

УДК 528.94.942

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРИЕНТИРОВАННОГО ГРАФА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ГРАНИЦ В ФОРМАЛЬНОМ ОПИСАНИИ ТРЕХМЕРНОЙ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**О. К. Миронов, Е. А. Карфидова, В. Б. Свалова**

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

*E-mail: e.karfidova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

После исправления 25.09.2018 г.

В статье рассматривается современное состояние формализованного описания 3-мерной геологической модели с изложением проблем, связанных с увеличением масштаба и переходом от выделения геологических тел по стратиграфическому принципу к литолого-стратиграфическим и инженерно-геологическим подразделениям. Предложен подход к решению этих проблем. Показано, что проблема корректного определения последовательности залегающих литолого-стратиграфических подразделений может быть решена путем топологической сортировки вершин ориентированного графа. Впервые описаны требования к нелокальному согласованию геологических разрезов.

**Ключевые слова:** *трехмерное геологическое моделирование, геологические разрезы, база данных скважин, ориентированный граф, топологическая сортировка.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019170-80>

### ВВЕДЕНИЕ

Трехмерное моделирование геологической среды предоставляет специалистам адекватный язык описания геологической информации и технологические инструменты для решения разнообразных задач.

Любая модель, объекты которой находятся в 3-мерном пространстве, может называться 3-мерной. В статье рассматривается специальный класс геометрических геологических моделей, отображающих расположение геологических тел в пространстве. Концепция создания и применения таких моделей приведена в [8], а класс этих моделей назван 3-мерными геологическими картами.

Для гидрогеологического моделирования ситуации в районе строительства Алабяно-Балтийского туннеля в г. Москве [1] в ИГЭ РАН была составлена 3-мерная геологическая карта исследуемого участка (модель АБТ). Развитие предложенной в [8] методики 3-мерного геологического моделирования рассмотрено на основе опыта проделанной работы.

Из широкого спектра приложений 3-мерных геологических карт, приведенного в [8], наиболее важны:

- 3-мерная геологическая карта как модель, позволяющая геологу создать целостное непротиворечивое представление о строении изучаемой толщи горных пород (3-мерный аналог 2-мерной геологической карты);
- 3-мерная геологическая карта как источник данных для численного математического (гидрогеологического, геотехнического и т.п.) моделирования.

3-мерные геологические карты существуют только как компьютерные модели. Средства визуализации позволяют изобразить заданные аспекты модели, но показать модель «целиком», в отличие от обычных 2-мерных карт, в принципе невозможно.

В отличие от маркшейдерских и архитектурных 3-мерных построений, в которых все данные о 3-мерных телах предполагаются точно заданными, геологические 3-мерные модели отражают точку зрения геолога, работающего в условиях недостатка исходной информации. Поэтому проверка правильности геологических моделей не сводится к проверке исходных данных, а должна осуществляться на основе специальных, хорошо формализованных содержательных процедур. В этом отношении приемка 3-мерной модели ана-

логична приемке авторского экземпляра геологической карты.

При практическом применении 3-мерных геологических моделей возникают 2 основных вопроса:

- правильно ли геолог построил модель (решается ли главная проблема, поставленная перед геологом);
- соответствуют ли использованные технологические средства (формальная структура модели, программное обеспечение) содержательным требованиям геолога.

В статье рассматривается одна из технологий 3-мерного моделирования. Приведенное описание предназначено для ответа на 2-й из поставленных вопросов. Анализ выполняемых при 3-мерном моделировании действий может служить для оценки адекватности данной технологии решаемым геологическим задачам, и тем самым предоставить существенные аргументы для ответа и на 1-й основной вопрос.

При создании технологии 3-мерного геологического моделирования необходимо творческое сотрудничество геолога, формулирующего содержательные задачи для моделирования, и специалиста по геоинформатике, владеющего навыками разработки пространственных моделей, интерфейсов и решения системотехнических вопросов. Это сотрудничество основывается на равноправном партнерстве, цель которого — поиск рациональных способов работы с моделью.

В этой статье процесс создания 3-мерной геометрической геологической модели рассматривается с информационно-технологических позиций. Выделяются задачи, возникающие в процессе взаимодействия геолога и специалиста по геоинформатике на разных стадиях составления модели, обсуждаются формальные требования к составляющим частям модели и предлагаются подходы к решению этих задач.

Описание конкретной геологической ситуации и принятых при составлении модели АБТ решений не входит в тематику данной статьи (см. подробности в [1]). Основное внимание уделяется следующим темам:

1. Модификация 3-мерной модели при переходе от стратиграфического к литолого-стратиграфическому принципу выделения геологических тел.
2. Параллелизм между 2-мерной картографией и составлением 3-мерных геометрических геологических моделей.

## МОДЕЛЬ «СЛОЕНОГО ПИРОГА» И ОГРАНИЧЕНИЯ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Одна из популярных 3-мерных геологических моделей — так называемый «слоеный пирог». Чаще всего этот тип моделей применяется, когда геологические тела выделяются по стратиграфическому принципу. Характерный масштаб в плане для таких моделей — 1:50 000 и мельче.

Предполагается, что вся исследуемая толща состоит из последовательно наложенных друг на друга геологических тел, в местах контакта подошва вышележащего тела совпадает с кровлей нижележащего, т.е. каждое тело определяется поверхностями его кровли и подошвы. Поверхности кровли и подошвы геологических тел не допускают складок и разрывов и могут быть заданы как поверхности графиков функций от координат в плане. Создание модели начинается с условной горизонтальной поверхности «дна» модели; далее для каждого следующего геологического тела задаются область его распространения в плане и поверхность кровли. Поверхностью подошвы геологического тела служит соответствующая часть поверхности объединенной кровли уже построенных нижележащих геологических тел.

