

ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА З МЕТОЮ ПРОГНОЗУВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ

**С.А. Вижва¹, О.М. Іванік², В.В. Литвинов⁵,
М.В. Назаренко⁴, К.М. Бондар⁵**

(Рекомендовано д-ром геол.-мінерал. наук Д.П. Хрущовим)

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ «Інститут геології», Київ, Україна.

Завідувач кафедри геофізики.

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ «Інститут геології», Київ, Україна.

Завідувач кафедри загальної та історичної геології.

³ Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів, Україна.

Завідувач кафедри програмної інженерії.

⁴ НВП «Кривбасакадемінвест», Кривий Ріг, Україна.

Директор.

⁵ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ННІ «Інститут геології», Київ, Україна.

Науковий співробітник.

Розроблено методологічні принципи та методіку моделювання стану геологічного середовища, метою якого є інформаційно-аналітичне забезпечення системи моніторингу міграції та утворення скупчень метану в вугільних родовищах, а також прогнозування геодинамічних явищ у гірничих виробках. Як методолого-методичний інструмент реалізації цієї мети пропонується інтегральна геолого-геофізична модель, що являє собою віртуальне багатоаспектне відображення геологічного середовища обраного геологічного об'єкта. Цільові предметні візуалізації моделі призначені для забезпечення вирішення головних питань про геологічну будову, речовинний склад та геомеханічні властивості породних комплексів об'єкта, необхідних для розв'язання конкретних завдань оцінки еколого-гірничо-геологічного його стану із прогнозуванням небезпечних геологічних процесів, насамперед геодинамічних явищ. З метою апробації методіки розробки інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі обрано ділянку (гірничий масив вугільного родовища) Бежанівську-3, розташовану в Алмазно-Мар'їнському геолого-промисловому районі Донбасу. На базі відомої геоінформаційної системи K-Mine створено базу даних та побудовано цифрову тривимірну модель родовища, що забезпечує візуалізацію інформації про будову, речовинний склад гірничого масиву та визначення напружено-деформованого стану породних комплексів, а також здійснення підрахунку запасів.

Ключові слова: моделювання, геологічне середовище, метан, ГІС, база даних.

PRINCIPLES AND METHODS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT MODELLING FOR GAS-DYNAMIC PROCESSES PREDICTION

S.A. Vyzhva¹, O.M. Ivanik², V.V. Litvinov³, M.V. Nazarenko⁴, K.M. Bondar⁵

(Recommended by doctor of geological-mineralogical sciences D.P. Hruschov)

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine.
Head of Geophysics Department.

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine.
Head of Department of General and Historical Geology.

³ Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine.
Head of Department of Software Engineering.

⁴ NPP «Krivbasakademinvest», Kryvyi Rig, Ukraine.
Director.

⁵ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine.
Researcher of Research Department.

Methodological principles and methods of the geological environment modeling have been developed. The main goal of this modelling is the creation of the information and analytical support of the monitoring of the methane migration and formation in coal deposits, as well as forecasting of geodynamic phenomena in mines. The integrated digital geological and geophysical model has been proposed as a methodological and methodical instrument of this research. It represents the virtual display of multilateral geological environment of the selected geological object. Target subject visualization models are designed to solve the fundamental issues of the geological structure, material composition and geomechanical properties of the rock complexes of objects. They are needed to solve the specific assessment of the environmental and mining-geological conditions and forecast of dangerous geological processes, especially geodynamic phenomena. The area Bezhanivska-3 located in Marynskiy geological and industrial region of Donbass has been used for the testing of methodology of integrated geological and geophysical modelling and development of integrated databases. Geographic information system K-MINE has been used for the creation of a database and spatial three-dimensional model of coal layers and deposits. They are used for further visualization, reserves estimation and modeling of the stress-strain state of rock mass.

Key words: modelling, geological environment, methane, GIS, database.

