

Д. П. Хрущев<sup>1</sup>, А. П. Лобасов<sup>2</sup>, М. С. Ковальчук<sup>1</sup>, Е. А. Ремезова<sup>1</sup>,  
Л. П. Босевская<sup>3</sup>, Ю. В. Кирпач<sup>1</sup>

## ЦЕЛЕВЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Мета публікації – висвітлення проблеми впровадження в геологічну практику цільових експертних систем (ЦЕС) геологічного спрямування, що базуються на принципах цільового комплексного моделювання геологічних об'єктів на основі сучасних комп'ютерних технологій з перспективою введення штучного інтелекту. Методологічною основою ЦЕС є комплексна оцінка геологічного середовища, засобом виконання цієї оцінки – комплексна модель відповідної спрямованості. Остання включає структурно-літологічну модель як матричну і низку доповнюючих предметних моделей (гідрогеологічну, геомеханічну, інженерно-геологічну та ін.), набір і зміст яких визначається спрямованістю ЦЕС (ресурсна, для підземного будівництва, охорони геологічного середовища тощо). Розроблена концептуальна схема типізації і змісту ЦЕС. Демонструються приклади розробки цільових структурно-літологічних і комплексних моделей, що слугують основою для створення ЦЕС на різномісних об'єктах соленосних, титано-цирконієвих і золотоносних формаційних типів. Подальший розвиток напряму полягає в розширенні досвіду розробки комплексних моделей, створенні баз знань, які містять набори експертних правил обробки отриманих даних і створення відповідного математичного апарату і як наслідок – побудову експертних систем.

The target of the paper is a conceptual presentation of the problem for implementation into geological practice of target oriented expert systems (TOES) basing upon principles of geological objects complex modeling on the basis of modern computer technologies with a perspective of artificial intellect elements introducing. The methodological basis of TOES is represented with complex evaluation of geological medium, and a tool of this evaluation realization is expressed with complex model of the proper issue. The latter includes a structural-lithological model, as a basic, matrix one, and a number of subordinate models (hydrogeological, geomechanic, engineering-geological etc.), a set and content of the latter are defined with TOES direction (resources, underground construction, geological environment protection etc.). A scheme of TOES types and content is presented. The examples of target oriented structural-lithological models and complex models are demonstrated, the latter provide a basis for TOES concerning geological objects within the limits of salt, titanium-zirconium and gold-bearing formation types. A subsequent development of this directory comprises the expansion of experience for complex modeling experience, the foundation of knowledge bases, containing expert rules sets for data obtained processing and pertinent mathematic apparatus development, and finally – the development of completed expert systems.

### Введение. Постановка проблемы

В развитии систем управления деятельностью в области геологии, т. е. разностороннего использования и охраны геологической среды, наметился "кризис жанра", который состоит в противоречии между растущими (кстати, глобально) социально-экономическими (и экологическими) вызовами, поддерживаемыми технологическим прогрессом, с одной стороны, и состоянием информационно-аналитического обеспечения соответствующих управленческих действий – с другой. В основе указанного противоречия лежит недостаточная эффективность традиционных методов этого обеспечения, основанных на аналоговом моделировании объектов и процессов (хотя

бы и с определенной ролью компьютерных технологий).

Преодоление этого кризиса возможно путем внедрения в геологическую практику целевых экспертных систем (ЦЭС), базирующихся на принципах целевого комплексного моделирования геологической среды посредством современных компьютерных технологий с элементами искусственного интеллекта. Постановочное освещение указанной проблемы и составляет цель данной работы.

В связи с этой целью ставятся следующие задачи:

- представление принципов, методологии и методов создания ЦЭС;
- обозначение основных направлений ЦЭС, их задач, структуры и содержания;
- демонстрация имеющихся наработок;
- обозначение перспектив развития научного направления.

© Д. П. Хрущев, А. П. Лобасов, М. С. Ковальчук, Е. А. Ремезова, Л. П. Босевская, Ю. В. Кирпач, 2012

Основанием для постановки данной проблемы послужили результаты многолетних исследований авторского коллектива в области изучения геологического строения, вещественного состава и моделирования осадочных формаций. Исследования проводили в основном на примерах соленосных, красноцветно-терригенных и россыпных (титано-циркониевых и золотоносных) формаций.

Определение экспертной системы как "целевой" подразумевает ориентированную ее направленность для решения конкретных практически важных задач повышенной сложности, связанных с разноцелевым использованием недр (добыча полезных ископаемых, подземное строительство) и охраной геологической среды.

### **Предыстория формирования идеи**

Идея создания ЦЭС созрела как естественный результат проведения многолетних исследований в области моделирования геологических объектов. Первым этапом было создание концептуальных структурно-литологических моделей (СЛМ) геологических объектов определенных типов осадочных формаций (хорошо изученных авторским коллективом, что позволило разработать эффективные принципы их системной структуризации). Полученный результат, продемонстрировавший высокий информационный и прогнозный эффект метода, логически привел к выводу о возможности дальнейшего развития этих функций путем применения геоинформационных технологий. На базе таких технологий нами были разработаны принципы создания цифровых СЛМ. Результаты цифрового моделирования также оправдали ожидания – примеры моделей продемонстрировали высокий уровень технической, информационной и прогнозной функций [6, 7, 9]. Однако при этом стало ясно, что цифровые СЛМ могут быть эффективными лишь для геологических объектов определенного уровня сложности, с решением ограниченного числа сравнительно простых задач, относящихся к ресурсно-геологическому и горно-геологическому направлениям.

