

УДК 622.012 : 681.3.01 : 519.67

**ТЕМПОРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ  
ОБЪЕКТОВ ГОРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**О. В. Наговицын<sup>1</sup>, С. В. Лукичев<sup>2</sup>**

*Горный институт КНЦ РАН,*

E-mail: <sup>1</sup>o.nagovitsyn@ksc.ru, <sup>2</sup>s.lukichev@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Россия

Предлагается концепция моделирования объектов горной технологии, сочетающая технологическое содержание объекта и изменение его состояния в течение жизненного цикла и позволяющая обрабатывать и хранить темпоральные данные цифрового двойника горнодобывающего предприятия. Совокупность таких моделей обеспечивает формирование общей динамической модели, демонстрирующей эволюцию всего комплекса объектов горного производства при разработке месторождений полезных ископаемых. С помощью этого подхода можно применять изменяющиеся во времени и синхронизированные между собой транзакциями в базе данных векторные, триангуляционные и блочные модели объектов горной технологии для описания жизненного цикла отдельных объектов и их совокупностей. Реализация данной концепции поможет решать задачи, связанные с созданием цифрового двойника горнодобывающего предприятия.

*Модель объекта горной технологии, темпоральные данные, карьер, шахта, рудник, горно-геологические информационные системы*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200617

---

Объекты горной технологии (карьеры и отвалы, выработки подземных рудников и шахт) эксплуатируются, как правило, несколько десятков лет и претерпевают изменения на протяжении всего жизненного цикла: увеличивается протяженность выработок и глубина ведения горных работ; уточняется геометрия залегания полезных ископаемых и их качественные показатели; совершенствуются схемы подготовки, выемки и транспортирования горной массы, влияющие на геометрию объектов горной технологии (ОГТ). Для цифровых моделей ОГТ актуален процесс трансформации в течение жизненного цикла. Их совокупность в едином цифровом пространстве становится основным элементом цифрового двойника горного предприятия, несущим информацию о развитии всего комплекса ОГТ при разработке месторождений полезных ископаемых [1–4].

Отслеживание изменений во времени состояния ОГТ необходимо в случае поиска рациональных технологических решений при планировании и проектировании горных работ, что предполагает моделирование различных вариантов развития горных работ с технико-экономической оценкой, представляющих собой модели возможных состояний ОГТ [5]. Для целей полного моделирования жизненного цикла отдельных ОГТ и их совокупности требуется структура данных, хранящая в связанной форме информацию об изменении объекта во времени, что позволит отслеживать историю эволюции ОГТ и анализировать возможные варианты их трансформации.

### ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для моделирования изменений во времени состояния ОГТ необходима его фиксация на дату этих преобразований: создание и корректировка моделей на основе данных геологической разведки для геологической среды и маркшейдерской съемки для ОГТ, а также результатов проектирования и планирования горных работ. Исходя из подхода к моделированию ОГТ, принятого в горно-геологических информационных системах (ГГИС), используется три типа органически взаимосвязанных моделей: векторные, триангуляционные, блочные [6, 7].

Каждый тип модели ГГИС в любой момент фиксации состояния — самостоятельная сущность, так как изменение одной модели не приводит к автоматической коррекции других, хотя они представляют один и тот же объект и должны изменяться синхронно. Это может повлечь серьезные ошибки и требует от пользователя повышенного внимания. Подобные ситуации характерны для геологического моделирования [8], определения границ карьеров [9], планирования последовательности отработки запасов открытым и подземным способом [10–12], проектирования буровзрывных и закладочных работ [13, 14], обработки данных маркшейдерской съемки и др. [15–18].

В результате модели ОГТ, изменяющиеся при трансформации, содержат информацию, которая имеется в предыдущих состояниях модели, из-за чего происходит многократное хранение неизменных частей ОГТ. Например, при ежемесячном пополнении маркшейдерской съемки карьера проводится корректировка только 1–10% всех бровок, линий и точек, задающих геометрию уступов карьерной выемки. Остальные формообразующие структуры остаются неизменными. Попытка решения проблемы назначением даты съемки на точки приводит к тому, что топологически единые линии разрываются на множество фрагментов, которые должны хранить дублирующиеся точки или иметь иную связь. При последующем построении триангуляционной модели необходимо выбрать только актуальные для данной даты съемки точки. Работа по корректировке векторных моделей и последующему изменению связанных с ними триангуляционных и блочных моделей трудоемкая, поэтому проводится для разных типов ОГТ с периодичностью от нескольких дней до нескольких лет (рис. 1). Для снижения объема дублирующих данных и повышения удобства работы с моделями эволюционирующих ОГТ требуется разработка структуры “живой” модели, которая позволяет сохранять историю его изменений со всеми топологическими связями между формообразующими элементами векторной, триангуляционной и блочной моделей.

