

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ БАЗЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ОГРАНИЧЕННОГО ПРОСТРАНСТВА

© 2025 Сорокин А.И., Курносов В.Г.

---

В данной работе приведена разработка структурной схемы базы пространственных данных ограниченного пространства на основе данных пространственного сканирования, полученных с помощью камеры глубины. Рассмотрена концептуальная модель базы пространственных данных для информационного моделирования ограниченных пространств подземных выработок шахт, промышленных предприятий, зданий и сооружений. Рассмотрена структура входных и выходных данных. Разработана структурная схема базы данных в виде модели «сущность-связь».

**Ключевые слова:** структурная схема, база пространственных данных, ограниченное пространство, фотоизображение, трехмерная модель, камера глубины, ER-диаграмма.

---

**Введение.** Сбор, обработка и хранение пространственных данных является актуальной задачей исследований в области информационных технологий. В частности, данные пространственного сканирования подземных горных выработок, объектов социального и инфраструктурного назначения, заводов могут использоваться для создания горно-геологических информационных систем, систем информационного моделирования зданий, цифровых двойников промышленных предприятий.

Основным способом пространственного сканирования на данный момент является наземное лазерное сканирование. Вместе с тем, все большее развитие получает использование методов пространственного сканирования, основанных на применении камер глубины. Камеры глубины обеспечивают создание трёхмерных моделей объектов при существенно меньших затратах по сравнению с технологией наземного лазерного сканирования. В данной работе рассматривается разработка структурной схемы базы пространственных данных ограниченного пространства (далее – базы данных) на основе данных, полученных с помощью камеры глубины.

Под базой пространственных данных понимается совокупность пространственных данных, организованных по определенным правилам, которые устанавливают общие принципы описания, хранения и манипулирования данными, и используемая для удовлетворения информационных потребностей пользователя [1]. Под ограниченными пространствами в данной работе подразумеваются искусственно или естественно созданные пространства, ограниченные со всех сторон, характеризующиеся отсутствием непосредственного контакта с внешней средой. К таким пространствам относятся внутреннее пространство производственных помещений, складов, подземных сооружений, подземных выработок шахт. Также к ним можно отнести ограниченные и замкнутые пространства согласно [2], к которым относятся ограниченные объекты, не предназначенные для постоянного пребывания человека: водостоки, коллекторы сточных вод, отстойники, амбары, колодцы и т.д.

Таким образом, разработка базы данных позволит организовать пространственные данные ограниченных пространств разного назначения по определенным правилам, установить принципы хранения и манипулирования данными для применения в информационных системах моделирования зданий, цифровых двойниках промышленных предприятий, горно-геологических информационных системах.

**Основная часть.** Входными данными базы данных являются серии снимков, полученные с помощью камеры глубины, а также координаты и углы вращения снимков. Под серией снимков в данной работе подразумевается последовательный набор снимков, полученных с помощью одной камеры глубины за один цикл съемки. Каждый снимок, полученный камерой глубины, состоит из фотоизображения и карты глубины. Пиксели фотоизображения характеризуют цвет точки объекта, а пиксели карты глубины – расстояние от точки объекта до плоскости камеры. Координаты и углы вращения снимка характеризуют пространственное положение и ориентацию камеры в момент съемки. Данные пространственного положения и ориентации камеры для каждого снимка могут быть получены различными способами. Существуют как прямые методы (использование системы позиционирования и ориентации камеры), так и косвенные (вычисление положения камеры с помощью специальных меток или взаимное ориентирование снимков на основе алгоритмов фотограмметрии), но в данной работе они не рассматриваются. Предполагается, что эти данные уже известны и являются входными данными. Помимо этого, каждый снимок характеризуется параметрами камеры, с помощью которой он был получен, а также датой и временем.

В качестве иллюстрации входных данных рассмотрим результат разреженной трехмерной реконструкции ограниченного пространства на основе серии снимков на рис. 1.