В дальнейшем реальная обстановка поставила необходимость решения компле-

ксных проблем, охватывающих несколько аспектов обращения с геологической средой, – ресурсных, строительных, экологических и др. (например, месторождение каменной соли Солотвино, Калушский горно-промышленный район). Для решения таких проблем был найден соответствующий методологическо-методический аппарат – построение комплексных целевых моделей, которые охватывали бы несколько предметных моделей (базирующихся на цифровой СЛМ). Комплексная модель такого рода обеспечивает решение поставленной задачи и является основой для создания ЦЭС.

Однако предложенная комплексная модель имеет одну уязвимую характеристику: процедура соединения подчиненных моделей экспертами обеспечивает получение более или менее обоснованных решений, но возможности эксперта-человека не позволяют охватить множество модельных компонентов, возникающих при соединении моделей, и возрастающий ряд неопределенностей. Таким образом, на данном этапе наша комплексная модель заканчивается экспертной разработкой решений, т. е. с точки зрения общепризнанных канонов экспертных систем она может считаться незавершенной. И именно поэтому мы останавливаемся перед необходимостью решения проблемных задач на основе экспертного анализа результатов указанного этапа, т. е. дальнейшая эволюция данного научного направления (по аналогиям смежных кибернетических областей) уже составляет предмет геологической кибернетики. Соответственно, идентификация ожидаемого результата в ранге экспертных систем (ЭС) в классическом понимании будет правомерной.

### **Методология и методические подходы**

ЭС – направление технологий искусственного интеллекта – понятия, входящего в перечень предметов кибернетики как науки о системе управления.

Принципы создания ЭС разрабатываются с 60-х годов XX ст. с целью решения узкоспециализированных задач, что подразумевает их множественность. Приведем некоторые определения.

ЭС – класс компьютерных программ, которые выдают советы, проводят анализ, выполняют классификацию, дают консультации, ставят диагноз и т. д. Ориентированы на решение задач, обычно требующих проведения экспертизы человеком-специалистом [4].

ЭС – программное средство, использующее экспертные знания в определенной предметной области с целью эффективного решения задач в определенной предметной области, интересующей пользователя на уровне среднего профессионала (эксперта) [3].

ЭС относятся к числу систем, основанных на знаниях, и базируются на двух структурных элементах: базе знаний и аппарате логических решений.

В методологическом плане ЭС включает два начала: 1) традиционную компьютерную обработку базы данных; 2) компьютерную обработку комплекса экспертных сведений и правил, относящихся к обращению с объектом (базы знаний). Иначе говоря, используются не только формализованные и алгоритмизированные в виде математических

моделей процессов (динамические подмодели) и свойств объектов (статические подмодели) знания, но и система сведений и логических правил, неявно используемых специалистами (экспертами) для решения проблемы. Для обработки последних был создан специальный математический аппарат, имитирующий работу эксперта. Для программной реализации такого аппарата используются как современные, предпочтительно объектно-ориентированные языки программирования общего назначения, так и специально разработанные языки высокого уровня для оперирования базой знаний, ее логического анализа и получения решений по поставленным задачам.

Таким образом, структура ЭС состоит из следующего:

1) обычной базы данных о свойствах объекта;

2) математических методов для обработки данных и получения детерминированных или статистических моделей объектов и

процессов (в геологии чаще всего – стохастических, состоящих из детерминированной (трендовой) и случайной компонент);

3) базы знаний, содержащей экспертные правила;

4) логического и соответствующего ему математического аппарата получения решения той или иной задачи.

Структура типичной экспертной системы представлена на рис. 1 [10].

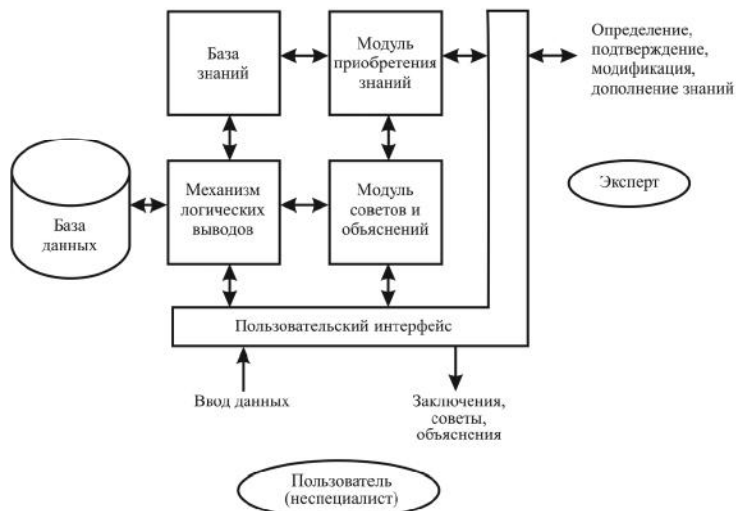


Рис. 1. Структура экспертной системы

Классическая ЭС предназначена для обработки плохо формализованной, полуконечественной и неконечественной информации. Наибольшего успеха разработчики ЭС достигли в областях медицинской диагностики, психологического тестирования, шахматных программ, других задачах, связанных с прогнозированием свойств и процессов, которые нельзя решить чисто детерминированными или вероятностно-статистическими методами.

ЭС геологического направления существенно отличаются от других систем. Одним из наиболее общих отличий является то, что фактическим их пользователем является также профессионал-эксперт (а не пользователь-заказчик, получающий готовые решения), поскольку конечным продуктом в большинстве случаев служат не решения, а некий "полуфабрикат", являющийся исходным выводом для принятия решений именно экспертом.

В геологии значительная часть информационного массива представлена именно

количественной информацией, что определяет второе и наиболее важное отличие. В основе геологической ЭС лежит цифровая модель объекта, из которой уже можно извлекать все необходимые практические решения. Очевидно, вторым отличием и объясняется задержка разработок ЭС в области геологии.

