

УДК 622.2:004.94

© Л.Н. Бурмин, Ю.А. Степанов

Л.Н. Бурмин, Ю.А. Степанов

# ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-АТТРИБУТИВНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Введение

При ведении горных работ необходимо анализировать большой объем данных для решения ряда задач, таких, как определение экономической эффективности ведения горных работ, построение горно-технических систем для разработки месторождений, оценка уровня безопасности ведения горных работ и т.п. Проведение анализа взаимообусловленных разнородных факторов, влияющих на состояние углепородного массива, ослабленного сложными по геометрии и топологии выработками и испытывающего воздействие со стороны технологического оборудования, позволит повысить качество ведения горных пород.

Для наглядного представления динамических процессов, протекающих в горных породах, представленных в виде атрибутивных данных, описывающих качественные свойства пород, целесообразно применять картографические изображения, связывая атрибутивные данные с пространственными. Поскольку при ведении горных работ используются не только картографические изображения в виде географических карт, но и различные топологические планы, то целесообразно соотносить друг с другом несколько видов картографических изображений, поскольку расстояние на географической карте может не соответствовать расстоянию внутри шахты в связи с варьирующимся углом падения пласта. В этом контексте управление массивом атрибутивно-пространственных данных предлагается выполнять в несколько последовательных этапов:

- хранение атрибутивно-пространственных данных;
- установление связей атрибутивных и пространственных данных с одним объектом;
- конвертация между координатами географической карты и координатами топологического плана.

Эта последовательность этапов способствует повышению качества управления информационными процессами: поиском, хранением, передачей, обработкой, использованием. Каждый этап имеет несколько возможных решений и требует отдельного внимания,

в связи с этим последовательно рассмотрим каждый из них.

## 1. Хранение атрибутивно-пространственных данных

Проблема хранения атрибутивно-пространственных данных связана с тем, что количество атрибутивных данных несоизмеримо больше, чем пространственных. Это говорит о необходимости применения специализированных технологий, позволяющих не только хранить данные, но и предоставлять возможность для аналитической обработки: пространственный поиск, сравнительный анализ, выявление скрытых зависимостей и т.д. Лучше всего для этой цели подходят реляционные базы данных. Однако поскольку основной упор сделан на использование пространственных, то целесообразно использовать системы управления базами данных, которые изначально предоставляют структуру для хранения геометрии объектов, связывают точки полигонов с географическими координатами и имеют возможность пространственного поиска. Наиболее популярным решением в данной области является PostGIS. Объекты ГИС, поддерживаемые PostGIS, являются надмножествами «Simple Features», определенных Консорциумом OpenGIS (OGC). Начиная с версии 0.9, PostGIS поддерживает все объекты и функции, определенные OGC в спецификации «Simple Features SQL». Спецификация «Simple Features Specification for SQL» OpenGIS определяет стандартные типы объектов ГИС, функции для манипуляции ими и набор таблиц метаданных. В целях сохранения корректности метаданных такие операции, как создание и удаление столбцов с пространственными данными, осуществляются с помощью специальных процедур, определенных OpenGIS [1]. Существуют две таблицы метаданных OpenGIS: SPATIAL\_REF\_SYS и GEOMETRY\_COLUMNS. Таблица SPATIAL\_REF\_SYS содержит числовые ID и текстовые описания систем координат, используемых в пространственной базе данных. Таблица GEOMETRY\_COLUMNS хранит информацию о таблицах базы данных, содержащих пространственную информацию.

Таблица SPATIAL\_REF\_SYS определяется следующим образом:

```
CREATE TABLE spatial_ref_sys (
  srid          INTEGER NOT NULL PRIMARY KEY,
  auth_name     VARCHAR(256),
  auth_srid     INTEGER,
  srtext        VARCHAR(2048),
  proj4text     VARCHAR(2048)
)
```

SRID – уникальный идентификатор системы координат (Spatial Referencing System, SRS) в пределах базы данных.

AUTH\_NAME – название стандарта или стандартизирующей организации, являющейся источником информации о данной системе координат. Например, правильным значением AUTH\_NAME будет «EPSG».

AUTH\_SRID – идентификатор системы координат, так как он определяется организацией указанной в AUTH\_NAME. В случае EPSG, это должен быть код проекции EPSG.