Таким образом, в информационном плане модель «слоеного пирога» состоит из набора согласованных цифровых моделей поверхностей кровель геологических тел, каждая из которых имеет свою область распространения в плане (область определения функции, график которой и есть эта поверхность). Методы интерполяции для построения таких поверхностей используются в геоинформационных технологиях с первых шагов их применения и непрерывно совершенствуются.

Исходной информации колонок изыскательских скважин для корректного с содержательной геологической точки зрения интерполяции искоемых поверхностей, как правило, недостаточно, поэтому дополнительно строятся геологические разрезы, данные с которых используют при составлении модели. Привлекается и другая доступная информация (тематические карты, геофизические профили и т. п.).

Многочисленные программные продукты, применяемые в компьютерной геологической картографии (ArcGIS: 3D Analyst, Spatial Analyst, 3DScene; MapInfo; ILWIS; GSI3d [12] и др.) предоставляют разнообразные средства визуализации моделей «слоеного пирога».

Модель «слоеного пирога» была использована в ИГЭ РАН для составления карты гидрогеологических окон территории Москвы [5, 6, 9]; масштаб модели в плане — 1:50 000. Данные модели о мощностях различных стратиграфических

подразделений дочетвертичных отложений были использованы для расчета времени фильтрации загрязнений с поверхности земли до подошко-мячковского водоносного горизонта и соответствующего районирования территории.

Применение идеальной модели на практике затруднено в следующих ситуациях, требующих дополнительного методического анализа и технологических решений.

1. *Наличие разрывных нарушений.* Рутинная процедура для построения 3-мерной модели с разрывными нарушениями состоит в выделении поверхностей разрывных нарушений, разбиении всей изучаемой толщи на блоки без разрывных нарушений, задании геометрических условий на границах блоков и составлении 3-мерных моделей внутри блоков. В практике решения конкретных задач авторы не сталкивались с разрывными нарушениями, поэтому они не рассматриваются в статье.

2. *Определение порядка следования геологических тел.* Если геологические тела выделяют по стратиграфическому принципу, то порядок их следования определяется стратиграфической последовательностью и задан априори. При увеличении масштаба моделирования выделение геологических тел проводится по литолого-стратиграфическому делению с привлечением дополнительной информации о свойствах тел (инженерно-геологические элементы). В этом случае задать априори порядок следования геологических тел можно только для очень простых или небольших по объему информации моделей. В остальных случаях все, что можно задать априори, — это классификатор геологических тел, а определение порядка следования тел внутри одного стратиграфического подразделения представляет собой отдельную задачу. О том, как она решается, рассказывается ниже в статье.

3. *Наличие включений (прослоев) одних геологических тел внутри других (линзы).* Такая ситуация типична при составлении литолого-стратиграфических или инженерно-геологических моделей. Ниже описано, как предлагается строить модель в таком случае.

4. *Наличие фациальных замещений.* Если свойства грунтов (например, гранулометрический состав отложений) меняются плавно, то провести четкую границу между геологическими телами, как это предполагает структура модели, невозможно. В этом случае предлагается выделять соответствующие объемы как отдельные геологические тела «фациальных замещений»; строить модель обычными средствами с включением в нее этих особых тел, а также предусмотреть специ-

альные картографические средства визуализации фациальных замещений на геологических картах, разрезах и 3-мерных изображениях и средства для интерполяции свойств внутри этих тел для обеспечения интерфейса с программами математического моделирования.

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ 3-МЕРНОЙ ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Формально модель, описываемая геометрически, совпадает с моделью «слоеного пирога». Модификации относятся к определению последовательности залегания геологических тел и связанных с этим дополнительными проверками исходных данных, а также к обработке складок и линз.