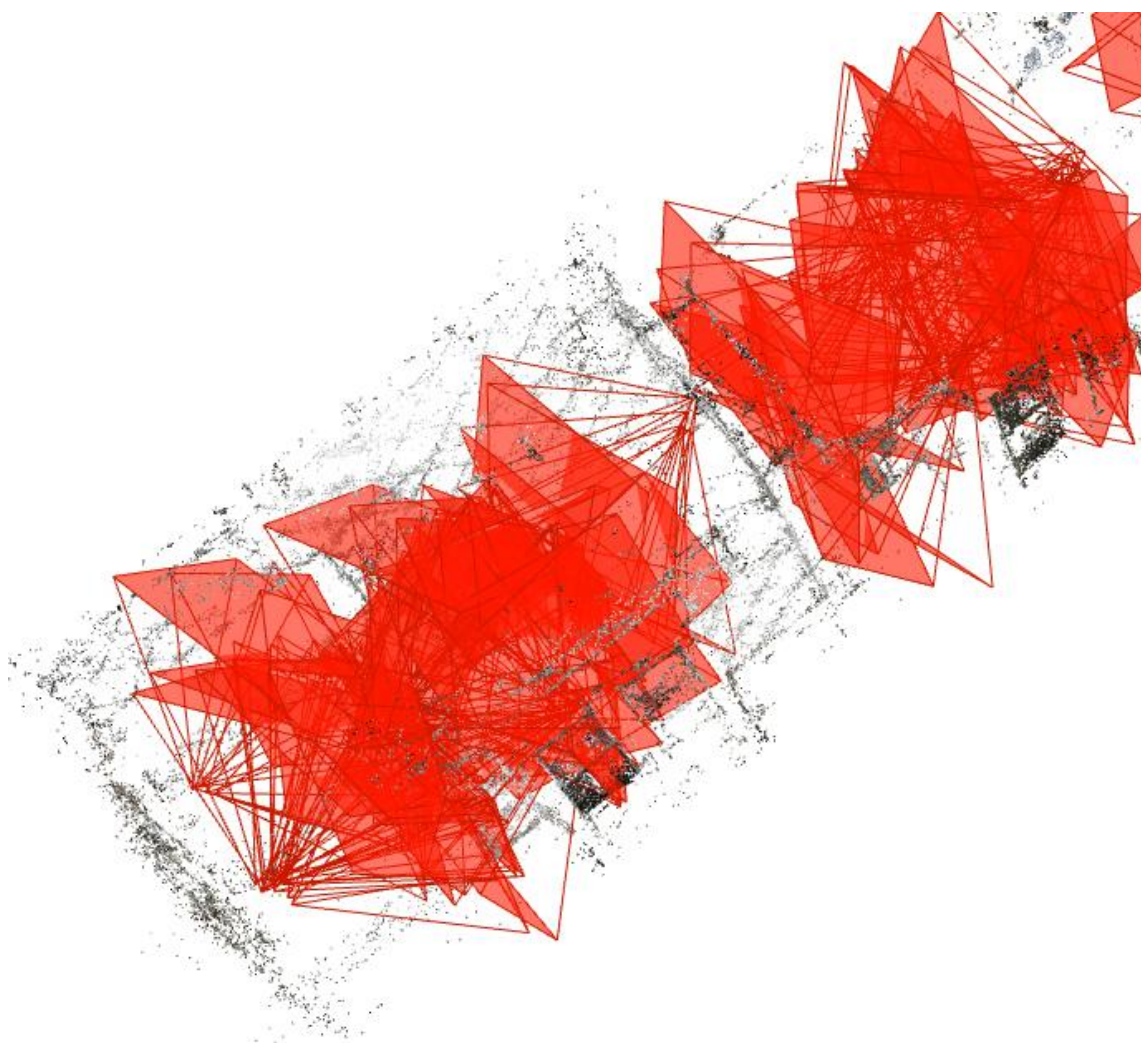


Рис. 1. Разреженная трехмерная реконструкция ограниченного пространства на основе серии снимков

Внутри ограниченного пространства мы можем наблюдать серию снимков, которые визуализированы в виде четырехугольных пирамид с прозрачными боковыми гранями, основание которых закрашено. Вершиной отдельной пирамиды является положение камеры в момент съемки, прозрачные боковые грани характеризуют направление и ракурс, а закрашенное основание в виде прямоугольника соответствует плоскости снимка. Таким образом, координаты снимка характеризуют пространственное положение камеры в момент съемки, а углы вращения определяют, какую часть внутренней поверхности ограниченного пространства охватывает снимок.