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

**С.А. Выжва¹, Е.М. Иваник², В.В. Литвинов³,
М.В. Назаренко⁴, К.М. Бондарь⁵**

(Рекомендовано д-ром геол.-минерал. наук Д.П. Хрущевым)

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, НУИ «Институт геологии»,
Киев, Украина.
Заведующий кафедрой геофизики.

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, НУИ «Институт геологии»,
Киев, Украина.
Заведующая кафедрой общей и исторической геологии.

³ Черниговский национальный технологический университет, Чернигов, Украина.
Заведующий кафедрой программной инженерии.

⁴ НПП «Кривбассакадеминвест», Кривой Рог, Украина.
Директор.

⁵ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, НУИ «Институт геологии», Киев, Украина.
Научный сотрудник.

Разработаны методологические принципы и методика моделирования состояния геологической среды, целью которого является информационно-аналитическое обеспечение системы мониторинга миграции и образования скоплений метана в угольных месторождениях, а также прогнозирования геодинамических явлений в горных выработках. В качестве методолого-методического инструмента реализации этой цели предлагается интегральная цифровая геолого-геофизическая модель, представляющая виртуальное многостороннее отображение геологической среды выбранного геологического объекта. Целевые предметные визуализации модели предназначены для обеспечения решения основополагающих вопросов о геологическом строении, вещественном составе и геомеханических свойствах породных комплексов объекта, необходимых для решения конкретных задач оценки эколого-горно-геологического его состояния с прогнозом опасных геологических процессов, прежде всего геодинамических явлений. Для апробирования методики создания интегральной цифровой геолого-геофизической модели в качестве модельного полигона был использован участок (горный массив угольного месторождения) Бежановский-З, расположенный в Алмазно-Марьинском геолого-промышленном районе Донбасса. На базе известной геоинформационной системы K-Mine создана база данных и построена цифровая трехмерная модель месторождения, обеспечивающая визуализацию информации о строении, вещественном составе горного массива и определения его напряженно-деформированного состояния, а также осуществления подсчета запасов.

Ключевые слова: моделирование, геологическая среда, метан, ГИС, база данных.

Актуальність і постановка проблеми

На підприємствах вугільної промисловості України (як й інших країн) однією з найактуальніших є проблема прогнозування зон максимальних скупчень вуглеводневих газів, зокрема метану, з метою попередження небезпечних газодинамічних явищ, а також ефективного використання газових ресурсів.

Розв'язання цієї проблеми охоплює два аспекти: перший – цільові територіальні дослідження, спрямовані на пізнання природи й уточнення механізму формування і поведінки у геологічному середовищі вугільних родовищ скупчень вуглеводневих газів з урахуванням факторів техногенного втручання (тобто шахтної експлуатації), і другий – розроблення сучасного ефективного засобу інформаційно-аналітичного забезпечення цільових досліджень і заходів, спрямованих на попередження небезпечних геодинамічних явищ у шахтах, а також використання ресурсів «вугільного газу».

У рамках цільових науково-дослідних робіт існує значна кількість напрацювань [Багрій, 2013; Нетрадиційні..., 2013 та ін.], у тому числі авторів даної статті. Дані про особливості геологічних, структурно-тектонічних, літологічних та інших чинників локалізації метану можуть бути отримані в результаті проведення геологознімальних, геологорозвідувальних, експлуатаційних, тематичних, наукових та виробничих геолого-геофізичних робіт у межах досліджуваних областей. Масив цільової інформації отримується на підставі виконання спеціалізованих досліджень по визначенню напружено-деформованого стану гірських порід навколо підземних виробок та розрахунків напружено-деформованого стану породного масиву під впливом гравітаційних сил, тектонічних та температурних чинників, реконструкції полів напружень і деформацій, проведення спеціалізованих термоатмогеохімічних досліджень тощо [Багрій, 2013]. Окремий блок становлять геомеханічні

дослідження при визначенні особливостей розподілу та скупчень метану у межах гірського масиву, а також при з'ясуванні механізму та результатів його просторової міграції. При цьому реконструкції палеотектонічних полів напружень і деформацій із розглядом складчасто-розривних парагенезисів у часі є особливо важливими для прогнозу вторинних колекторів вуглеводневих газів, а також моделювання напружено-деформованого стану гірських масивів на основі класичних задач механіки [Моделирование..., 1991]. Тим не менш, до більш-менш задовільного вирішення проблеми прогнозування газодинамічних явищ ще досить далеко, про що свідчить, по-перше, співіснування концепцій, що протирічать одна одній, а по-друге, відсутність реальних впроваджень з ефективного розв'язання конкретних задач.