Методологическим принципом создания геологических целевых ЭС является соединение двух теоретических направлений (дисциплин): геологического компьютерного моделирования и геологической кибернетики.

*Геологическое компьютерное моделирование* – создание компьютерного виртуального объемного отображения геологических объектов и геологических процессов (процессов, проходящих в геологической среде).

*Геологический объект* – участок земной коры различного размера, выделяемый с определенной целью при геологическом изучении [3].

Примером компьютерной модели геологических объектов является цифровая структурно-литологическая модель (ЦСЛМ). ЦСЛМ – виртуальное объемное отображение геологического объекта, содержащее его структурные и качественные характеристики [5 и др.].

В области моделирования процессов известно преобладающее число примеров относится к гидрогеологическому направлению. В отечественной практике это система "Недра", разработанная Институтом кибернетики и Институтом геологических наук НАН Украины.

*Геологическая кибернетика* (в первоначальном определении – геокрибернетика) – "...отрасль знаний о закономерностях строения сложных самоорганизующихся и саморазвивающихся природных и природно-техногенных систем и протекания в них процессов управления", иначе – "...общих законах хранения, передачи и переработки информации в системах служащими геолого-географических наук" [1].

Для создания целевой ЭС геологического направления, очевидно, должны использоваться технологии искусственного интеллекта, являющиеся разделом кибернетики, в соответствующей модификации. Общий смысл

задач этих технологий соответствует п. 3, 4 приведенной выше схемы структуры ЭС.

Возвращаясь к п. 3 структуры ЭС, определим, что понимание "базы знаний" должно основываться на развитии понятия "геологическое знание". По определению А. С. Смирновой, геологическое знание – совокупность всех зафиксированных документально сведений по составу, строению и истории развития Земли [2]. Состав знания охватывает состав всех геологических наук.

Таким образом, для геологических ЭС *база знаний* – свод знаний о закономерностях строения и вещественного состава геологических объектов как систем, взаимосвязей между элементами этих систем и соседними системами, а также взаимодействия между системами и между их элементами и, наконец, развития тех и других. Как видим, определение коррелируется с общим определением базы знаний как "свода знаний и правил о взаимосвязи и взаимоотношениях между элементами базы данных" с учетом специфики, обусловленной множественностью геологических наук.

В этой связи напомним: *база данных* в геологии – комплект конкретных данных по структурным, вещественным и иным характеристикам конкретных геологических объектов (для статического моделирования) и параметров процессов в геологической среде (с привязкой к определенным характеристикам геологической среды) – для динамического моделирования.

С методологической точки зрения в основе ЦЭС лежит комплексная оценка геологической среды намеченного объекта. Средством исполнения этой оценки является комплексная модель (тоже целевая, "проблемно ориентированная", см. далее). Методологической основой моделирования является рассмотрение геологических объектов как систем, характеризующихся внешней и внутренней структурами, проходящими этапы становления и развития и находящимися в определенном взаимоотношении с окружающими системами. Исходя из этой позиции, с точки зрения преобладающего аспекта исследования объекта по фактору времени выделяются два типа моделей: статические и динамические. Структурно-литологические модели относятся к числу статических. Динамическими являются

гидродинамические, палеотранспортные, миграционно-геохимические и т. д. С точки зрения предметности подчиненные модели, составляющие комплексную (модель), соответствующую определенным геологическим наукам (дисциплинам) или их сочетаниям. Для примеров, которые будут рассматриваться далее, наиболее употребляемыми моделями оказались следующие: структурно-литологическая, гидрогеологическая, геомеханическая и др. (две первые – с подразделением на подчиненные модели более низкого ранга).

Разработка отдельных предметных моделей (с учетом компьютерных) сейчас уже рассматривается как рутинная задача. Однако их соединение для создания комплексных целевых моделей представляет уже задачу более высокого ранга, рассмотренную далее.

В мировой практике известны примеры ЭС геологического направления. Наиболее употребляемыми являются: DIPMETER ADVISOR, DRILLING ADVISOR, ELAS, LITHO, PROSPECTOR. Большинство имеют технологическую и геофизическую ориентации. Нам известна только одна ЭС – PROSPECTOR, которая консультирует геологов в поисках залежей руд. Система оценивает вероятность обнаружения определенных видов полезных ископаемых и оценивает перспективность района в их отношении. Компетентность ЭС основана на геологических правилах, образующих модели рудных отложений, и на таксономии пород и минералов.

### **Принципы разработки и функциональные возможности цифровых моделей геологических объектов**

Рассматриваются процедурные схемы и ожидаемые результаты моделирования различных целевых направлений. Наиболее разработанной является процедурная схема ЦСЛМ [5, 6]. Она охватывает выполнение следующих этапных задач: разработка структурной составляющей модели, литологическое наполнение структурных элементов, разработка программных средств визуализации модели, разработка программных средств решения задач, составляющих смысл и цель конкретной ЦСЛМ, реализация.

При создании целевой модели осуществляется дополнение общей структурно-литологической ее части специализированными исходными данными. Состав базы данных целевой модели определяется целью моделирования. Если таковой является прогнозирование полезного ископаемого, в модель могут вводиться контролирующие факторы – литофации, фации, геохимические и минералогические показатели, зоны стадийности литогенеза (для нафтидов – коллекторские свойства, для наложенной минерализации – соответствующие рудоконтролирующие факторы и т. д.), содержания полезного компонента, а также другие данные, связанные с установленными условиями распределения последнего. При постановке задачи выбора геологической среды для подземного строительства – те факторы, которые характеризуют физико-механические свойства горного массива (прочностные, емкостно-фильтрационные и др.), необходимые для расчета долговременной устойчивости и изолирующей способности в соответствии с техническими требованиями к типу сооружения.