На рис. 2 представлена структурная схема входных данных базы данных.

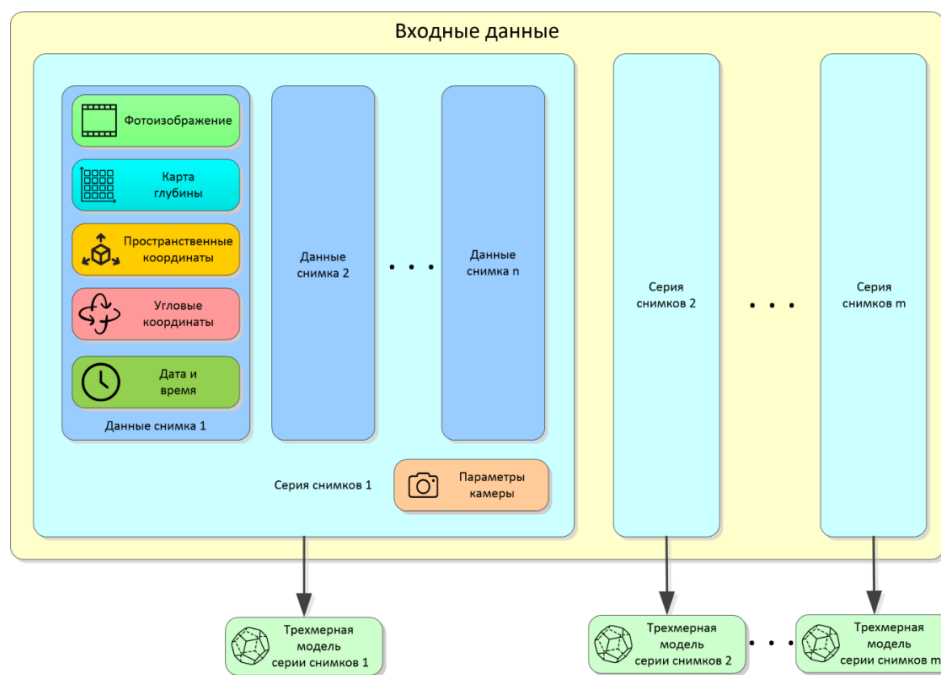


Рис. 2. Структурная схема входных данных базы данных

Введем для отдельного  $i$ -го снимка  $j$ -й серии снимков обозначение  $F_i$ , при этом здесь и в дальнейшем под «снимком» будем подразумевать вектор данных, относящихся к отдельному снимку (фотоизображение, карта глубины, координаты и углы вращения, дата и время). Несколько снимков, полученных одной камерой за один проход, составляют серию снимков:

$$C_j = \bigcup_{i=1}^n F_i,$$

где  $C_j$  –  $j$ -я серия снимков,  $n$  – количество снимков в  $j$ -й серии снимков. При этом выполняется условие:

$$C_j \supseteq F_i.$$

означающее, что каждый  $i$ -й снимок принадлежит соответствующей  $j$ -й серии снимков. В базе данных хранится совокупность серий снимков  $C$ :

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\},$$

где  $m$  – количество серий снимков, хранящихся в базе данных.

Для каждой  $j$ -й серии снимков в результате процесса трехмерной реконструкции создается соответствующая трехмерная модель  $V_j$ :

$$V_j = T(C_i, K_j),$$

где  $T$  – оператор трехмерной реконструкции,  $K_j$  – вектор параметров камеры, необходимых для трехмерной реконструкции (фокусное расстояние, координаты главной точки, разрешение, параметры дисторсии [3]), с помощью которой была получена  $j$ -я серия снимков.

Выходными данными базы данных являются трехмерные модели ограниченных пространств. Рассмотрим трехмерные модели ограниченных пространств на примере рисунков 4, 5, на которых изображены трехмерные модели подземных горных выработок. На рис. 4 трехмерная модель фрагментирована на отдельные участки, выделенные разным цветом.