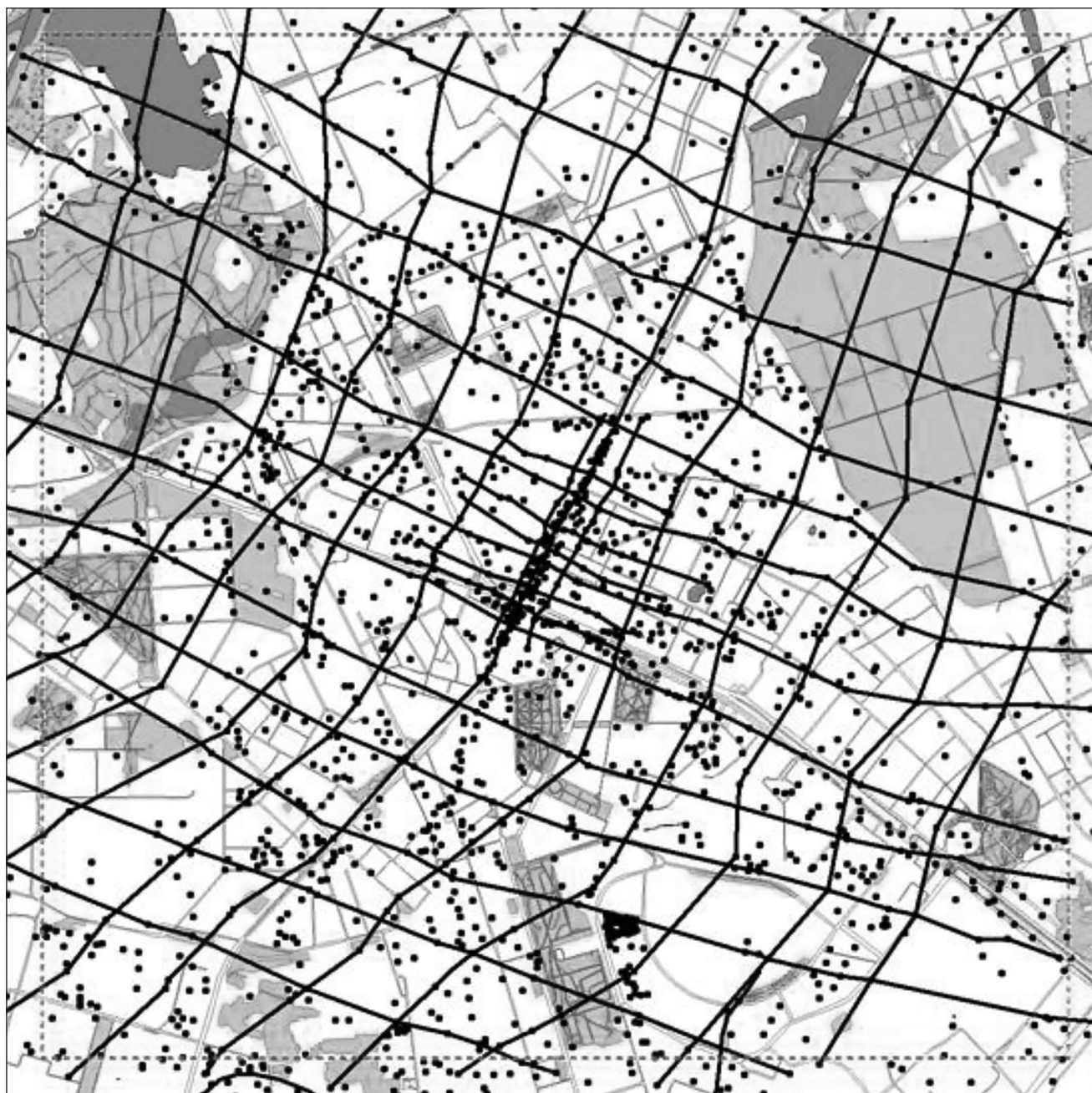
Составление 3-мерных геологических моделей, так же как и 2-мерное картографирование, есть итеративный процесс. На каждом последующем шаге возможен возврат к одному из предыдущих шагов и пересмотр принятых решений.

Приводимое описание пока не является методикой использования законченного программного продукта, который мог бы считаться идеальным для 3-мерного моделирования. Программно-технологические решения подлежат дальнейшему развитию как в части постановки содержательных задач, так и в области математических методов их решения и создания программных продуктов.

### 1. Выбор классификатора геологических сущностей

Классификатор геологических сущностей, подлежащих включению в модель, должен быть создан перед началом построения модели. Методически создание классификатора соответствует выбору состава объектов при разработке обычных двумерных карт. В соответствии с требованиями решаемой задачи и местными особенностями должны выбираться правила отнесения реальных геологических объектов к позициям литолого-стратиграфического или инженерно-геологического классификатора, определяться необходимая степень генерализации, правила выделения геологических тел и др.

Стратиграфический порядок определяет отношение предпорядка на множестве объектов классификатора. Предпорядок отличается от порядка тем, что из соотношений  $a \leq b$  и  $b \leq a$  не следует  $a = b$ . Содержательно это означает, что литологические отложения одного возраста могут, вообще говоря, залегать в произвольном порядке. Если по



**Рис. 1.** Зона моделирования: расположение профилей и изыскательских скважин в районе Алабяно-Балтийского туннеля (АБТ).

генетическим соображениям порядок их следования может быть predetermined, то это должно быть учтено в предпорядке следования объектов классификатора.

Для каждого объекта классификатора могут задаваться способы его картографического изображения на картах и разрезах. Для интерфейсов с расчетными программами в классификатор может включаться набор характеристик его объектов. В модели АБТ для каждого литолого-стратиграфического подразделения задавали

коэффициенты фильтрации и геотехнические параметры (модуль Юнга и др.).

Необходимо отметить, что каждая 3-мерная модель, так же как и 2-мерная карта, создается для решения определенных задач. Информационное взаимодействие различных 3-мерных моделей на один и тот же объем геологического пространства происходит по тем же правилам, что и согласование различных карт на одну и ту же местность. Проблемы унификации информации и возможности ее совместного использования в методиче-

ском плане совершенно аналогичны для 2-мерных и 3-мерных данных.

В модели АБТ классификатор геологических сущностей содержит 40 позиций.

## 2. Классификация исходных данных

Основной объем исходной информации для рассматриваемого класса моделей — описания буровых колонок скважин. При составлении 3-мерных моделей, так же как и при составлении 2-мерных карт, целесообразно привлекать ранее собранную информацию геологических фондов, а не ограничиваться только материалами текущих изысканий.

Возникающие проблемы при использовании фондовой информации изложены в статье [7]. Основные трудности связаны с изменением информационной модели. В большинстве случаев архивные данные собирали не для той задачи, которую планируется решать в текущий момент, поэтому требуется их тщательная дополнительная проверка и приведение к выбранному на этапе 1 классификатору. Переход от классификатора, используемого в геологическом фонде, к классификатору разрабатываемой модели представляет собой нетривиальную задачу. В процессе ее выполнения может потребоваться новая интерпретация данных, которая может быть выполнена различными способами и, в свою очередь, нуждается в верификации.

Эти операции соответствуют сбору исходных данных в 2-мерной картографии.

В процессе составления модели АБТ были использованы данные колонок 1765 скважин (архивных и пробуренных в процессе изысканий под объект). Суммарная длина колонок скважин составляет 53,9 км.