СЛМ первого поколения [5] являются статическими, однако они достаточно эффективны для решения вопросов прогнозирования, разведки и эксплуатации месторождений осадочных формаций. Адекватность и разрешающая способность прогнозной функции могут быть повышены путем введения в моделирование динамического аспекта, что ставится нами как цель создания СЛМ второго поколения.

Геомеханические модели, предназначенные для оценки и прогнозирования геомеханического состояния и процессов в горном массиве, при использовании собственной базы данных базируются также на исходных данных СЛМ на основе установленных взаимозависимостей между литологическими характеристиками и физико-механическими свойствами пород в горном массиве, а также предоставляемой возможности геометризации их в пространстве массива.

Гидрогеологические модели в своей сущности динамические, последний аспект является предметом гидродинамики. При том, что основная задача гидродинамики – установление динамических характеристик

подземных вод, она в сочетании с гидрохимией служит основой для миграционных схем, а также схем развития карста, оползней и других опасных геологических явлений. Принимая во внимание, что определяющим фактором гидродинамики являются фильтрационные свойства пород, следует вновь отметить роль структурно-литологического моделирования, которое представляет объемную характеристику структурно-вещественной матрицы, в которой действуют потоки подземных вод.

Гидрогеологическое моделирование является наиболее развитым и методологически обоснованным направлением геоинформатики, оно достаточно широко освещено в научной литературе.

Функциональные возможности моделей определяются их предметностью применительно к задачам ЦЭС. Рассмотрим для иллюстрации пример ЦСЛМ. Функциональные возможности этой модели показаны для статических, динамических и ретроспективных аспектов, представляемых соответствующими подмоделями (рис. 2). Прокомментируем дополнительно содержание рисунка касательно направлений ЦЭС, приведенных далее.

Для направления использования сырьевых ресурсов функциональные возможности моделирования включают следующее. Для статической подмодели:

- выделение фаций (и генотипов), благоприятных для рудообразования (седиментационного и седиментационно-диагенетического типов);
- выделение литофаций и литотипов, благоприятных для локализации эпигенетических рудных тел, выделение пород-коллекторов;
- установление пространственного распределения геохимических и других барьеров.

Для динамической подмодели:

- прогноз реализуемости благоприятных литофаций и фаций (для рудных месторождений);
- прогноз реализуемости коллекторов (для месторождений углеводородов).

По направлению подземного строительства для статической подмодели – установление пространственного распределения физико-механических, барьерных свойств элементов горного массива.

Для динамической и других подмоделей предполагается учет иных факторов, касаю-

Статическая подмодель	<p style="text-align: center;">Возможности → выделения</p>	<p>Фации (и генотипы), благоприятные для рудообразования (седиментационного и седиментационно-диагенетического типов)</p> <p>Литофации и литотипы, благоприятные для локализации эпигенетических рудных тел и залежей коллекторов</p> <p>Распределение барьерных свойств геолого-геохимической среды</p>
Динамическая подмодель (открытые системы, взаимодействие квазизакрытых и открытых систем)	<p style="text-align: center;">Возможности → прогнозирования</p>	Реализуемости благоприятных фаций
Подмодель взаимодействия системы с другими системами (все квазизакрытые)	<p style="text-align: center;">Возможности → прогнозирования реализуемости коллекторов</p> <p style="text-align: center;">Возможности → прогнозирования поведения загрязнения</p>	<p>Рудных тел</p> <p>Залежей углеводородов</p> <p>Моделирование загрязнения геологической среды</p>

Рис. 2. Структура и функциональные возможности структурно-литологической модели

щихся технических и экологических аспектов функционирования объектов техногенно-геологических систем соответствующих типов.

Для направления охраны геологической среды возможности статической подмодели включают:

- установление пространственного распределения физико-механических, барьерных свойств геологической среды;

для подмодели взаимодействия модельной системы с другими системами:

- прогнозирование динамики распространения загрязнения.

Кроме этого, нужно учитывать, что ЦСЛМ представляет матричную основу для разработки моделей подчиненного ранга динамической направленности, характеризующей процессы тепломассопереноса – гидрогеологические, теплофизические, наложенных процессов.

### **Принципы разработки комплексных моделей**

Комплексная модель, будучи целевой, должна отражать, с одной стороны, определенный предметный интерес: ресурсный, горный (эксплуатационный, строительный), экологический (охрана недр, восстановление геологической среды или их сочетания); с другой – необходимые для результативного осуществления программных действий аспекты, представляемые соответствующими подчиненными моделями (см. выше). В методологическом плане объединение подчиненных моделей является динамической составляющей взаимодействия систем или элементов их внутренней структуры. В плане теоретических моделей геологических объектов различного типа процедура объединения моделей отражает различные взаимосвязи, взаимодействия, процессы: например, взаимосвязи между литологическими характеристиками и барьерными, физико-механическими или фильтрационными свойствами и т. д.; вещественного состава и гидрохимических характеристик; взаимодействия – вода-порода, газ-вода, между твердыми фазами (деформации, диапиризм и др.); изменения под влиянием термодинамических условий; наложенные процессы и др. Отметим, что ряд подчиненных моделей, используемых

для построения комплексных целевых моделей, может быть очень широким. Их функциональная роль в комплексной модели устанавливается, исходя из их предметности.

К примеру, в составе теоретической комплексной эколого-горно-геологической модели оценки геологической среды для размещения объектов изоляции радиоактивных отходов (хранилищ геологического типа) принимают участие семь основных предметных моделей: структурно-тектоническая, литологическая (или петрографическая), геомеханическая и инженерно-геологическая, геохимическая, теплофизическая, гидрогеологическая (гидродинамическая, гидрохимическая) и гидрогеологическая миграционная [8].