Авторами даної статті використаний певний обсяг науково-дослідних робіт, що створюють теоретичне підґрунтя для цільового моделювання запропонованого напрямку [Вижва, Тищенко, 2008 та ін.]. Результати цих напрацювань частково відображені у концепції методологічної частини статті.

Другий аспект полягає у розробленні достатньо універсального методолого-методичного інструменту інформаційно-аналітичного забезпечення цільових досліджень і реалізаційних заходів. Такий інструмент сформульовано поняттям «інтегральна цифрова геолого-геофізична модель» (геологічного середовища вугільних родовищ), опис якого і становить предмет даної публікації.

У зв'язку з метою, що відображена у назві статті, було виконано такі завдання:

- дослідження об'єкта моделювання, визначення вхідних параметрів моделювання на основі теоретичних, польових, емпіричних та експериментальних даних;

- визначення оптимальної структури бази даних (БД) геолого-геофізичної інформації;

- наповнення БД по обраному модельному об'єкту;

- визначення принципів створення інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі гірського масиву, родовища або шахти;

- розробка просторової тривимірної моделі вугільних пластів та родовища;

- розробка алгоритму та програмних модулів для визначення напружено-деформованого стану породного масиву та оцінки його стійкості;

- оцінка чинників та прогнозування газодинамічних явищ у межах вугільних шахт.

Принципи розробки БД та інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі

На сучасному етапі постає нагальна необхідність у створенні інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі, яка б містила повну інформацію про геологічну будову гірського масиву та чинники формування і концентрації вуглеводневих газів у межах певних геологічних структур, а також забезпечувала прогнозу оцінку скупчень метану у межах різноструктурних гірських масивів. Геолого-геофізична модель, по суті, є універсальним продуктом геолого-геофізичних досліджень. Вона акумулює всю інформацію, накопичену на різних стадіях, – від пошуку і розвідки до оцінки запасів і освоєння родовища. Головна мета створення геолого-геофізичної моделі – забезпечення основи для обчислення різних фізичних полів [Вижва, Тищенко, 2008]. Геолого-геофізична модель забезпечує послідовне інтегроване накопичення результатів проведених геологорозвідувальних робіт, їх використання для проектування наступних (деталізаційних) стадій з відповідним обґрунтуванням техніко-економічних, геолого-економічних оцінок, а також аналізом інвестиційних проектів на розробку родовища (покладу) та проектування і супроводу відповідних промислових процесів.

Процес розробки інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі гірського масиву, родовища або шахти складається із декількох етапів, послідовність та зміст яких може відрізнитись залежно від завдань досліджень, інформативності первинної геологічної інформації, складності геологічної будови, прояву ендо- та екзогенних геологічних процесів, техногенних впливів тощо.

Процес створення інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі включає такі етапи:

- 1) розробка структури БД;
- 2) обробка та введення вихідної інформації в БД;

- підготовка геологічної інформації для її введення в систему;

- наповнення бази інформацією геологічного опробування й геофізичних вимірювань;

- статистичний аналіз первинних геологічних даних, коригування помилок, групування даних, завірення бази, виявлення закономірностей;

3) геомодельовання:

- інтерпретація даних геологічної розвідки;

- створення каркасних моделей просторових об'ємів;

- створення блокових (воксельних) моделей;

- геостатистичний аналіз просторових даних, варіографія, визначення законів просторової мінливості (анізотропії) геологічних характеристик.