## 3. Выбор сетки геологических разрезов

Исходные изыскательские скважины, как правило, расположены весьма неравномерно, поэтому их данных обычно бывает недостаточно для проведения достоверной интерполяции границ геологических тел. Так же как и в [8, 12, 13], более детальная исходная информация для интерполяции берется с геологических разрезов. Построение разрезов — рутинная для геологов операция, позволяющая наглядно представить точку зрения специалиста на последовательность залегания геологических тел. Формализованные требования 3-мерного моделирования налагают дополнительные ограничения на составление геологических разрезов.

Выбор линий геологических разрезов должен, во-первых, обеспечить достаточную плотность исходной информации для интерполяции поверхностей геологических тел; во-вторых, обеспечить идентификацию особенностей геологического строения (наличие погребенных эрозионных врезов и др.).

Далее, при реализации алгоритмов 3-мерного моделирования предполагается, что в одной точке плана могут пересекаться только 2 линии разрезов. Это условие «общего положения» не является обременительным, однако существенно упрощает технологический процесс составления модели. В частности, потребуется согласование в точке пересечения только 2 разрезов, а не 3 пар разрезов, если бы 3 линии пересекались в одной точке.

Расположение скважин и линий разрезов, использованных при составлении модели АБТ, показано на рис. 1. Всего составлено 33 геологических разреза общей протяженностью 160,8 км. Для более точного изучения объекта вблизи от него выполнено сгущение сетки разрезов. Площадь зоны построения модели — 36 кв. км.

## 4. Составление геологических разрезов

Геологический разрез с информационно-технологической точки зрения представляет собой картографическую модель, выполненную в специальной системе координат: ось X расположена горизонтально вдоль линии разреза, ось Z направлена вертикально. Дополнительная особенность этой «карты» — возможность независимого задания масштаба по осям X и Z. В зависимости от текущих потребностей разработчиков картографическая модель разреза может быть оформлена как полноценное картографическое произведение или как рабочий чертеж. В рассматриваемой технологии предполагается векторный формат представления картографических данных на разрезе.

Независимо от окончательного оформления геологического разреза для 3-мерного моделирования необходим один специальный тематический слой этой модели — геологическое зонирование.

Основные требования к этому слою следующие.

Слой геологического зонирования содержит *топологически корректное разбиение* на 2-мерные области, каждая из которых соответствует пересечению геологического тела модели с вертикальной поверхностью разреза. Топологическая корректность означает, что любые 2 области не имеют пересечений по внутренним точкам, могут иметь только общие границы, на которых имеет

место поточечное совпадение линий, и отсутствуют незаполненные места между областями.

Обязательные атрибуты объектов слоя геологического зонирования:

- уникальный внутренний системный идентификатор объекта;
- код объекта по классификатору модели;
- номер геологического тела в модели (заполняется в процессе составления модели).

Прочие атрибуты объектов этого слоя могут задаваться произвольно в соответствии с информационными потребностями составления и оформления модели.

В дальнейшем авторы предполагают выполнение следующих требований общего положения на каждом слое геологического зонирования.

1. Граница каждой области на слое состоит из объединения кровли (верхняя граница) и подошвы (нижняя граница). Для каждой области ее кровля и подошва могут быть представлены как линии графиков однозначной функции от координаты  $X$ , т.е. область не содержит складок. Вертикальные границы областей допускаются только на краях разреза.

2. В каждой точке пересечения границ могут сходиться максимум 3 границы и, следовательно, максимум 3 области.

3. Для любой области крайние слева и справа точки ее границы не попадают ни на колонку скважины на разрезе, ни в точку пересечения разрезов.

4. Слои геологического зонирования пересекающихся разрезов должны быть согласованы в точке пересечения.

Так же как и в случае пересечений разрезов, требования общего положения не обременительны, могут быть легко соблюдены при составлении разрезов и обеспечивают эффективность обработки информации в процессе составления модели. При обнаружении нарушений соблюдение требований общего положения может быть обеспечено посредством незначительного локального изменения чертежа. Обязательность несоблюдения требования общего положения (например, обязательность пересечения 4 границ в одной точке) означала бы наличие некоторого дополнительного содержательного условия на геологическое строение. В реальных примерах авторам не приходилось встречать подобные ситуации.

Наличие слоя геологического зонирования с перечисленными выше свойствами есть одно из требований к базе данных модели.

На каждом разрезе слой геологического зонирования в силу топологической корректности определяет слой геологических границ, состоящий из линейных объектов, каждый из которых соответствует границе между двумя геологическими телами. Обязательные атрибуты объектов слоя геологических границ:

- уникальный внутренний системный идентификатор объекта;
- код вышележащего геологического тела по классификатору модели;
- номер вышележащего геологического тела в модели (заполняется в процессе составления модели);
- код нижележащего геологического тела по классификатору модели;
- номер нижележащего геологического тела в модели (заполняется в процессе составления модели).

Объединение слоев геологических границ с разных разрезов образует вложенный в 3-мерное пространство *граф геологических границ*. Ребра этого графа наследуют атрибуты соответствующих границ с разрезов. В дальнейшем граф геологических границ используется для оконтуривания проекций геологических тел в плане и получения исходных данных для интерполяции поверхностей.

Технологические средства, обеспечивающие эффективное составление тематического слоя геологического зонирования и проведение необходимых проверок данных, описаны в [4].

## 5. Использование других источников данных

В методическом отношении составление геологических разрезов как в 2-мерной, так и 3-мерной картографии есть подготовка вспомогательных картографических материалов. При их подготовке, в свою очередь, могут использоваться разнообразные исходные данные: топографические, геологические, гидрогеологические и другие тематические карты, данные (колонки скважин и геологические разрезы) предыдущих изысканий, геофизические профили и др. Все эти данные должны быть согласованы между собой с учетом масштаба модели, т.е. применяемого уровня генерализации. В частности, абсолютно точное соответствие проведенных геологических границ и высотных отметок слоев скважин не является обязательным, с одной стороны, ввиду генерализации, с другой — из-за возможных ошибок и неточностей в описаниях скважин. Аналогичные соображения действуют в отношении данных геологического зонирования и погребенного рельефа, снятых с геологических карт.