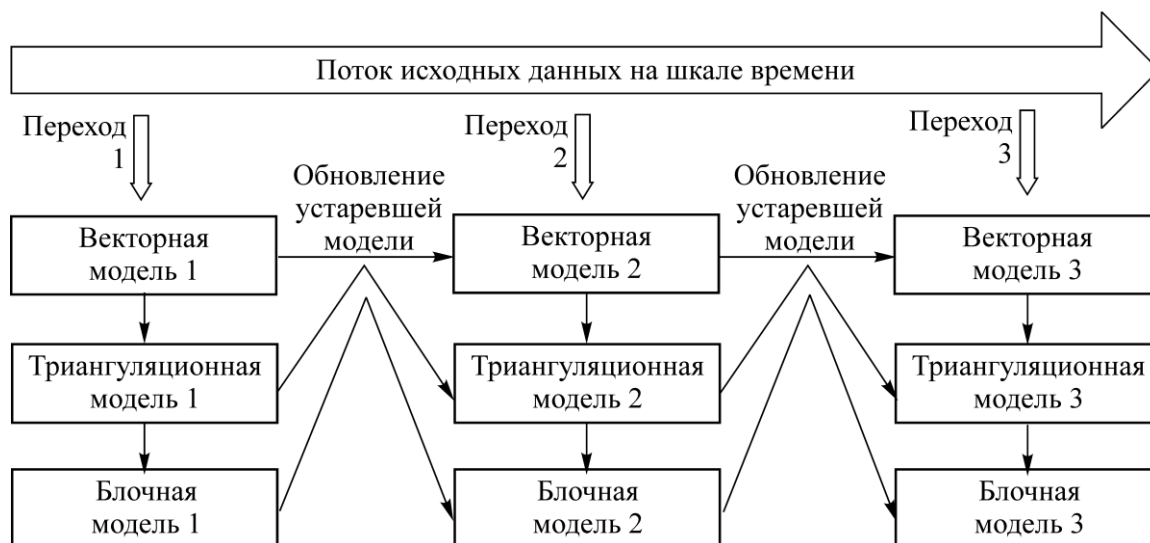


Рис. 1. Связь векторных, триангуляционных и блочных моделей при трансформации

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель ОГТ — это цифровой образ реального или проектируемого объекта, содержащего информацию о его геометрии, свойствах и связях с другими объектами. Важное свойство цифровой модели — возможность визуального представления в виде близкого к изображению реального объекта.

Для передачи свойств ОГТ используется три типа моделей:

— векторная — точки и отрезки, связанные / не связанные между собой отрезками наборов точек;

— триангуляционная — набор треугольных полигонов, узлы которых опираются на точки векторной модели;

— блочная — пространственная ячеистая структура, каждая ячейка которой содержит природные и/или технологические свойства, характеризующие объем внутри нее. Совокупность всех ячеек блочной модели описывает пространственную изменчивость свойств во всем объеме модели.

Точки векторной модели — основа для триангуляционной модели, являющейся оболочкой для формирования блочной модели, которая может быть создана без триангуляционной. В этом случае ее геометрия может задаваться: трехмерными габаритами области построения; интерполяционными алгоритмами, преобразующими пространственные данные в параметры и свойства ячейки блочной модели; векторной моделью, ограничивающей размеры блочной модели регулярным набором замкнутых контуров.

Для создания концепции “живой” модели необходимо обеспечить структурную связь между векторной, триангуляционной и блочной моделями, которая может быть реализована через синхронизацию сделанных в моделях изменений, зафиксированных через параметр (дата и время транзакции) в базе данных (БД) (рис. 2). В традиционном подходе существующих ГГИС такая связь отсутствует, что приводит к росту количества содержащихся файлов, дублированию информации, трудностям упорядочивания и хранения данных. Это влияет на функциональные возможности ГГИС.

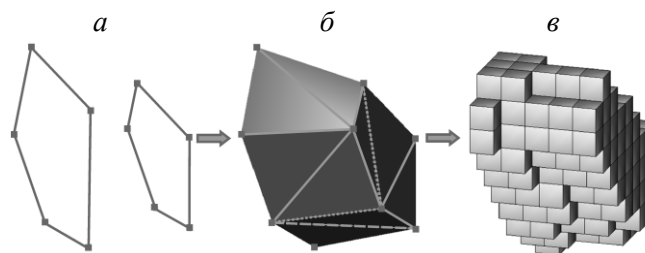


Рис. 2. Модели, формирующие ОГТ: векторная (а), триангуляционная (б), блочная (в)

Необходима организация не только синхронизированного по транзакциям потока данных, отражающего динамику горных работ и влияющего на преобразование всех моделей ОГТ, но и синхронизация потоков векторных, триангуляционных и блочных моделей, локализуемых изменения в каждой модели ОГТ (рис. 3).