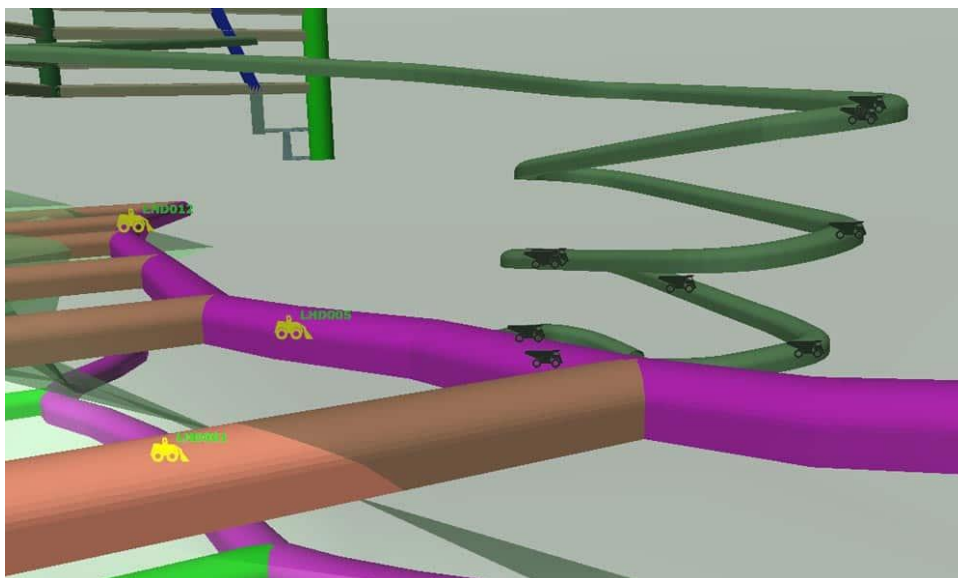


Рис. 4. Трехмерная модель ограниченного пространства (вид снаружи) [4]

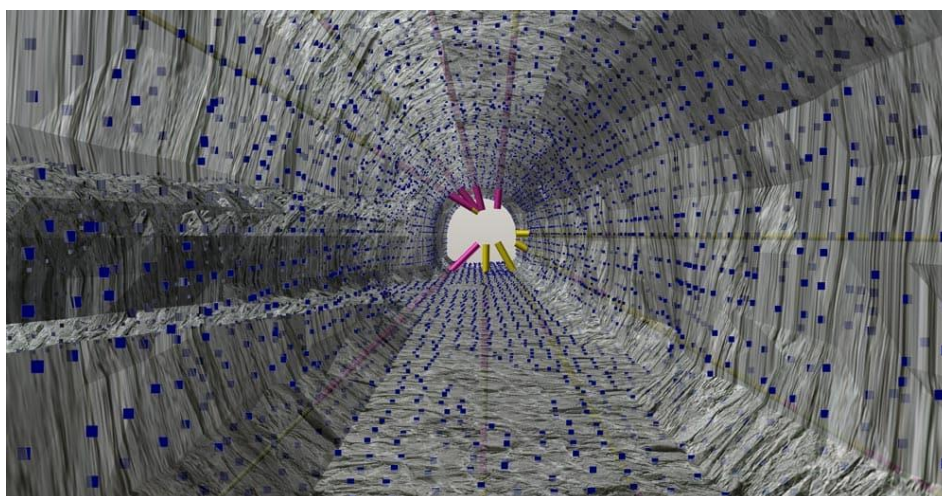


Рис. 5. Трехмерная модель ограниченного пространства (вид изнутри) [5]

Как видно из рисунка 5, трехмерная модель ограниченного пространства представляет собой плоскостную модель внутренней поверхности ограниченного пространства.

Для использования в базе данных необходима декомпозиция ограниченного пространства на отдельные пространственные объекты, так как хранение единой модели в исходной высокой детализации требует больших вычислительных мощностей для хранения и обработки.

Декомпозиция ограниченного пространства на отдельные пространственные объекты позволяет реализовать следующие возможности:

1. Распределённое хранение данных. Возможность использования распределенных хранилищ данных для размещения различных групп пространственных объектов.

2. Структурирование данных. Организация структуры хранения данных позволит выполнять независимую обработку отдельных объектов.

3. Многоуровневая детализация. Возможность представления каждого уровня в различном разрешении для оптимального отображения пространственных данных.