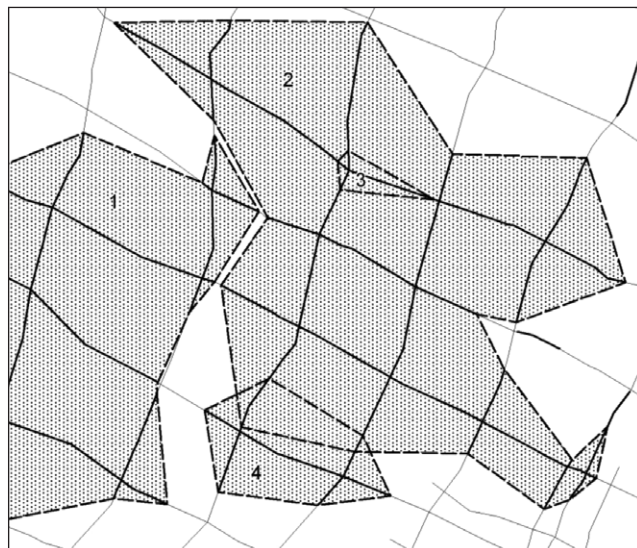


Рис. 2. Наброски границ залегающих геологических тел (среднезернистый песок flst-dns). Пояснения в тексте.

Например, при составлении модели АБТ пришлось согласовывать данные на разрезах с гидрогеологической картой: на карте показан надморенный водоносный горизонт, однако наличие морены не подтверждается данными скважин.

## 6. Определение контуров проекций геологических тел в плане

В предлагаемой модели рассматриваются геологические тела как связная часть пространства, ограниченная замкнутой наружной поверхностью или гранью; множество плоских граней определяет множество вершин и ребер геометрического тела. Предполагаем, что каждое геологическое тело *связно*, тогда и его проекция на план тоже будет *связна*. При переходе к рассмотрению связного графа, т.е. графа, в котором содержится ровно одна компонента связности, принимается, что между любой парой вершин этого графа существует как минимум одна связь (ребро).

Для заданной позиции классификатора рассмотрим в 3-мерном графе геологических границ ребра, которые служат основаниями (или подошвами) соответствующих геологических тел. Это множество вершин и ребер разбивается на связные компоненты. Каждая компонента принадлежит ровно одному геологическому телу. Вообще говоря, одному геологическому телу могут принадлежать несколько компонент.

Проекции компонент подошв на план могут использоваться в качестве исходной информации для построения границ проекций геологических тел.

Применяемое в ИГЭ РАН программное обеспечение позволяет построить в качестве предвари-

тельного наброска многоугольник, включающий связную компоненту границы, если эта компонента содержит линии с разных разрезов, и буферную зону, если эта компонента лежит на единственном разрезе. Радиус (ширина) буферной зоны – параметр моделирования. Полученный набросок подлежит редактированию составителем модели посредством стандартных средств картографического редактора.

При составлении наброска предполагается, что каждое геологическое тело соответствует ровно одной связной компоненте множества подошв на разрезах. Вопрос о том, можно ли считать это разбиение на геологические тела окончательным или необходимо дополнительное объединение некоторых геологических тел, относится к компетенции составителя модели. В значительной степени его решение зависит от качества выбранной сетки разрезов.

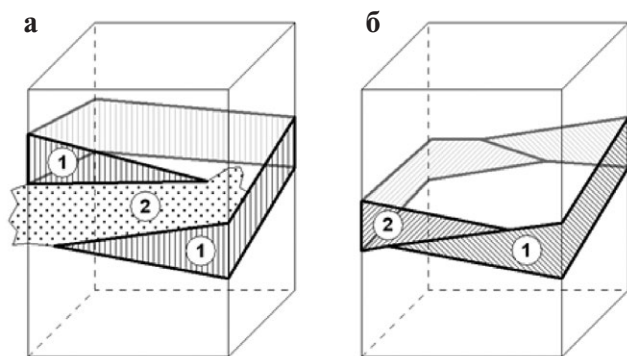
Границы геологических тел, построенные на этом этапе, могут перекрываться. Это соответствует ситуации, когда литолого-стратиграфические тела, относящиеся к одной позиции классификатора, залегают одно над другим, что особенно часто бывает в четвертичных отложениях.

Типичный пример приведен на рис. 2. Показаны наброски границ 4 геологических тел типа «среднезернистый песок возраста “flst-dns”»; остальные тела для этого литолого-стратиграфического подразделения не показаны. Согласно расположению на разрезах, тело 3 залегает выше тела 2, которое залегает выше тела 4. Правильность предложенной схемы, равно как и уточнение границ в наброске, подлежит дополнительному анализу. В данном случае возникает вопрос о правильности деления тел 1 и 2. Однако рассмотрение конкретного решения этих задач не входит в сферу интересов настоящей статьи: авторы описывают лишь информационную технологию, а не методологию решения геологических задач, возникающих при составлении модели.

В результате выполнения этого шага составления 3-мерной модели формируется перечень геологических тел и тематический слой контуров проекций их границ на план. Номера геологических тел в перечне заносятся как атрибуты в слой геологического зонирования, геологических границ и граф геологических границ.

## 7. Определение порядка следования геологических тел

Для определения последовательности следования геологических тел формируется *ориентированный граф G модели*. Вершины графа соответствуют выделенным на предыдущем шаге геологическим



**Рис. 3.** Ориентированные циклы в графе модели: *а* – слой лежит поверх себя; *б* – кольцо из двух слоев. Пояснения в тексте.