Ці дослідження вимагають визначення оптимальної структури та форматів БД, основних операцій процесу проектування БД, а також розробки адекватних методів інформаційного моделювання гірських масивів, шахтних полів та шахт.

При створенні тривимірних моделей шахт використовуються комбіновані моделі (здебільшого полігональні, менше *NURBS* та параметричні моделі). Кожен з видів моделей може бути застосований для відображення різних характеристик об'єктів. Так, параметричні моделі використовуються для опису конфігурації і просторової геометрії виробок [Назаренко, Хоменко, 2009]. Полігональні (каркасні) моделі застосовуються для опису геометрії поверхонь і замкнених геометричних об'ємів (моделі тіл, пластів, покладів, виробок), блокові (воксельні) моделі – для опису якісних характеристик геологічного простору в різних його точках. Кожен з видів моделей використовується для опису різних груп об'єктів, при цьому частина моделей може бути створена як похідна від попередніх. Наприклад, каркасні моделі створюються на базі параметричних, а блокові (воксельні) – на базі як параметричних, так і полігональних моделей.

Якщо ми беремо за об'єкт моделювання геологічного середовища родовище, що розробляється шахтним способом, то з функціональної точки зору комплексна модель цього об'єкта охоплює:

- модель підземних шахтних виробок;
- геологічну модель родовища;
- модель поверхні (топографічна карта, модель будівель, споруд);
- моделі динамічних процесів, у тому числі газодинамічних явищ;
- моделі напружено-деформованого стану гірничого масиву;
- моделі технологічних об'єктів і процесів (комунікацій, процесів гірничого виробництва з видобування та транспортування корисної копалини та ін.).

Всі ці моделі можуть бути суміщені в єдиному інформаційному просторі і використовуватися як інтегральна цифрова геолого-геофізична модель.

З метою відпрацювання методики побудови тривимірної моделі породного масиву обрано тестову ділянку Бежанівська-3, що знаходиться в центральній частині Алмазно-Мар'ївського геолого-промислового району Донбасу, на яку у 2004 р. «Схід ДРГП» видала ТОВ «Донбассугольинвест» геологічний висновок про стан запасів вугільного пласта i_3 (району Бежанівський-3) в межах оцінюваної площі для отримання ліцензії на їх експлуатацію. Всього в межах оцінюваної площі підраховано: балансів запасів категорії С1 – 929 тис. т; забалансових запасів категорії С₁^{3аб*} – 1092 тис. т. Вугілля пласта відноситься до марки Ж, може використовуватися для виробництва коксу. В геологічній будові району беруть участь відклади середнього і верхнього карбону, перекриті утвореннями тріасу, верхньої крейди і палеогену. Власне ця ділянка складена породами середнього карбону (світи С₂³-С₂⁵), які перекриті четвертинними відкладами. У структурному відношенні район представлений північно-східним крилом Бахмутської улоговини, ускладненим дрібною складчастістю. Розглядувану ділянку приурочено до східного замикання Голубівської синкліналі, що має форму антиклінального підняття, яке отримало назву Бежанівської антикліналі. У районі розвинені насуви, приурочені в основному до крутих крил складок. Найбільші з них (з півночі на південь): Північно-Донецький, Мар'ївський, Алмазний та ін. Ділянка розташована в зоні, обмеженій з півночі Мар'ївським насувом, з півдня Алмазним насувом. Мар'ївський насув є регіональним, простягається з північного заходу

на південний схід майже по південній межі поширення крейдових відкладів. Стратиграфічна амплітуда насуву – 1600 м. Падіння площини зміщення на південь під кутом 35-75°. Алмазний насув також є регіональним. Він має південне падіння під кутом 20-60° і стратиграфічну амплітуду до 1400 м. На аналізованій ділянці Бежанівська-3 насув зафіксований геологічною зйомкою та розкритий буровими свердловинами.