Эти потоки представляют собой последовательное изменение свойств модели ОГТ за счет синхронизированного преобразования геометрии и характеристик ее векторной, триангуляционной и блочной моделей. Для реализации такого механизма необходима структура БД, обеспечивающая сохранение в модели объекта всех изменений, подтвержденных транзакцией в БД. Это означает, что любой элемент модели (точка, отрезок, полилиния, полигон, блок, атрибут) сохранится в БД даже в случае удаления. Каждый элемент модели в БД будет представлять со-

бой запись изменений во времени своего состояния. Так как трансформация всех элементов каждой модели синхронизирована, то появляется возможность на любой дискретный момент времени, связанный с транзакцией, получить цифровой образ разных комбинаций моделей с возможностью их отображения вперед и назад по шкале времени. Такая структура БД обеспечивает переход к работе с 4-мерными моделями, где четвертое измерение — это время.

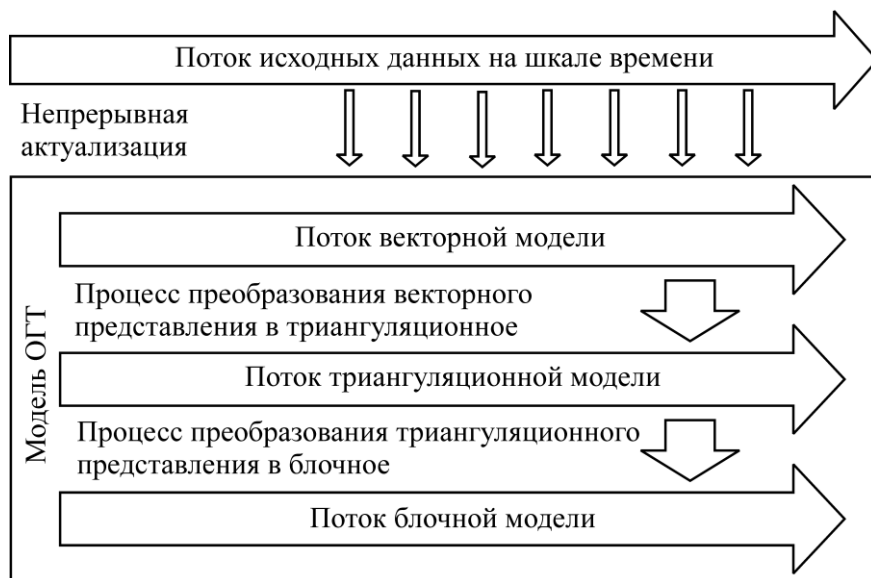


Рис. 3. Взаимодействие векторных, триангуляционных и блочных представлений модели ОГТ

Рассмотрим реализацию пространственно-временной связи ОГТ при изменении модели объекта, начиная от ее векторного представления к триангуляционному и блочному. Часто встречающийся случай векторного представления — набор последовательно связанных друг с другом точек: контур (в отечественной ГГИС MINEFRAME [12]) и стринг (в терминологии иностранных ГГИС). Векторная модель — это множество контуров, определяющих геометрию модели ОГТ: контакты рудных тел, тектонических нарушений, литологических разностей и др. для моделей объектов геологической среды; бровки уступов, осевые линии дорог, трубопроводов, выработок, контура их сечений, пункты погрузки и выгрузки горной массы и др. для моделей объектов открытых и подземных горных работ.

Базовый элемент векторной модели — трехмерная точка, над которой могут проводиться следующие действия:

- создание точки и установление ее связей с существующими точками;
- преобразование координат и атрибута точки, при котором отношения между точками не меняются;
- изменение связей точки (индекса точки внутри контура);
- удаление точки с изменением связей соседних с ней точек.

Любое редактирование векторной модели связано с выполнением одного из четырех действий. Для сохранения пространственно-временных связей необходима фиксация нового состояния векторной модели в БД. Можно реализовать две схемы записи в БД в момент транзакции: 1) фиксируется состояние векторной модели с записью всех точек и их связей; 2) записываются только измененные точки и их связи по отношению к предыдущей транзакции. Вторая схема менее ресурсоемкая по трафику сохранения в БД и объему содержащихся данных, так как полностью исключается дублирование одних и тех же данных.