телам. Каждой границе между двумя геологическими телами на каждом разрезе сопоставляется направленное ребро, исходящее из вершины, соответствующей нижнему геологическому телу, в вершину, соответствующую верхнему геологическому телу.

*Напомним, что топологической сортировкой ориентированного графа называется такое упорядочение его вершин, при котором для любого ребра, направленного из вершины *A* в вершину *B*, номер вершины *A* меньше номера вершины *B*. Нетрудно видеть, что задача определения последовательности геологических тел есть в точности задача топологической сортировки графа *G*.*

Известные алгоритмы решения этой задачи (см., например, [3]) либо выполняют топологическую сортировку заданного графа, либо находят ориентированный цикл в этом графе. Наличие ориентированного цикла в графе модели означает, что построенный на этапах 1-6 набор данных для построения поверхностей кровли не может быть непосредственно использован и требует уточнения.

Типичные примеры ориентированных циклов приведены на рис. 3. Грани призм соответствуют плоскостям геологических разрезов. Показаны только слои, входящие в ориентированный цикл.

При обходе вокруг призмы имеет место ориентированный цикл (1 → 2 → 1).

На рис. 3*а* слой 1 залегает поверх самого себя. На рис. 3*б* на передней грани призмы слой 2 лежит поверх слоя 1, а на задней грани слой 1 лежит поверх слоя 2.

Нетрудно дополнить изображение на каждой грани призмы до корректного геологического разреза, однако для распространения геологической структуры внутрь призмы требуется дополнительная информация. Возможные чисто геометрические варианты разрешения такой ситуации априори не имеют геологического обоснования.

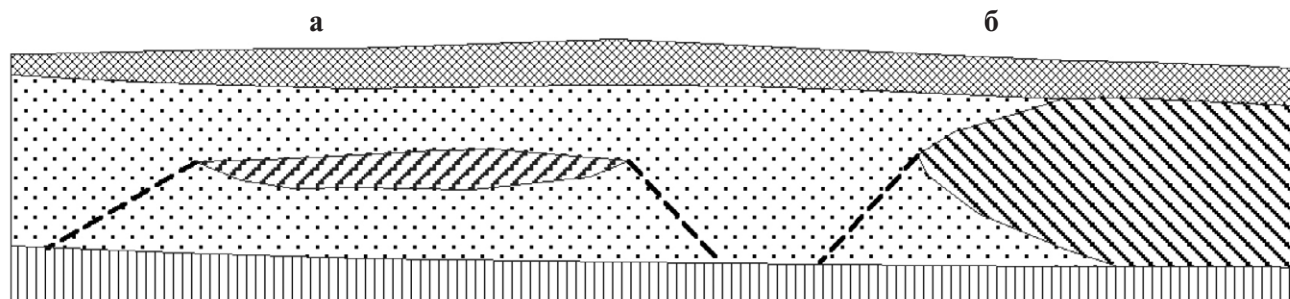
Требование отсутствия ориентированных циклов в графе модели – интересный пример нелокального согласования геологических разрезов. Известные до сих пор требования согласования относятся к точкам пересечения линий разрезов, т.е. являются локальными.

Используемое в ИГЭ РАН программное обеспечение выполняет топологическую сортировку графа модели или находит ориентированный цикл и предъявляет его для дальнейшего анализа.

## 8. Обработка линз и складок

Если на геологическом разрезе имеются складки в понимании Н. Whitney [14] (рис. 4*б*), то условие 1 п. 4 (составление геологических разрезов) нарушено. Типичная ситуация возникает, когда на разрезе прослойки одних отложений лежат целиком внутри другого типа отложений – линзы, см. рис. 4*а*. Если попробовать выделить поверхности кровли и подошвы линзы, то получится ориентированный цикл в графе модели.

Отметим, что описанная выше структура данных модели не требует, чтобы граничащие геологические тела имели разные индексы по классификатору. Поэтому на разрезе можно ввести дополнительное подразделение объемлющего линзу геологического тела (и аналогично для складок, не оформленных в линзу) пунктирными



**Рис. 4.** Исключение складок на геологическом разрезе.



линиями, после чего все требования к отображению геологических тел на разрезе будут выполнены. Разумеется, эти дополнительные границы должны быть согласованы с данными на пересекающихся разрезах. Эта процедура увеличивает количество геологических тел в модели, но дальнейшее построение модели, в частности топологическая сортировка графа модели, не претерпевает изменений.

### 9. Интерполяция поверхностей кровли геологических тел

В геоинформационных системах применяются 2 основных способа задания 2-мерной поверхности графика функции в 3-мерном пространстве.

1. Явное задание функции  $Z=f(x,y)$ . Кроме плоских поверхностей, этот способ включает сплайн-интерполяции: область определения разбивается на несколько областей, в каждой из которых задается своя функция, причем эти функции должны быть определенным образом согласованы на общих границах. Частный случай этого способа – интерполяция поверхности на основе триангуляции Делоне [10].

2. Задание поверхности значениями функции на равномерной сетке (grid-формат).

В 3-мерном моделировании можно использовать оба эти формата в зависимости от характера решаемых задач.

Задача выбора «правильного» алгоритма интерполяции не является чисто математической, а относится к «правильности» моделирования. Выбранный математический метод должен быть адекватен геологической ситуации и иметь содержательное геологическое обоснование. Зачастую геологическое обоснование подменяется ссылками на корректность математического метода, что приводит к необоснованным решениям.

Применение интерполяции призвано осуществить компромисс между затратами на получение дополнительной информации (восстановление 3-мерной картины по немногим исходным данным) и степенью достоверности результата с точки зрения составителя модели. Если исходная информация задана с достаточной плотностью, то различные алгоритмы интерполяции дают практически одинаковые результаты, и проведение необходимых расчетов становится чисто технической операцией.