SRTEXT – WKT представление системы координат. Пример WKT SRS представления:

```
PROJCS [«NAD83 / UTM Zone 10N»,
  GEOGCS [«NAD83»,
    DATUM [«North_American_Datum_1983»,
      SPHEROID [«GRS 1980», 6378137, 298.257222101]
    ],
    PRIMEM [«Greenwich»,0],
    UNIT [«degree»,0.0174532925199433]
  ],
  PROJECTION [«Transverse_Mercator»,],
  PARAMETER [«latitude_of_origin»,0],
  PARAMETER [«central_meridian»,-123],
  PARAMETER [«scale_factor»,0.9996],
  PARAMETER [«false_easting»,500000],
  PARAMETER [«false_northing»,0],
  UNIT [«metre»,1]
]
```

PROJ4TEXT содержит строку определение координат Proj4 для данного SRID. PostGIS использует библиотеку Proj4 для преобразований систем координат.

Таблица GEOMETRY\_COLUMNS определяется следующим образом:

```
CREATE TABLE geometry_columns (
  f_table_catalog  VARCHAR(256) NOT NULL,
  f_table_schema   VARCHAR(256) NOT NULL,
  f_table_name     VARCHAR(256) NOT NULL,
  f_geometry_column VARCHAR(256) NOT NULL,
  coord_dimension  INTEGER NOT NULL,
  srid             INTEGER NOT NULL,
  type            VARCHAR(30) NOT NULL
)
```

Она имеет следующие столбцы:

F\_TABLE\_CATALOG, F\_TABLE\_SCHEMA, F\_TABLE\_NAME – все составляющие имени таблицы, содержащей столбец геометрии.

F\_GEOMETRY\_COLUMN – имя столбца геометрии в таблице объектов.

COORD\_DIMENSION – пространственная размерность столбца (2, 3 или 4 измерения).

SRID – идентификатор системы координат, используемой для геометрии в этой таблице. Он является внешним ключом для таблицы SPATIAL\_REF\_SYS.

TYPE – тип пространственного объекта (POINT, LINESTRING, POLYGON и др.).

Описанная структура данных предоставляет широкий спектр возможностей для хранения пространственных данных – это позволяет подробно описывать геометрию и хранить географические координаты в наиболее удобном для работы формате.

## 2. Установление связей атрибутивных и пространственных данных с одним объектом

Предлагаемую технологию PostGIS необходимо адаптировать под нужды решения поставленных задач, а именно – соотнесения атрибутивных данных с пространственными. Для этого необходимо выделить элементарные пространственные частицы. В связи с неоднородностью объектов, используемых на шахтах угольных предприятий, будет несколько видов таких элементарных частиц:

- Конечный элемент горного массива – шестигранник, который хранит свойства о породе: название породы, физические, химические и геомеханические свойства.
- Ветвь выработки – вытянутый шестигранник, соответствует габаритам выработки в шахте. Каждая выработка носит имя, номер и пространственные значения габаритов.
- Разведочная скважина – вытянутый шестигранник, представляющий собой контейнерный тип для конечных элементов горного массива. Моделируется на основании сведений о геологической разведке.

Стоит отметить характеристику высоты. Поскольку глубину разведочной скважины вычисляют от устья, а не от уровня моря, данная характеристика будет атрибутивной. Сведения о выработках, в свою очередь, включают в себя значения глубины относительно уровня моря. Это следует учитывать при соотнесении данных об углепородном массиве с данными о подземной части угледобывающего предприятия. Проблема здесь заключается в том, что в связи с неоднородностью рельефа высота от устья не может быть однозначно для всех случаев соотнесена с высотой относительно уровня моря. В связи с этим в некоторых случаях целесообразно хранить оба атрибута для разведочных скважин: высоту устья относительно уровня моря и глубину

скважины, – это позволит избежать несоответствия при вычислении глубины.

После создания метаданных для определения пространственных данных необходимо составить схему для хранения атрибутивных характеристик. Для этого будут использоваться дополнительные таблицы, связанные с таблицами пространственных данных через отношения, традиционно применяемые в реляционных базах данных, посредством создания внешнего ключа, представляющего собой ссылку на связанную запись другой таблицы. Предлагаемая структура атрибутивной части базы данных представлена на рис. 1 в виде ER-диаграммы.

База данных создается на принципах хранилища баз данных – это говорит о том, что данные, попадая в базу, получают хронологический маркер и никогда не удаляются из нее. Это позволяет проводить аналитические исследования динамики изменений, происходящих при работе с базой данных, а также отслеживать ошибки, происходящие по причине человеческого фактора за счет логирования изменений метаданных.