4. Мониторинг динамики. Отслеживание изменений отдельных пространственных объектов во времени.

5. Реализация цифрового двойника. Присвоение каждому пространственному объекту динамически изменяющихся статусов и состояний для создания цифрового двойника.

Применим трехуровневую декомпозицию ограниченного пространства. Так как база данных может применяться для разных сфер применения, введем универсальные названия для объектов каждого уровня декомпозиции. Под элементом подразумевается базовая единица, не подлежащая дальнейшему разбиению в рамках данной структуры. Под подсистемой подразумевается совокупность взаимосвязанных элементов, в свою очередь, являющаяся частью системы. Под системой подразумевается совокупность элементов и подсистем, взаимодействующая с внешней средой как единый объект [6]. Таким образом, используем следующие названия типов объектов: «пространственная система» для уровня декомпозиции 1, «пространственная подсистема» для уровня декомпозиции 2 и «пространственный элемент» для уровня декомпозиции 3. В таблице 1 приведена структура декомпозиции ограниченного пространства и примеры пространственных объектов каждого уровня для разных сфер применения.

Таблица 1. Структура пространственных объектов на основе декомпозиции ограниченного пространства

Уровень декомпозиции	Тип пространственного объекта	Примеры пространственных объектов ограниченных пространств в зависимости от сферы применения		
		Социальная сфера	Горная промышленность	Производство
Уровень 1 (верхний)	Пространственная система	Здание	Система горных выработок шахты	Завод
Уровень 2	Пространственная подсистема	Этаж	Горизонт	Цех
Уровень 3 (нижний)	Пространственный элемент	Помещение	Горная выработка	Производственный участок

Трехмерные модели, полученные на основе серии снимков, могут включать несколько пространственных элементов, поэтому их следует сегментировать на отдельные пространственные элементы (см. рис. 3).

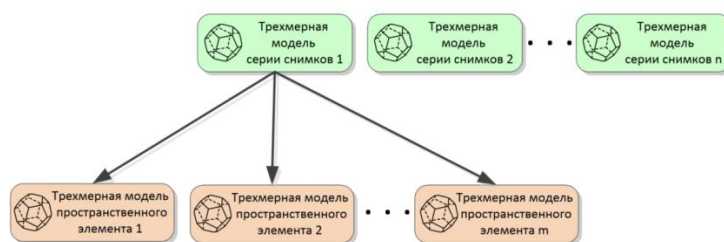


Рис. 3. Сегментирование трехмерных моделей серий снимков на трехмерные модели пространственных элементов

Полученные в результате сегментирования пространственные элементы не должны пересекаться между собой:

$$\begin{cases} \{E_i\}_{i=1}^m = S(V_j) \\ E_i \cap E_j = 0, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, m\}, i \neq j \end{cases}$$

где  $E_i$  – трехмерная модель  $i$ -го пространственного элемента ограниченного пространства,  $S$  – оператор сегментации,  $m$  – количество пространственных элементов, которые можно сегментировать из трехмерной модели серии снимков,  $i, j$  – номера двух произвольных пространственных элементов.

При этом условием для возможности сегментирования отдельного пространственного элемента является полное покрытие внутренней поверхности его ограниченного пространства серией снимков:

$$\begin{cases} D = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{unique}}{A_{total}} \\ D \approx 1 \end{cases}$$

где  $A_i^{unique}$  – уникальная площадь поверхности ограниченного пространства, которую охватывает  $i$ -й снимок (без учета площади ограниченного пространства, которая охвачена предыдущими снимками),  $n$  – количество снимков,  $A_{total}$  – полная площадь внутренней поверхности ограниченного пространства. Коэффициент  $D$  приблизительно равен единице, так как существует погрешность измерения.

Пространственные элементы  $E_i$  объединяются в пространственную подсистему  $B_j$ :

$$B_j = \bigcup_{i=1}^n E_i,$$

где  $n$  – количество пространственных элементов в подсистеме  $B_j$ , а  $m$  пространственных подсистем объединяются в пространственную систему  $S_x$ :

$$S_x = \bigcup_{j=1}^m B_j.$$

В базе данных хранится совокупность пространственных систем  $S$  :

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\},$$

где  $k$  – количество пространственных систем.

