического строения и геомеханических свойств с помощью анализа цифровых моделей массива горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 139-143.

3. Гагарин А.А., Игнатов Ю.М., Латагуз М.И. Цифровое описание горно-геологических условий для анализа, прогнозирования и визуализации результатов на маркшейдерских цифровых планах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 1. С. 84-93.

4. Разработка методики расчёта параметров и средств проветривания нижней ветви лавного скребкового конвейера и контроля концентрации метана. Договор №815-2025/ИПЭБ от 17.06.2025г./ Отчёт о НИР. Рук. Тациенко В.П., исполн. Игнатов Ю.М., Бубнов К.А., и др. Кемерово.2026. 216

5. Игнатов Ю.М., Гагарин А.А., Роут Г.Н. Метод прогноза горно-геологических условий на основе анализа результатов компьютерного эксперимента с цифровой моделью массива горных пород // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 4. С. 89–99с.

6. Гзовский М.В. Основа тектонофизики. – М.: Наука. 1975. 536 с.

REFERENCES

1. Instructions for geological work at coal deposits in the Russian Federation. St. Petersburg, 1993. 147 p.

2. Ignatov Yu.M. Computer prediction of geological structure and geomechanical properties using analysis of digital models of rock mass // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2010. No. 1. Pp. 139–143.

3. Gagarin A.A., Ignatov Yu.M., Lataguz M.I. Digital description of mining and geological conditions for analysis, forecasting, and visualization of results on surveying digital plans // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2018. No. 1. Pp. 84–93.

4. Development of a methodology for calculating the parameters and means of ventilating the lower branch of a longwall scraper conveyor and monitoring methane concentration. Contract No. 815-2025/IPEB dated 17.06.2025. / Research report. Head. Tatsienko V.P., executors Ignatov Yu.M., Bubnov K.A., et al. Kemerovo. 2026. 216

5. Ignatov Yu.M., Gagarin A.A., Rout G.N. A method for predicting mining and geological conditions based on the analysis of the results of a computer experiment with a digital model of a rock mass // Bulletin of the Scientific Center of the EastNII for Industrial and Environmental Safety. 2019. No. 4. Pp. 89–99.

6. Gzovsky M.V. Fundamentals of Tectonophysics. – Moscow: Nauka. 1975. 536 p.