Для моделювання гірських масивів та шахт використовуються, як правило, просторові БД, які оптимізовані для зберігання й виконання запитів до даних про просторові об'єкти. У той час як традиційні БД можуть зберігати й обробляти числову й якісну інформацію, просторові БД мають розширену функціональність, що дозволяє зберігати цілісне відображення просторового об'єкта, що поєднує як традиційні види даних (описові або атрибутивні), так і геоінформаційні (дані про положення об'єкта в просторі). Просторові БД дозволяють виконувати аналітичні запити, що містять просторові оператори для аналізу просторово-логічних відношень об'єктів. У зв'язку з цим необхідним етапом розробки тривимірних каркасних та блокових моделей гірського масиву у межах вугільної ділянки Бежанівська-3 є створення БД наявної геолого-геофізичної інформації, яка міститиме комплексну інформацію про цей об'єкт і слугуватиме основою для розробки інтегральної цифрової геолого-геофізичної моделі.

Процес проектування БД включав такі етапи, як концептуальне моделювання предметної області, логічне та фізичне моделювання БД.

Для першого етапу характерним було використання апарату ER моделювання та методології SSADM [SSADM 4+, 1996], що дозволило:

- 1) визначити об'єкти (суттєвості), дані про які повинні утримуватися в БД;
- 2) виявити зв'язки між суттєвостями;
- 3) визначити основні властивості (атрибути) об'єктів, які будуть зберігатися в БД;
- 4) виявити зв'язки між властивостями об'єкта;
- 5) із використанням процедур нормалізації провести необхідні перетворення моделі предметної області, що в подальшому дозволяє створити декілька таблиць із загальної таблиці;

6) скласти логічний запис загальної таблиці, що включає всі властивості об'єкта;

7) визначити операції при використанні таблиць і створити на їхній основі запити;

8) створити форми введення даних і форми звіту.

Для розробки БД та створення тривимірної моделі гірського масиву використано *геоінформаційну систему K-MINE*, у якій передбачено доступ до БД від різних виробників. При цьому для деяких рішень застосовується прямий доступ (наприклад, FireBird SQL Server), а також доступ через спеціальні драйвери роботи з даними сервісу Windows (ODBC, ADO). Одним із найпоширеніших варіантів підключення БД через драйвери ODBC чи ADO є MS SQL Server. Прямий доступ дає змоги повністю керувати сервером: створювати нову БД для нового родовища, додавати, редагувати, вилучати користувацькі й системні таблиці, виконувати індексацію тощо. У разі використання стандартних драйверів для доступу попередньо потрібно створити БД інструментальними засобами вибраної серверної платформи, доступ до параметрів БД при цьому обмежений [Мейер, 1978; Табакман, Турецкий, 1991; Теория..., 2002].

Перед розробкою структури БД попередньо вивчено наявну документацію з геологічної розвідки по ділянці Бежанівська-3 та оцифровано геологічні матеріали. Це визначило загальну кількість таблиць у БД та їх структуру.

Для дигіталізації розрізів свердловин використана програма DigitTopo, яка дозволяє масштабувати растрові рисунки і знімати з них інформацію про геометричні параметри окремих елементів гірського масиву. При цьому стратиграфічна, літологічна й інша (негеометрична) інформація вказується у вигляді приміток до окремих прошарків. У подальшому інформація з текстових файлів переноситься до книг Excel, де виправляється та упорядковується для зручного використання.

При розробці структури БД визначено типи таблиць і встановлено зв'язки (реляції) між ними. Цей процес використовується для нормалізації структури БД та організації зручностей при роботі із даними.

Процес наповнення БД включав такі операції: заповнення довідників; заповнення

таблиці свердловин або опорних точок виробок; заповнення таблиці інклінометрії; заповнення таблиць даними опробування, стратиграфічними й літологічними відомостями; перевірка вмісту вихідних даних на наявність механічних і логічних помилок, їх коригування; застосування методів статистичного аналізу, групування інтервалів опробування; завершення БД. Приклад наповнення БД наведено на рис. 1.