При этом выполняется условие вложенности сущностей:

$$S_x \supseteq B_j \supseteq E_i,$$

которое означает, что каждый пространственный элемент  $E_i$  принадлежит одной из пространственных подсистем  $B_j$ , а каждая пространственная подсистема  $B_j$  принадлежит одной из пространственной систем  $S_x$ .

Полученные трехмерные модели пространственных объектов будут иметь локальную систему координат, так как координаты точек трехмерных моделей будут пересчитаны из координат пространственного положения снимков в процессе трехмерной реконструкции. Поэтому требуется выполнить пространственную привязку, означающую определение позиции пространственных объектов в реальном мире [7]. Для этого в базе данных к пространственным объектам верхнего уровня применяется способ пространственной привязки с использованием координат. При этом способе устанавливают соответствие определенных точек пространственного объекта (в локальной системе координат) к координатам точек в реальном мире (в глобальной системе координат).

На рис. 6 представлена структурная схема выходных данных базы данных.

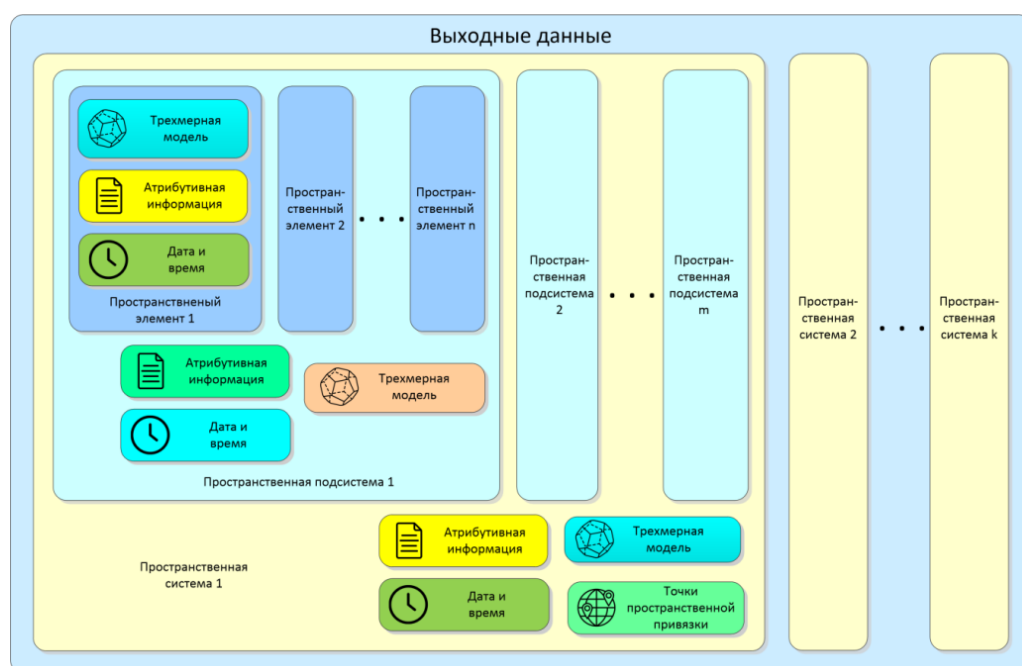


Рис. 6. Структурная схема выходных данных базы данных

Трехмерные модели объектов для разных уровней декомпозиции необходимо создавать с различной степенью детализации, поскольку это позволяет оптимизировать использование вычислительных ресурсов. На верхних уровнях достаточно обобщенных представлений пространственных объектов, тогда как на нижнем уровне требуется высокая степень детализации для точного описания всех деталей объекта [8, 9].

Объекты с разной степенью детализации получают путем упрощения исходной трехмерной модели с высоким уровнем детализации  $O$  :

$$O_i = R(O, L_i),$$

где  $R$  – оператор упрощения модели,  $L_i$  –  $i$ -й уровень детализации,  $O_i$  – трехмерная модель с  $i$ -м уровнем детализации.

На рис. 7 представлена разработанная структурная схема базы пространственных данных ограниченного пространства в виде ER-диаграммы (модели «сущность-связь»). Структурная схема базы данных объединяет структуры входных и выходных данных и приведена к нормальной форме.