Объединение подчиненных моделей (в сравнении с их разработкой) представляет собой уже нетрадиционную задачу из-за существенного возрастания количества элементов, факторов и событий (сценариев).

### **От комплексной модели – к ЦЭС**

Таким образом, комплексная цифровая модель геологического объекта – это набор объемных цифровых моделей отдельных его свойств: литологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и т. д. Как правило, целевое назначение такой модели состоит в классификации по заданным классификационным схемам отдельных частей объекта, т. е. выделение в объеме геологического объекта тел с заданными свойствами. В большинстве случаев решение задач классификации производится автоматически специальными компьютерными программами визуализации модели и не требует вмешательства эксперта. Однако в ряде случаев такое решение неоднозначно и требует содержательной интерпретации (экспертизы) для выработки окончательного решения. Экспертиза состоит в содержательном анализе полученных результатов, проверке их на непротиворечивость имеющимся теоретическим представлениям данной предметной области, часто неформальным и даже неформализуемым и может привести к осознанию необходимости доопределения модели на уровне исходных данных и повторения отдельных стадий или полного цикла процесса моделирования.

Кроме того, целевое решение может представлять собой продукт качественного экспертного анализа числовых результатов, полученных из подчиненных предметных моделей комплексной модели геологического объекта. Качественный экспертный анализ может быть реализован в виде комплекса процедур (логико-математического аппарата получения решений) обработки базы экспертных правил (базы знаний). По определению такая система, состоящая из базы данных объекта (включающей и все подчиненные цифровые модели), базы знаний (логических экспертных правил для неформального анализа результатов подчиненных моделей) и математического аппарата обработки базы знаний (получения целевых решений), является ЭС, в нашем случае ЦЭС геологического объекта.

Разработка ЦЭС на основе комплексных моделей различных направлений имеет целью выделение в объемах геологического объекта элементов, характеризующихся определенными заданными свойствами (наличие полезных ископаемых, физико-механические характеристики, барьерные свойства и т. д.), и процессов, обуславливающих изменения различных функциональных свойств геологической среды (состояние подземных вод, геомеханические, структурные, вещественные, термодинамические и иные ее характеристики). В целом, обозначенные возможности означают информационное обеспечение решения ресурсных, строительных и экологических проблем в области многоцелевого использования и охраны недр.

### **Типизация и содержание ЦЭС**

В общем, можно выделить три концептуальных направления ЦЭС (соответственно направлениям обращения с геологической средой):

- использование сырьевых ресурсов;
- подземное строительство (два подчиненных направления – шахтное строительство и использование в целях, не связанных с добычей полезных ископаемых – строительство сооружений разного назначения);
- охрана геологической среды (охватывает геоэкологические проблемы и сохранение ресурсной базы или предупреждение негативных изменений в геологической среде и восстановление механических, гео-

химических и других нарушений, гидрогеологического режима и т. д.).

Исходя из того, что в основе ЦЭС лежит комплексная (тоже целевая) модель, последняя может составляться несколькими предметными моделями. Общий ряд последних рассматривает функциональные характеристики геологического объекта: структуру, вещественный состав, гидрогеологические, горно-механические, инженерно-геологические параметры, экологический (с рядом подчиненных) аспект, а также смежные аспекты – технологические, экономические, вплоть до маркетингового. Комплекс моделей ЦЭС конкретного объекта определяется предметом (системой мероприятий) обращения с этим объектом.

Для различных направлений и отдельных типов ЭС присущи разные комплексы моделей. Согласно назначению систем можно выделить такие их направления: ресурсно-геологическое, ресурсно-горно-геологическое, горно-геологическое, эколого-горно-геологическое, эколого-геологическое.

Два первых направления касаются ЭС, предназначенных для обеспечения исследований и работ, которые направлены на развитие сырьевой базы полезных ископаемых (с соответствующей ролью горной составляющей), третье – горно-геологическое – связано с подземным строительством.

Эколого-горно-геологическое и эколого-геологическое направления предназначены для создания ЦЭС, связанных с охраной геологической среды: первое – для территорий деятельности горнодобывающих предприятий; второе – для территорий других нарушений геологической среды (разного рода загрязнения и т. д.).

В пределах намеченных направлений комплексы (наборы) моделей (и их содержание) также отличаются в зависимости от целевого назначения ЭС.

### **Примеры разработки целевых комплексных моделей, представляющих основу для создания ЦЭС**

На сегодняшний день нами разработано несколько ЦСЛМ. По направлению использования сырьевых ресурсов демонстрируется ЦСЛМ для типового россыпного мес-



торождения ильменита (Злобичское россыпное месторождение) и золотоносных россыпей (Канев-Звенигородская перспективная площадь золотоносных россыпей и золоторудное месторождение Балка Широкая). По направлению охраны геологической среды показаны примеры двух геологических объектов деятельности горнодобывающих предприятий соляной промышленности с развитием экологической катастрофы\*, для которых начата разработка комплексных моделей (Солотвинское месторождение каменной соли и Калушский горно-промышленный район). Описания моделей приведены в ряде наших публикаций [6, 11 и др.].

*Злобичское россыпное месторождение ильменита.* Разработана ЦСЛМ месторождения, описание которой приведено в некоторых наших работах [6, 11 и др.].

Создание этой модели обеспечило решение следующих задач:

- установление пространственного размещения рудных тел, прослеживание их связи с литофациями и фациями, генотипами и т. д.;

- автоматический подсчет запасов по установленному бортовому содержанию рудного компонента;

- отработка комплексной методики прогнозирования месторождений данного типа.