З метою створення просторової тривимірної моделі вугільних пластів та родовища (рис. 2), яка в подальшому використовується для візуалізації інформації, побудови геологічних розрізів, підрахунку запасів та моделювання напружено-деформованого стану породного масиву, застосовується спеціалізований інструментарій геоінформаційної системи K-MINE.

Геореляційна БД геологічної інформації створювалася з використанням спеціалізованого модуля ArcCatalog 9.3 (ArcGis 9). Для цього в ArcCatalog через контекстне меню було створено нову БД із відповідною орга-

нізацією наборів класів просторових об'єктів. База геоданих містить набори класів об'єктів, автономні об'єктні класи, класи просторових об'єктів, класи відношень і атрибутивні домени. Об'єктні класи зберігають елементи і мають підтипи та атрибутивні правила (у базі геоданих «об'єктний клас» і «таблиця» є синонімами). Створена БД завантажена в ArcMap, де відносно інформації векторизованої геологічної карти визначено класи просторових об'єктів із відповідними атрибутами.

Завершальним етапом досліджень є розробка алгоритму та програмних модулів з метою визначення напружено-деформованого стану породного масиву та оцінки його стійкості. В загальному вигляді алгоритми розрахунку напружено-деформованого стану фрагменту геологічного масиву з виробками діляться на дві категорії: алгоритми з використанням чисельних методів та алгоритми з аналітичним рішенням. Кожна група алгоритмів має свої переваги і недоліки.

ID	№ скв.	X	Y	Z	X_P	Y_P	Тип скв.	Глубина	NOTE
1	321	5385015,550	7477816,110	138,700	85015,550	77816,110	Детальной разведки	97,120	
2	1041	5384775,320	7475774,940	196,600	84775,320	75774,940	Детальной разведки	158,300	
3	1138	5386255,680	7480403,510	110,700	86255,680	90403,510	Детальной разведки	77,070	
4	1593	5386406,450	7477144,030	202,000	86406,450	77144,030	Детальной разведки	121,270	
5	1767	5386368,260	7479376,470	118,800	86368,260	79376,470	Детальной разведки	227,150	
6	1768	5386421,700	7478853,140	142,700	86421,700	78853,140	Детальной разведки	267,000	
7	1769	5386411,100	7477626,560	188,600	86411,100	77626,560	Детальной разведки	553,700	

ID	Глубина	Глубина	Мощности	Страт. индекс	Свига	Цвет страт.	Порода	Цвет Лито	Штрих Лито
2107	9,000	9,000	К4		41 (41)	глина	70 (70)	46	
2108	10,410	1,410	К4		41 (41)	известняк	140 (140)	39	
2109	11,030	0,620	к13		24 (24)	угольный пласт рабочей мощности			
2110	22,030	11,000	кВ3		25 (25)	сланец песчаный	50 (50)	59	
2111	22,130	0,100	кВ3		25 (25)	угольный пласт нерабочей мощности	9 (9)		
2112	41,130	19,000	кН3		15 (15)	песчаник мелкозернистый	Жёлтый (2)	38	
2113	64,130	23,000	кН3		15 (15)	песчаник мелкозернистый	Жёлтый (2)	38	
2114	66,130	2,000	кН3		15 (15)	сланец песчаный	50 (50)	59	
2115	67,290	1,160	кН3		15 (15)	кучерячик	32 (32)	61	
2116	88,290	21,000	К2		61 (61)	песчаник мелкозернистый	Жёлтый (2)	38	
2117	94,290	6,000	К2		61 (61)	сланец песчаный	50 (50)	59	
2118	103,290	9,000	К2		61 (61)	песчаник мелкозернистый	Жёлтый (2)	38	
2119	106,290	3,000	К2		61 (61)	сланец глинистый	52 (52)	27	
2120	108,060	1,770	К2		61 (61)	известняк	140 (140)	39	