### 3. Конвертация между координатами географической карты и координатами топологического плана

При отображении пространственных данных на географической карте необходимо учитывать тот

факт, что топологическая карта плана и географическая карта местности не соответствуют друг другу при параллельном переносе, так как необходимо учитывать угол по падению и по простиранию пласта. Измерение координат изначально происходит в двух «пространствах». Первое пространство представляет собой поверхность земли. Оно измеряется при помощи системы геодезических координат – широты и долготы. Второе пространство – топологический план выработок – использует локальные прямоугольные координаты, не связанные с географической широтой и глубиной. Данное несоответствие играет важную роль при вычислении времени и расстояния, которое необходимо пройти шахтеру в случае необходимости в эвакуации при ведении аварийно-спасательных работ. Шлем шахтера снабжен датчиком GPS-навигации, который считывает геодезические координаты и позволяет визуализировать его расположение относительно географической карты, однако напрямую соотносить эти данные нельзя, поскольку координаты карты не соответствуют координатам топологического плана (рис. 2).

В связи с этим разработана методика, позволяющая преобразовывать геодезические координаты в прямоугольные координаты топологического плана. Предлагаемая методика состоит из двух этапов: первый этап – преобразование глобальных

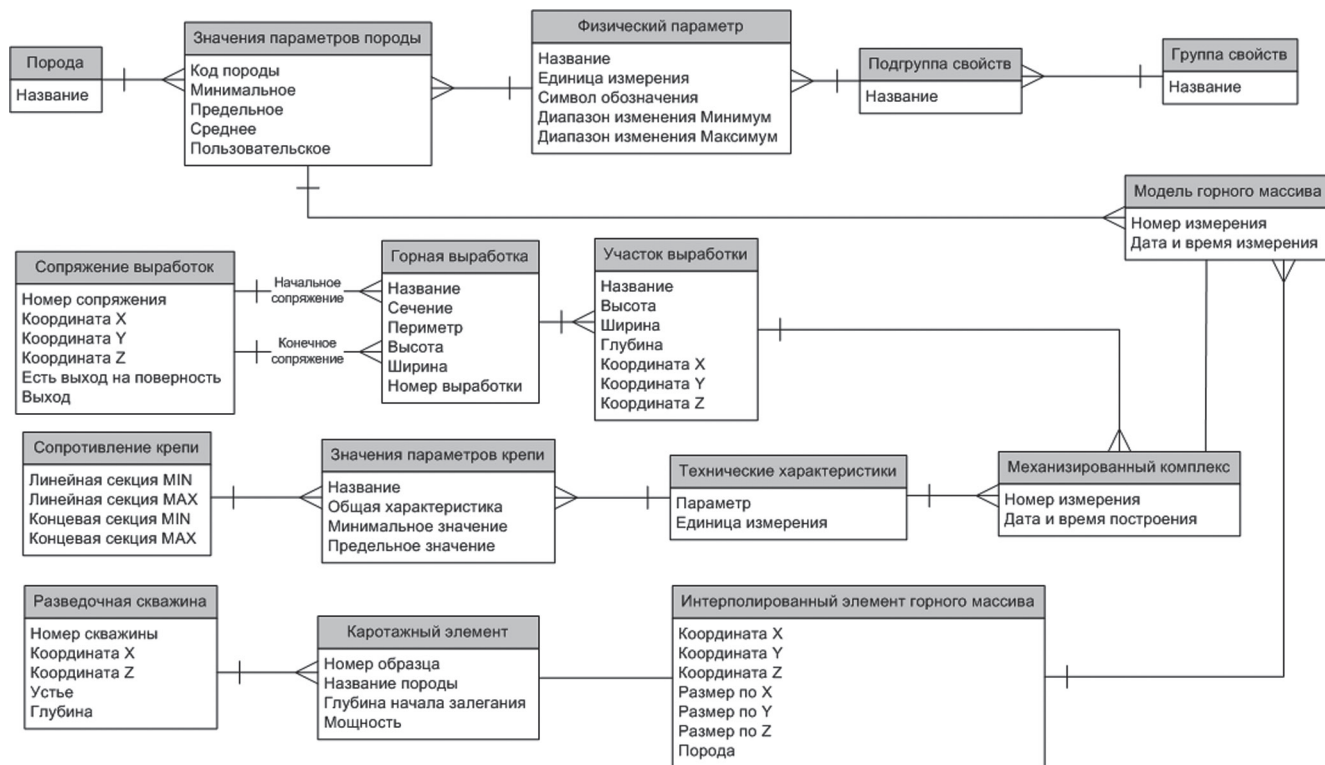


Рис. 1. ER-схема атрибутивной части базы данных

геодезических координат в прямоугольные; второй этап – сопоставление прямоугольных глобальных координат с локальными координатами топологической карты шахты.