Кроме этого, модель Злобичского месторождения обеспечила основу решения части технологических задач посредством установления пространственного распределения гранулометрических параметров и глинистости, а также определение условий селективной разработки месторождения (задание смежной технологической модели).

*Канев-Звенигородская перспективная площадь золотоносных россыпей.* Создание ЦСЛМ этого геологического объекта обеспечило решение следующих задач:

- установление закономерностей фациальной, литофациальной, палеорельефной приуроченности оруденения;

- выделение перспективных участков.

*Золоторудное месторождение Балка Широкая.* В пределах объекта рассмотрены

два формационных подразделения: кора выветривания и перекрывающая осадочная толща. Детальное описание модели приведено в наших публикациях [6, 11 и др.]. Разработка модели обеспечила решение следующих задач:

- установление пространственного распределения золота, серебра и меди относительно зональности коры выветривания;

- установление закономерностей фациальной и литофациальной приуроченности оруденения в перекрывающей осадочной толще;

- выделение перспективных участков.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что для рассмотренных типов месторождений и рудопроявлений структурно-литологическое моделирование является основной самостоятельной составляющей будущих ЦЭС, которые предназначены для обеспечения решения преобладающей части задач, связанных со всеми этапами исследований и работ, направленных на освоение этих месторождений. Экологический (технико-экологический) аспект, очевидно, будет выступать как определяющий на завершающем этапе рекультивации территории горнодобывающего предприятия.

Дальше приведены примеры подготовки ЦЭС для территории деятельности горнодобывающих предприятий соляной промышленности в связи с экологическими проблемами.

В основе методологии построения целей и задач ЭС и целевого моделирования для территории деятельности горнодобывающих предприятий соляной промышленности в связи с экологическими проблемами лежит определение нарушений биосферы при техногенном вмешательстве в соляные массивы (см. таблицу).

Рассмотрены два производственно-геологических объекта: Солотвинское месторождение каменной соли и Калушский горно-промышленный район.

*Солотвинское месторождение каменной соли.* Развитие экологической катастрофы здесь связано с территорией деятельности Государственного предприятия (ГП) "Солотвинский солерудник". В соответствии с решением Государственной комиссии по вопросам техногенно-экологической

\* Экологическая катастрофа – комплекс существенных негативных нарушений природной окружающей среды.

безопасности и чрезвычайных ситуаций от 27 января 2011 г., Институтом геологических наук НАН Украины с участием ряда других организаций был разработан проект "Программы решения экологических, социальных и производственных проблем пгт. Солотвино", переданный Закарпатской облгосадминистрации для реализации. Содержанием проекта обозначено два направления программных мероприятий: 1) обращение с территорией деятельности ГП "Солотвинский солерудник" и 2) поиск

перспективных участков для размещения подземного отделения Украинской аллергологической больницы.

Для обеспечения управленческих решений в качестве основного средства аналитического обеспечения нами было предложено построение комплексной эколого-горно-геологической модели. Эта модель должна включать три составляющие: структурно-литологическую, гидрогеологическую и геомеханическо-инженерно-геологическую.

### Нарушение биосферы (геологической и окружающей среды) в результате техногенного вмешательства в соляные массивы

Тип влияния (вид работ)	Нарушения геологической среды			Нарушения поверхностной окружающей среды	
	Механические	Геохимические	Гидрогеологические	Технологические выбросы	Влияние отвалов и хвостохранилищ
1. Эксплуатация соляных ресурсов					
1.1. Шахты Каменная соль Калийно-магниево-соли	Провалы, оседания земной поверхности, деградация ландшафтов, экологически дестабилизированный рельеф	Засолонение геологической среды (пород, подземных и поверхностных вод, грунтов)	Нарушение гидрогеологических режимов смежных водоносных горизонтов	Выбросы соляной пыли, рассолов	Распространение соляной пыли, загрязнение грунтов рассолами, прорыв хвостохранилищ
1.2. Карьеры	Деградация рельефа		Локальные нарушения гидрогеологических режимов, затопление карьера	Распространение соляной пыли	
1.3. Подземное выщелачивание	Провалы, оседания земной поверхности, деградация рельефа		Нарушение гидрогеологических режимов смежных водоносных горизонтов	Отсутствует	
К а р с т					
2. Строительство и эксплуатация подземных хранилищ					
2.1. Емкости подземного выщелачивания	То же, прорыв продукта (отходов), сохраняющегося в геологической среде	Загрязнение геологической среды	То же	Сброс рассолов	–
2.2. Использование отработанных шахтных выработок				Отсутствует	–
К а р с т					
3. Неумышленное вторжение					
3.1. Разрушение соляной толщи	Локальный разрыв соляной толщи	Смешивание геохимических специализаций	Локальная гидравлическая связь водоносных горизонтов	–	–
3.2. Нарушение природной защищенности (при разработке надсолевых защитных горизонтов, при эксплуатации месторождений нефти, газа и др.)	Размыв соляной толщи	Засолонение (в зависимости от масштаба нарушения соляной толщи)	Нарушение гидрогеологических режимов смежных водоносных горизонтов	–	–
К а р с т					

В настоящее время завершена разработка ЦСЛМ, обеспечивающая:

- установление пространственного распределения физико-механических и барьерных свойств среды соляного массива (предоставление исходных данных для геомеханического и гидрогеологического моделирования);

- установление пространственного распределения петрографических и геолого-промышленных типов каменной соли (для поиска участка размещения подземного отделения Украинской аллергологической больницы, возможно – участка для размещения рассолопромысла и др.);

- уточнение рельефа поверхности соляного массива (в связи со всеми вышеуказанными заданиями).