Рис. 1. Введення даних по свердловинах у БД

Fig. 1. Input wells data in a database

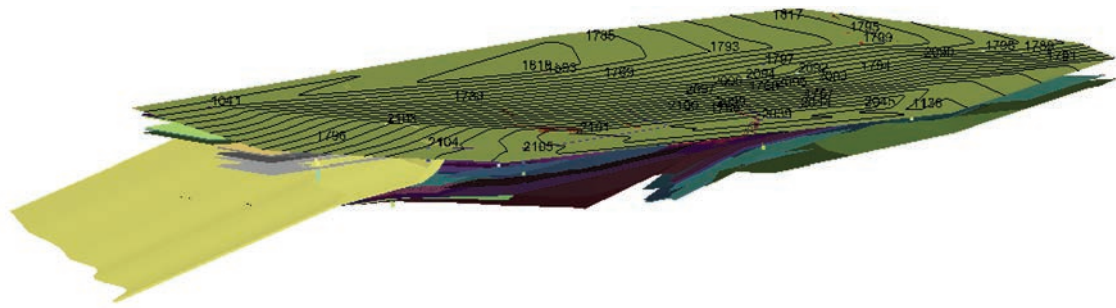


Рис. 2. Тривимірна модель залягання вугільних пластів робочої та неробочої потужності по ділянці Бежанівська-3

Fig. 2. Three-dimensional models of the coal layers of the working and non-working thickness in the section Bezhanivska-3

Як правило, точне аналітичне рішення отримати неможливо, і воно вимагає значної роботи з побудови достатньо адекватної математичної моделі. Водночас кінцеві обчислювальні витрати на отримання результату аналітичними методами фактично лінійні від набору вхідних даних. На противагу, чисельні методи, навпаки, здатні дати прийнятне рішення при мінімумі витрат (у разі використання вже існуючих реалізацій базових алгоритмів), проте обчислювальні витрати в кращих випадках досягають поліноміального рівня від обсягу вхідних даних моделі. Серед цих методів відомішими є метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, метод граничних елементів, метод граничних інтегральних рівнянь та інші методи, які отримали велике розповсюдження в інженерному і науковому середовищах при використанні потужної обчислювальної техніки. Проаналізовано ці методи та визначено, що використання модифікованого методу граничних елементів є найбільш ефективним для розв’язання розглядуваного класу задач. Розв’язок задачі про розподіл напружень в досліджуваній області, в масиві навколо виробки (виробок), виконується на підставі умов (напружень, переміщень), що задаються на границі області – на поверхні виробки. Точність вирішення задач методом граничних елементів є вищою, ніж іншими чисельними методами. Розроблено алгоритм та програмний модуль розрахунку напружено-деформованого стану породного масиву з виробкою, який дає можливість визначити розподіл напружень і деформацій у межах ділянки геологічного середовища.

Висновки

Таким чином, обґрунтовано головні принципи та методи моделювання стану геологічного середовища, метою якого є інформаційно-аналітичне забезпечення системи моніторингу міграції та утворення скупчень метану в вугільних родовищах і шахтах, а також прогнозування геодинамічних явищ у гірничих виробках. Запропоновано методологію і методику створення інтегральних цифрових геолого-геофізичних моделей та формування цільових інтегрованих БД геолого-геофізичної інформації. Ці моделі, окрім проблеми локалізації та міграції вуглеводневих газів, дозволяють вирішувати додатково значну кількість задач, серед яких слід виокремити такі: геометризація покладів та кваліметрія гірського масиву, підрахунок запасів та виконання геолого-економічних оцінок; планування роботи шахт при розкритті та відпрацюванні пластів різними способами; моделювання напружено-деформованого стану породних комплексів, оцінка стійкості гірського масиву; розробка планів ліквідації аварій тощо. Представлені дослідження та розроблені методики можуть бути основою розробки інтегральної еколого-гірничо-геологічної цифрової моделі та інформаційно-аналітичного забезпечення всіх етапів і видів науково-дослідних та експлуатаційних робіт з вивчення та управління небезпечними геологічними процесами та явищами у межах вугільних родовищ та шахт.

Список литературы / References

1. Багрій І.Д. Розробка геолого-структурно-термо-атмогеохімічної технології прогнозування пошуків корисних копалин та оцінки геоекологічного стану довкілля. Київ: Логос, 2013. 511 с.