Технология предусматривает точечную интерполяцию кровли очередного геологического тела. Исходная информация включает следующие составляющие:

- область в плане, в которой выполняется интерполяция;
- высотные отметки в точках на границе области интерполяции рассчитываются как наивысшие отметки уже построенных поверхностей кровель;
- высотные отметки в точках на линиях разрезов;
- высотные отметки в изолированных точках (в скважинах, не находящихся на линиях разрезов, и т. п.).

Для того чтобы построенная поверхность совпадала с ее сечениями, построенными на разрезах и вдоль границы области интерполяции, расстояния между соседними точками на соответствующих линиях должны быть существенно меньше, чем между остальными точками.

В процессе интерполяции возможно возникновение артефактов: в результате выполнения формальных математических вычислений построенная поверхность кровли очередного геологического тела может оказаться ниже построенной ранее поверхности его подошвы. Для некоторых алгоритмов интерполяции отсутствие артефактов может быть строго доказано, в остальных случаях необходимы дополнительные проверки.

Для сложных моделей количество геологических тел может исчисляться сотнями, поэтому технологически целесообразно минимизировать вмешательство специалиста (выбор параметров, проверка результатов) в вычислительный процесс.

В модели АБТ было выделено около 450 геологических тел.

В наиболее часто употребляемых программных средствах реализованы следующие математические методы точечной интерполяции.

1. Интерполяция на основе триангуляции Делоне [10]. Основной недостаток – существенная зависимость результата от конфигурации исходных точек.

2. Геостатистические алгоритмы [2]. Необходимо геологическое обоснование возможности интерпретации поверхности кровли геологического тела как реализации некоего случайного процесса, а также процедуры определения параметров этого процесса.

3. Нахождение поверхности с минимальными уклонами или кривизнами [11]. Необходимо выбрать оптимальную целевую функцию (взвешенную комбинацию нескольких параметров).

В ИГЭ РАН применяется интерполяция на основе триангуляции Делоне.

## 10. Экспорт данных для математического моделирования

Построенная 3-мерная геометрическая модель в результате выполнения шагов 1-9 дает ответ на один из основных вопросов типовой геoinформационной системы: что (какое геологическое тело) находится в данной точке пространства. Действительно, для точки с координатами  $(X, Y, Z)$  достаточно просмотреть поверхности кровли геологических тел, залегающих над точкой  $(X, Y)$  в плане [построить виртуальную скважину в точке  $(X, Y)$ ] и выбрать то из них, для которого отметка  $Z$  лежит между отметками подошвы и кровли.

Многие программные средства для выполнения геотехнических, гидрогеологических, геофизических расчетов требуют в качестве исходной информации данные в узлах равномерной 3-мерной сетки (3d-grid формат). Соответствующий экспорт в этот формат выполняется по одному из следующих алгоритмов:

- определяется, какое геологическое тело содержит данную точку, и передается значение нужного параметра из классификатора модели.
- находятся значения необходимого параметра в окрестности данной точки, и вычисляется среднее по окрестности значение параметра; алгоритм усреднения и размеры окрестности зависят от постановки задачи.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемые методы 3-мерного моделирования позволяют перейти от стратиграфического к литолого-стратиграфическому принципу выделения геологических тел на основе класса геометрических геологических моделей как модификации модели «слоеного пирога». Впервые предлагается на основе построения ориентированного графа геологических границ в модели реализовать итерационный процесс определения последовательности залегания геологических тел и связанных с ними дополнительных проверок исходных данных, обработок складок и линз.

Описанные в статье методы 3-мерного моделирования были опробованы при решении практических задач. Подробное описание методов и проблем, возникающих при их использовании, должно послужить основой для дальнейшего научно-методологического анализа, совершенствования методики, алгоритмов и программного обеспечения. Детальность описания должна быть использована при определении границ применения этого способа моделирования и постановке новых содержательных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батрак Г.И., Костикова И.А., Позднякова И.А., Карфидова Е.А., Томс Л.С. Сложности и перспективы гидрогеологического обоснования дренажа в тоннелях глубокого заложения (на примере Алабяно-Балтийского тоннеля в Москве) // Сергеевские чтения. Вып.18. М.: РУДН, 2016. С. 454-459.
2. Демьянов В.В. Савельева Е.А. Геостатистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010. 328 с.
3. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Топологическая сортировка // Алгоритмы: построение и анализ / Под ред. И.В. Красикова. 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. С. 632-635.
4. Мионов О.К. Геоинформационные технологии для составления крупномасштабных геологических карт территории Москвы // Геоэкология. 2011. №3. С. 200-216.
5. Мионов О.К. Применение 3-мерного моделирования для гидрогеологических задач // Сергеевские чтения. Вып. 18. М.: РУДН, 2016. С. 657-660.
6. Мионов О.К. Трехмерная модель дочетвертичных отложений на территории Москвы // Сергеевские чтения. Вып.17. М.: РУДН, 2015. С. 51-56.
7. Мионов О.К., Викторов А.А., Фесель К.И. О проблемах ведения баз данных фондовой информации // Геоэкология. 2011. №5. С. 455-464.
8. Мионов О.К., Пикулик Е.А., Фесель К.И. О понятии трехмерной геологической карты // Геодезия и картография. 2011. №6. С. 36-41.
9. Позднякова И.А., Галицкая И.В., Мионов О.К., Костикова И.А., Дорожко А.Л., Батрак Г.И., Матвеева Л.А., Фесель К.И. Выявление гидрогеологических окон на основе крупномасштабного картирования геологического строения и гидрогеологических условий территории г. Москвы // Геоэкология. 2015. №4. С. 352-364.
10. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применения. Томск: Изд-во Томского университета, 2002. 128 с.
11. Mallet J-L. Discrete Smooth Interpolation // ACM Transactions on Graphics. 1989. V. 8. Is. 2. P. 121-144.
12. Mathers S., Kessler H., Sobisch H.-G. 3D geological modelling at the British Geological Survey using the GS13D software and methodology (extended abstracts) // Proc. of EUREGEO 2009. Munich, Germany, 9-12 June 2009. Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umwelt. P. 82-84.
13. Turner A.K., Kessler H. Challenges with applying geological modelling for infrastructure design // Proc. of the 17<sup>th</sup> annual conference of the International Association for Mathematical Geosciences (IAMG 2015) Freiberg, Germany, September 5-13, 2015 P. 49-58.
14. Whitney H. On singularities of mappings of Euclidean spaces // Annals of Mathematics. 1955. V. 62. P. 374-410.