Гидрогеологическая и геомеханическо-инженерно-геологическая модели предназначены для решения соответствующих предметных вопросов, касающихся механизма развития и прогноза опасных геологических явлений.

Разработка комплексной эколого-горно-геологической модели должна обеспечить следующее:

- комплексную оценку состояния соляного массива;

- составление карты прогноза развития опасных геодинамических процессов (провалов, оседаний, развитие карста);

- разработку схемы мониторинга (геомеханического, гидрогеологического);

- обоснование мероприятий по ограничению и ликвидации последствий опасных геологических процессов;

- обоснование выбора перспективного участка для размещения подземного отделения Украинской аллергологической больницы и других смежных объектов.

В связи с проработкой альтернативного варианта размещения аллергологической больницы, по предложению Закарпатской облгосадминистрации нашим коллективом (Л. П. Босевская, Д. П. Хрущев, Ю. В. Кирпач) была разработана СЛМ (на первом этапе – аналоговая) Терезьянской солянокупольной структуры. Полученная модель свидетельствует о более низком уровне перспективности этой структуры по сравнению с Солотвинской [9]. Тем не менее с учетом этой оценки как определяющей по ре-

зультатам моделирования уже построена прогнозная карта с выделением потенциально перспективных участков для постановки геологоразведочных работ.

*Территория Калушского горно-промышленного района.* В настоящее время, в соответствии с Указом Президента Украины от 10.02.2010 г. № 145/2010 "Об объявлении территорий г. Калуш и сел Кропивник и Сивка Калушская Калушского района Ивано-Франковской области зоной чрезвычайной экологической ситуации", разрабатывается межведомственная программа комплексного эколого-геологического мониторинга на территории Калушского горно-промышленного района. По нашему предложению в эту программу включены два раздела: разработка структурно-литологической и геомеханической моделей (для территории деятельности горнодобывающих предприятий Калушской группы месторождений калийно-магниевых солей). При объединении с гидрогеологической моделью и некоторыми другими направлениями исследований они должны составлять комплексную эколого-горно-геологическую модель.

Задачи этих моделей следующие.

Структурно-литологическая модель:

- пространственное распределение литофациальных комплексов;

- характеристика их морфологии, вещественного состава, структурно-текстурных признаков, выделение литотипов.

Модель предоставляет исходные данные для разработки гидрогеологического и геомеханическо-инженерно-геологического моделирования с учетом двух направлений: ресурсного и экологического (обеспечение базы для диагностики и прогнозирования опасных геологических явлений – карста, оседаний, провалов, оползней).

Гидрогеологическая модель:

- построение гидродинамических схем с отображением источников питания и областей разгрузки, прогноз изменений режима по возможным сценариям;

- построение гидрохимических схем с отображением условий формирования и изменений основных параметров, прогноз изменений гидрохимических параметров по возможным сценариям с установлением распространения солевого и других видов загрязнений водоносных горизонтов.

Геомеханическая инженерно-геологическая модель:

- моделирование несущей способности и долговременной устойчивости техногенных и геологических элементов техногенно-геологической системы территории;
- моделирование деформаций дневной поверхности и основных элементов техногенно-геологической системы;
- прогноз проявлений опасных геологических процессов (оседаний, провалов, оползней).

Особенностью разработки указанных моделей является необходимость учета складчато-блокового строения района. Поэтому построения проводятся по выделенным тектоническим участкам. Это, в свою

очередь, определяет ведущую роль структурно-литологической модели.

Комплексная эколого-горно-геологическая модель должна отображать все информационные и прогнозные данные рассмотренных моделей, а именно:

- состояние и прогноз опасных геологических, в том числе геодинамических явлений;
- состояние и прогноз распространения солевого и сопутствующего загрязнения водоносных горизонтов и геологической среды, а также поверхностных вод (дополнительной задачей является также решение вопроса обращения с пунктом локализации токсических отходов – гексахлорбензола и др.).