Триангуляционные модели — связный набор треугольников, вершины которых представляют собой точки векторной модели, что предполагает явную и непосредственную связь между ними. Треугольники должны хранить изменение своих состояний по той же схеме, что и точки. Требуется, чтобы алгоритмы построения и модификации триангуляционных моделей учитывали это и взаимодействовали с операциями преобразования векторных моделей, синхронизируя с ними свое состояние. Изменение векторной модели приводит к трансформации триангуляционной модели при следующих ситуациях:

- вставка новых точек может способствовать удалению существующих треугольников и всегда сопровождается вставкой новых;
- удаление точек всегда влечет удаление некоторых треугольников и может привести к созданию новых;
- перемещение точек может спровоцировать удаление некоторых имеющихся треугольников и создание новых;
- трансформация атрибутов точек не изменяет триангуляционную модель, но может привести к изменению атрибутов треугольников.

Так как треугольники содержат не координаты точек, а только ссылки на них, то изменения триангуляционной модели связаны с добавлением и удалением треугольников, а также с трансформированием их атрибутов. При записи триангуляционных моделей в БД к ним применимы те же две схемы, что и для векторных моделей.

Трансформирования векторных и триангуляционных моделей могут привести к изменениям блочных, которые последуют только при возникновении необходимости добавления или удаления блоков. На рис. 4 показаны явные и неявные связи между различными модельными представлениями модели ОГТ. Непосредственная связь между блоками, элементами векторной и триангуляционной моделей отсутствует, поэтому блочная модель должна изменяться в следующих ситуациях:

- увеличение объема триангуляционной модели может способствовать перестроению блочной модели с переблокировкой старых и добавлением новых блоков в изменившихся областях;
- уменьшение объема триангуляционной модели влечет удаление блоков и переблокировку в изменившихся областях;
- трансформация триангуляционной модели может привести к совокупному действию первых двух ситуаций.

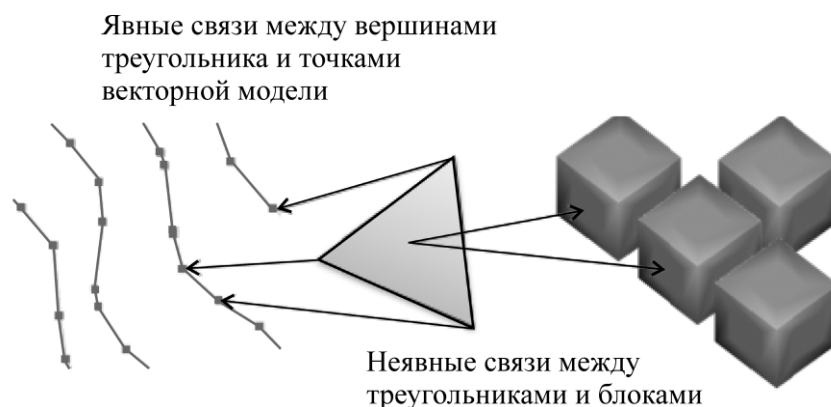


Рис. 4. Явные и неявные связи между представлениями модели ОГТ

Преобразование непространственных атрибутов векторной и триангуляционной моделей не изменяет состав и геометрию блочной модели, но трансформация атрибутов самой модели и ее отдельных блоков (содержания компонентов, физико-механических свойств пород, технологических и экономических параметров и др.) должна быть сохранена в БД. Механизм этого действия может быть реализован по схеме векторной модели.

Использование темпорального подхода при моделировании ОГТ дает возможность реализации шкалы времени изменений моделей объектов, перемещаясь по которой можно отследить прошлые и будущие преобразования. Шкала транзакций может содержать сведения о дате изменений и их создателе. Переход к такой форме хранения информации требует применения реляционных БД, где важным элементом синхронизации и структурирования данных становится индекс транзакции.

### ВЫВОДЫ

Реализация разработанного подхода к моделированию ОГТ имеет следующие преимущества:

- упорядоченное, связанное хранение информации об изменениях моделей придаст таким данным дополнительную защиту от потери и искажения;
- исключение дублирования информации уменьшит объем ее хранения;
- фиксированное по шкале дат и времени состояние моделей ОГТ упростит процедуру анализа вариантов развития горных работ, что особенно важно при решении задач планирования горных работ.