## REFERENCES

1. Batrak, G.I., Kostikova, I.A., Pozdnyakova, I.A., Karfidova, E.A., Toms, L.S. Difficulties and prospects of hydrogeological substantiation of drainage in tunnels of deep laying (by the example of the Alabian-Baltic tunnel in Moscow). *Sergeevskie chteniya, vyp. 18* [Proc. 18<sup>th</sup> Conference in commemoration of academician E.M. Sergeev]. Moscow, RUDN Publ., 2016, pp. 454-459 (in Russian)
2. Dem'yanov, V.V., Savel'eva, E.A. *Geostatistika. Teoriya i praktika* [Geostatistics. Theory and practice], Moscow, Nauka Publ., 2010, 328 pp. (in Russian)
3. Kormen, T., Leisserson, Ch., Rivest, R., Stein, K. Topological sorting. Algorithms: construction and analysis, Krasikova I.V., Ed., Moscow, Williams, 2<sup>nd</sup> edition, 2005, pp. 632-635. (in Russian)
4. Mironov, O.K. Geoinformation technologies for compiling large-scale geological maps of the territory of Moscow. *Geokologiya*, 2011, no. 3, pp. 200-216. (in Russian)
5. Mironov, O.K. Application of 3-dimensional modeling for hydrogeological problems. *Sergeevskie chteniya, vyp. 18* [Proc. 18<sup>th</sup> Conference in commemoration of academician E.M. Sergeev]. Moscow, RUDN Publ., 2016, pp. 657-660 (in Russian)
6. Mironov, O.K. A three-dimensional model of Pre-Quaternary sediments on the territory of Moscow. *Sergeevskie chteniya, vyp. 17* [Proc. 17<sup>th</sup> Conference in commemoration of academician E.M. Sergeev]. Moscow, RUDN Publ., 2015, pp. 51-56. (in Russian)
7. Mironov, O.K., Viktorov, A.A., Fesel, K.I. On the problems of maintaining the databases of stock information. *Geokologiya*, 2011, no. 5, pp. 455-464. (in Russian)
8. Mironov, O.K., Pikulik, E.A., Fesel, K.I. About the concept of a three-dimensional geological map. *Geodeziya i kartografiya*, 2011, no. 6, pp. 36-41. (in Russian)
9. Pozdnyakova, I.A., Galitskaya, I.V., Mironov, O.K., Kostikova, I.A., Dorozhko, A.L., Batrak, G.I., Matveeva, L.A., Fesel, K.I. Identification of hydrogeological windows on the basis of large-scale mapping of the geological structure and hydrogeological conditions of the Moscow territory. *Geokologiya*, 2015, no. 4, pp. 352-364. (in Russian)
10. Skvortsov, A.V. *Triangulyatsiya Delone i ee promeneniya* [Delaunay triangulation and its applications]. Tomsk. Tomsk Univ. Publ., 2002. 128 pp. (in Russian)
11. Mallet, J-L. Discrete Smooth Interpolation. *ACM Transactions on Graphics*, 1989, vol. 8, no. 2, pp. 121-144.
12. Mathers, S., Kessler, H., Sobisch, H.-G. 3D geological modeling at the British Geological Survey using the GS13D software and methodology (extended abstracts). EUREGEO 2009: European congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Munich, Germany, 9-12 June 2009. Augsburg, Bayerisches Landesamt fur Umwelt, pp. 82-84.
13. Turner, A.K., Kessler, H. Challenges with applying geological modelling for infrastructure design. Proc. 17<sup>th</sup> Annual Conference of Mathematical Geosciences (IAMG 2015), Freiberg, Germany, Sept. 5-13, 2015 pp. 49-58
14. Whitney, H. On singularities of mappings of Euclidean spaces, I. *Ann. of Math.*, 1955, v. 62, pp. 374-410.

## THE POSSIBILITIES OF THE GEOLOGICAL BORDER ORIENTED GRAPH AT FORMAL DESCRIPTION OF 3-DIMENSIONAL LARGE-SCALE GEOLOGICAL MODEL

**O. K. Mironov**, E. A. Karfidova, V. B. Svalova

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,*

*Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

*E-mail: e.karfidova@yandex.ru*

The article deals with the present state of the formalized description of a 3-dimensional geological model with the consideration of the problems arising from the increase in scale and the transition from the geological bodies distinguished by stratigraphic principle to those identified by lithology-stratigraphic and engineering-geological divisions. An approach to solving these problems is proposed. It is shown that the problem of correctly determining the sequence of occurrence of lithological-stratigraphic subdivisions can be solved as a problem of topological sorting of vertices of an oriented graph. For the first time, the requirements for non-local alignment of geological sections are set.

**Keywords:** 3-dimensional geological modelling, geological profiles, well database, oriented graph, topological selected order

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019170-80>