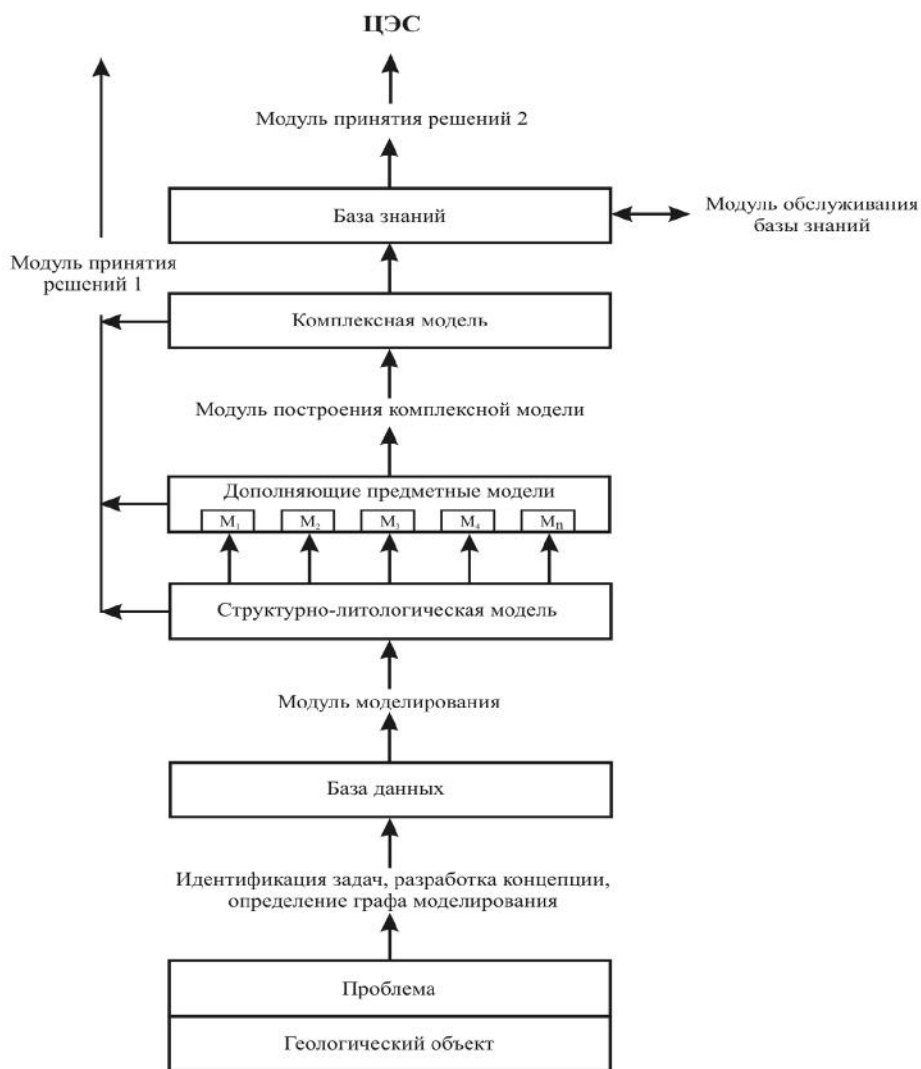


Рис. 3. Принципиальная схема ЦЭС геологической проблемы

Комплексная эколого-горно-геологическая модель составляет основу для подготовки программных управленческих решений по двум стратегическим направлениям:

- обращение с деградированными территориями площадей деятельности горнодобывающих предприятий (ликвидация и ограничение влияния последствий проявлений негативных геологических процессов);
- обращение с оставшейся частью сырьевой базы месторождения (калийно-магниевые соли, рассолы).

## Заключение

ЦЭС должна обеспечить решение целевой задачи в случае, когда количественный компьютерный анализ комплексной модели не приводит к однозначным результатам, а получение оптимального решения целевой проблемы возможно только при экспертном анализе результатов, полученных на частных подмоделях комплексной модели. В контексте геологических задач схема классической ЦЭС (рис. 1) конкретизируется (рис. 3).

Авторы видят свою дальнейшую задачу в разработке комплексных моделей геологических объектов, баз знаний, содержащих наборы экспертных правил для интерпретации частных результатов комплексных моделей конкретных объектов, математического аппарата для обработки баз знаний и в конечном счете – в разработке ЦЭС.

1. *Кадетов О. К., Колесников А. И., Кравцов В. В.* Геоинформатика и геокибернетика – два направления системных исследований Земли // Сб. науч. тр. "Системный подход в геологии". – М.: Наука, 1989. – С. 115–121.
2. *Смирнова А. С.* Информационный анализ в геологии. – М.: Недра, 1985. – 157 с.
3. *Субботін С. О.* Подання і обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навч. посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. – 341 с.
4. *Таунсенд К., Фохт Д.* Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / Пер. с англ. В.А. Кондратенко, С. В. Трубицына. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.

5. *Хрущов Д. П., Лобасов А. П.* Принципы разработки цифровых структурно-литологических моделей осадочных формационных подразделений // Геол. журн. – 2006. – № 2–3. – С. 90–102.
6. *Хрущов Д. П., Лобасов А. П., Гейченко М. В. и др.* Структурно-литологические модели перспективных осадочных формаций // Мінер. ресурси України. – 2010. – № 4. – С. 39–44.
7. *Хрущов Д. П., Лобасов А. П., Ремезова Е. А. и др.* Цифровые структурно-литологические модели как информационно-аналитическая основа для принятия решений по эксплуатации и охране минеральных ресурсов и геологической среды // V Міжнар. наук.-практ. конф. "Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення" (7–11 верес. 2009 р., м. Алушта): Зб. наук. ст. – Харків: Райдер, 2009. – Т. 2. – С. 60–65.
8. *Хрущов Д. П., Лялько В. И., Харитонов О. М. и др.* Изоляция радиоактивных отходов в геологических формациях. – Киев, 1993. – 60 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т геол. наук; 93-3).
9. *Хрущев Д. П., Яковлев Е. А., Босевская Л. П. и др.* Соль вопроса: что же будет в Солотвино? Международный туристический центр – или опасная зона "лунного ландшафта"? // Газета "2000". – 2011, № 37 (573). – С. B1-B3.
10. *Экспертные системы.* – <http://itteach.ru/predstavlenie-znaniy/ekspertnie-sistemi>.
11. *Khrushchov D. P., Lobasov O. P., Kovalchuk M. S. et al.* Digital structural-lithological models of sedimentary formations: a tool of informational-analytical supervision for exploitation and protection of mineral resources and geological environment // Abstracts of International Conference "GeoDarmstadt 2010 – Geosciences Secure the Future". – Darmstadt, Germany, 2010. – Heft 68. – P. 306–307.

<sup>1</sup>Ин-т геол. наук НАН Украины, Статья поступила  
 Киев 06.03.12  
 E-mail: [Khrushchov@hotmail.com](mailto:Khrushchov@hotmail.com)

<sup>2</sup>ДП "НИИ нефтегазовой промышленности",  
 Вишневое, Киевская область  
 E-mail: [lobasov\\_al@rambler.ru](mailto:lobasov_al@rambler.ru)

<sup>3</sup>УкрНИИсоль,  
 Артемовск, Донецкая область  
 E-mail: [bosslara@gmail.com](mailto:bosslara@gmail.com)