Проектирование горного предприятия — это решение комплекса сложных задач: определения производственной мощности и ее развитие во времени, оптимизации границ карьеров и шахтных полей, выбора системы разработки и установления ее параметров, поиска оптимальных способов вскрытия, обоснования структуры комплексной механизации и т. п. Эти задачи взаимосвязаны друг с другом, и изменение параметров любой из них может повлиять на другие. Предлагаемый подход создаст основу для реализации идеи моделирования жизненного цикла предприятия, где время — такая же важная координата, как и пространство.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуйич С., Максимович С., Радосавльевич М., Крунич Д. Я. Межотраслевое моделирование и горнодобывающая промышленность // ФТПРПИ. — 2018. — № 5. — С. 78–87.
2. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Компьютерные технологии для проектирования и планирования открытых горных работ // II Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием “Глубокие карьеры”, 12–15 октября, Россия, г. Апатиты.
3. Barnewold L. Digital technology trends and their implementation in the mining industry, Appl. Comput. Oper. Res.: Mineral Ind. Proc. 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 9–16.
4. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Моделирование объектов и процессов горной технологии как основа системного подхода к решению задач горного производства // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 180–189.
5. Lukichev S. V. and Nagovitsyn O. V. Modeling objects and processes within a mining technology as a framework for a system approach to solve mining problems, J. Min. Sci., 2018, Vol. 54, No. 6. — P. 1041–1049.
6. Kapageridis I. K. Current state of integrated software solutions for the mining industry, The Masterbulder, 2009. — P. 78–82.

7. **Лукичев С. В., Наговицын О. В.** Современные информационные технологии в горном деле // Мировая горная пром-ть: история, достижения, перспективы: сб. аналит. ст. / под ред. К. Ю. Анистратова. — М.: НПК “Горное дело”, 2013, Т. 2. — С. 274–315.
8. **Шарафеева Ю. А., Степачева А. В.** Вариограммный анализ пространственной изменчивости содержания оксида фосфора (V) на примере месторождения апатитовый цирк // Горн. журн. — 2018. — № 5. — С. 64–70.
9. **Билин А. Л., Белогородцев О. В.** Развитие принципов определения границ карьеров на мощных крутопадающих месторождениях // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. Сб. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. — С. 202–209.
10. **Билин А. Л., Наговицын Г. О.** Автоматизация долгосрочного планирования на карьерах с использованием методов компьютерного моделирования // ГИАБ. — 2019. — № 11 (спец. выпуск 37). — С. 77–84.
11. **Manríquez F., González H., and Morales N.** Short-term open-pit mine production scheduling with hierarchical objectives, Appl. Comput. Oper. Res.: Mineral Ind. Proc. 39<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2019, Wroclaw, Poland, 2019. — P. 443–451.
12. **Сабур С., Димитракопулос Р.** Учет геологических и экономических неопределенностей, фактора эксплуатационной гибкости при проектировании открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2011. — № 2. — С. 57–67.
13. **Vargas M., Latorre A., Contador N., Hernández E., and Torres R.** Assessment processes of construction and drilling and blasting integration through a technology platform, Appl. Comput. Oper. Res.: Mineral Ind. Proc. 37<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2015, Fairbanks, Alaska, 2015. — P. 676–692.
14. **Лаптев В. В.** Численное моделирование потока раздробленной горной массы в процессе выпуска руды с использованием программы ROCKY DEM // Вестн. МГТУ. — 2019. — Т. 22. — № 1. — С. 149–157.
15. **Наговицын О. В., Лукичев С. В.** Развитие методов моделирования горно-геологических объектов в системе MINEFRAME // Информационные технологии в горном деле: докл. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 12–14 октября 2011 г. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — С. 142–147.
16. **Kozyrev A. A., Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., and Semenova I. E.** Technological and geomechanical modelling for mining safety improvement, Appl. Comput. Oper. Res.: Mineral Ind. Proc. 37<sup>th</sup> Int. Symp. APCOM 2015, Fairbanks, Alaska, 2015. — P. 411–419.
17. **Askari-Nasab H., Frimpong S., and Awuah-Offei K.** Intelligent optimal production sheduling estimator, Appl. Comput. Oper. Res.: Mineral Ind. Proc. 32<sup>nd</sup> Int. Symp. APCOM 2005. Tucson, USA, L.: Taylor & Francis Group, 2004. — P. 279–285.
18. **Ailbhe Goodbody.** A deeper design, Min. Magazine 2012 — March. <http://www.miningmagazine.com/management/general-management/a-deeper-design/> (дата обращения 29.09.2020).

*Поступила в редакцию 05/X 2020*

*После доработки 28/X 2020*

*Принята к публикации 03/XI 2020*