Первый этап представляет собой классическую задачу по переводу геодезической системы в инерциальную систему отсчета. Метод преобразования координат для этой цели закреплен в ГОСТе 51794-2008. «Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат» [2].

В ГОСТе подробно представлены алгоритмы для перевода геодезических координат в прямоугольные пространственные координаты и обратно. К примеру, преобразования в прямоугольные пространственные координаты осуществляют по формулам (1):

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [(1 - e^2)N + H] \sin B \end{cases}, \quad (1)$$

где  $X, Y, Z$  – прямоугольные пространственные координаты точки;

$B, L$  – геодезические широта и долгота точки соответственно, рад;

$H$  – геодезическая высота точки, м;

$N$  – радиус кривизны первого вертикала, м;

$e$  – эксцентриситет эллипсоида.

Более подробные сведения о вычислениях можно найти в разделе 5.1 ГОСТ Р 51794-2008.

На втором этапе необходимо привести прямоугольные координаты географической карты к прямоугольным координатам топологического плана. Частично эти проблемы решаются существующими ГИС [3]. Для получения более полного решения предлагается несколько способов преодоления проблемы искажения.

Первый способ – монокоординатный – заключается в преобразовании пространственных данных путем перенесения проекции с плоскости параллельной поверхности земли на плоскость, параллельную простиранию горных выработок в пласте. Это позволит пользоваться одной и той же системой координат для обозначения пространства как внутри шахты, так и на поверхности Земли. Этот способ удобен с точки зрения использования одинаковых единиц измерения в рамках единого пространства, однако при необходимости нахождения расстояния (например, для вычисления времени выхода из шахты) перед основными вычислениями (расстояние между двумя точками) потребуется производить дополнительные вычисления для преобразования каждой точки, участвующей в маршруте. Стоит также отметить, что угол может быть трехмерным, т.е. дополнительно к углу падения может появиться необходимость в учете угла относительно простирания пласта, что также усложняет расчеты [4].

Второй способ – поликоординатный – заключается в построении новой оси координат в плоскости простирания пласта. В этом случае формируется «подземная карта» – новое пространство со своей точкой начала координат и единицами измерения. В этом случае для измерения расстояния внутри горных выработок не подразумевает дополнительных преобразований, что существенно увеличит скорость расчета. Недостатком данного способа является необходимость создания интерфейса между глобальными географическими координатами и координатами пространства шахты. Этот интерфейс представляет собой выражение вида  $S' = f(S)$ , где  $S$  – это географические координаты поверхности, а  $S'$  – координаты области на подземной карте. Функция  $f$  может находиться тремя способами:

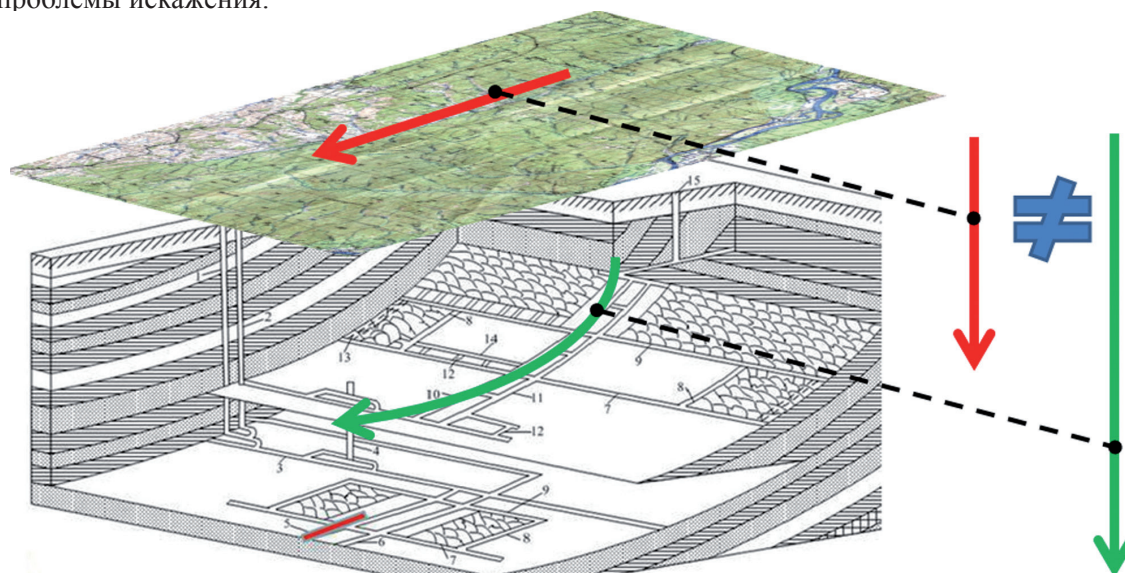


Рис. 2. Несоответствие топологической и географической карты

Аппроксимирующий, аналитический, – в случае, если существует возможность сгладить плоскость пласта с помощью трехмерной функции. В данном случае зависимость между операндами будет функциональной.

Адаптивный, интеллектуальный, – в случае, если трехмерную функцию подобрать сложно либо в принципе невозможно. Из-за сложной конфигурации пласта целесообразно применять технологию обучения на базе архитектуры искусственной нейронной сети. Через нейронную сеть пропускаются данные о конфигурации пласта и соответствующие координатам подземной карты – географические координаты. В результате получится выражение вида:

$$S[x, y, z]' = [w1*S[x], w2*S[y], w3*S[z]], \quad (2)$$

где  $w1, w2, w3$  – подстраиваемые, «адаптирующиеся» коэффициенты. В этом случае зависимость будет стохастической и иметь методическую погрешность [5].

Еще одна проблема, которая возникает в случае применения поликоординатного способа, заключается в неоднородном простирании пласта относительно поверхности. В очень редких случаях плоскость будет соответствовать всему простиранию пласта. Предлагается три варианта решения этой проблемы.

В случае, если отклонение невелико, предлагается строить «медианное пространство» – усредняющую плоскость, аппроксимирующую расположение пласта в пространстве.

В случае, если отклонение некоторых участков таково, что медианное пространство не будет удовлетворять желаемой точности, предлагается строить локальные пространства – разбивать плоскость пласта на несколько участков с монотонным пространственным поведением.

Аналитическое построение криволинейного пространства. Построить математическую модель пласта и описать его части через математические функции. Это позволит повысить точность вычисления расстояния и времени доступа к определенной точке в шахте, однако в аспекте построения трехмерного компьютерного изображения для визуализации данное решение будет сводиться к первому или второму.

Каждый способ решения проблемы сопоставления географических координат с локальными координатами шахты имеет свои преимущества и недостатки. В случае, если не требуется вычислять расстояния внутри горных выработок, пласт имеет монотонную конфигурацию, существует необходимость в построении зон на географической карте,

соответствующих подземным зонам, – рекомендуется использовать монокоординатный способ. В случае, если необходимо постоянно вычислять расстояния или объемы подземного пространства, конфигурация пласта сложна, а возникающая при расчетах погрешность приемлема, – рекомендуется использовать второй способ. В общем случае рекомендуется использовать комбинированный метод – это позволит решать обширную область задач сопоставления глобальных координат с локальными с необходимым уровнем качества.

### Заключение

Предложенная реализация этапов управления информационными процессами объектов горнотехнических систем является фундаментом для проведения обработки и анализа данных. Более того, описанный способ позволяет предоставлять результаты анализа в различной форме, в том числе в виде компьютерного картографического изображения: как с поправкой на географические координаты, так и с поправкой на координаты топологического плана. Предметом анализа могут являться: уровень безопасности ведения горных работ, напряженно-деформированное состояние угленосного массива, поддержка принятия решений при ведении аварийно-спасательных работ.

**Ключевые слова:** атрибутивно-пространственные данные, ГИС, базы данных, картографические изображения, преобразования координат.

### ЛИТЕРАТУРА

1. OpenGIS Simple Features Specification «OpenGIS Project Document 99-049», May 5, 1999. – Open GIS Consortium, Inc.
2. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – Введ. 2008-12-18. – М. : Стандартинформ, 2009. – 19 с.
3. Степанов Ю.А. Структура региональной геоинформационной системы при ведении выемочных работ угледобывающих предприятий / Ю.А. Степанов // Геоинформатика. – 2012. – № 1. – С. 36-41.
4. Степанов Ю.А. Обеспечение информационной поддержки ведения горных работ с использованием ГИС-технологий / Ю.А. Степанов // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 4. – С. 118-122.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская М.Б. Курс физики. – М. : Высшая школа, 1973. – 384 с. [584].