Bagriy I.D., 2013. Development of the geological-structural-thermo-atmogeochemical technology for the prediction of mineral exploration and evaluation of geo-ecological environment. Kyiv: Logos, 511 p. (in Ukrainian).

2. Вижва С.А., Тищенко А.П. Сучасні підходи до побудови геолого-геофізичної моделі нафтогазових покладів. Вісн. Київ. ун-ту. Сер. Геологія. 2008. Вип. 45. С. 4–9.

Vyzhva S.A., Tyshchenko A.P., 2008. Modern approach for geological and geophysical model construction of oil and gas bearings. *Visnyk Kyivskogo Universitetu. Seriya Geologiya*, vol. 45, p. 4–9 (in Ukrainian).

3. Мейер М. Теория реляционных баз данных. Москва: Мир, 1987. 608 с.

Meyer M., 1987. Relational database theory. Moscow: Mir, 608 p. (in Russian).

4. Моделирование в геомеханике / [Ф. П. Глушихин, Г. Н. Кузнецов, М. Ф. Шклярский и др.]. Москва: Недра, 1991. 240 с.

Modeling in geomechanics, 1991 / [F. P. Glushihin., G.N. Kuznetsov, M.F. Shkliarsky et al.]. Moscow: Nedra, 240 p. (in Russian).

5. Назаренко М.В., Хоменко С.А. Автоматизированная система управления горными работами современного предприятия на базе геоинформационной системы К-MINE. *Маркшейдерский вестник*. 2009. № 5. С. 30-37.

Nazarenko M.V., Khomenko S.A., 2009. Automated control system for mining activities of the modern enterprise on the basis of GIS K-MINE. *Marksheyderskiy vestnik*, № 5, p. 30-37 (in Russian).

6. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. У 8 кн. Кн. 7. Метан вугільних родовищ, газо-

гідрати, імпактні структури і накладені западини Українського щита / [В.А. Михайлов, О.Ю. Зейкан, А.М. Коваль, В.М. Загнітко, Є.П. Гуров, С.А. Вижва, Є.Ф. Шнюков, І.М. Наулко, П.М. Чепіль, О.Д. Кожушок, В.В. Радченко, Д.А. Безродний]. Київ: Ніка-Центр, 2013. 368 с.

Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. In eights books. Book 7. Coalbed methane, gas hydrates, impact structures and superimposed depressions of the Ukrainian shield, 2013 / [V.A. Mikhailov, O.J. Zeykan, A.M. Koval V.M. Zagnitko, E.P. Gurov, S.A. Vyzhva, E.F. Shnyukov, I.M. Naumko, P.M. Chepil, O.D. Kozhushok, V.V. Radchenko, D.A. Bezrodniy]. Kyiv: Nika-Tsenter, 368 p. (in Ukrainian).

7. Табакман И.Б., Турецкий А.З. Имитационно-оптимизационные методы планирования горных работ в карьерах. Ташкент: Фан, 1991. 116 с.

Tabakman I.B., Turetskiy A.Z., 1991. Simulation and optimization methods for planning of mining operations in quarries. Tashkent: Fan, 116 p. (in Russian).

8. Теория вероятностей и математическая статистика. Базовый курс с примерами и задачами: Учебное пособие / А.И. Кибзун, Е.Р. Горяинова, А.В. Наумов, А.Н. Сиротин. Москва: Физматлит, 2002. 224 с.

Probability theory and mathematical statistics. Basic course with examples and problems: Textbook, 2002 / A.I. Kibzun, E.R. Goryainov, A.V. Naumov, A.N. Sirotin. Moscow.: Fizmatlit, 224 p. (in Russian).

9. SSADM 4+. Reference Manual version 4.3. CCTA: London, 1996. 181 p.

SSADM 4+. Reference Manual version 4.3. CCTA: London, 1996. 181 p. (in English).

Стаття надійшла
17.03.2015