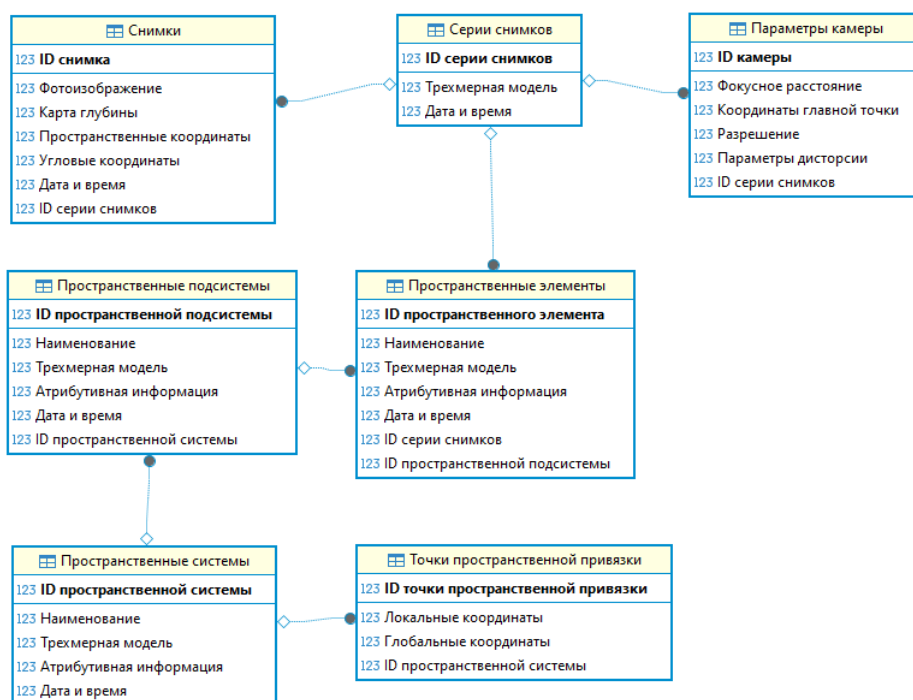


Рис. 7. Структурная схема базы пространственных данных ограниченного пространства

Примечания к структурной схеме базы данных на рис. 7:

1. Структурная схема описывает логическую модель базы данных, представленную в виде модели «сущность-связь», а не фактическую реализацию на программно-аппаратном уровне. Например, при фактической реализации базы данных, поле «Атрибутивная информация» может быть заменено на несколько полей атрибутов, а поля «Трехмерная модель», «Фотоизображение», «Карта глубины» могут содержать ссылки на соответствующие объекты, которые хранятся отдельно.

2. Для пространственных объектов помимо ключевого поля с надписью «ID...» имеется поле «Наименование», так как в базе данных могут храниться несколько экземпляров одного и того же пространственного объекта, созданные в разное время.

**Выводы.** Разработанная структурная схема базы данных позволяет создать реляционную модель ограниченного пространства, полученную в ходе пространственного сканирования ограниченного пространства разными камерами глубины в разные промежутки времени. База данных может применяться для мониторинга изменений в ограниченных пространствах, создания цифровых двойников промышленных предприятий и систем информационного моделирования зданий.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. ГОСТ Р 52438-2005. Географические информационные системы. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2005-12-28. – М. Стандартинформ, 2005. – 15 с.
2. Об утверждении Правил по охране труда при работе в ограниченных и замкнутых пространствах: Приказ Минтруда России от 15.12.2020 № 902н.
3. Чибуничев, А. Г. Фотограмметрия: учебник для вузов / А. Г. Чибуничев. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. – 328 с.
4. Efficient mining: Micromine's intelligent software solution [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.micromine.kz/efficient-mining> (дата обращения: 01.09.2025).
5. Mining software visualising techniques [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.micromine.kz/mining-software-visualising-techniques> (дата обращения: 01.09.2025).
6. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ: учебник для вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 3-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2021. – 562 с.
7. ГОСТ Р 70316-2022. Пространственные данные. Пространственная привязка по географическим идентификаторам: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2022-09-02. – М.: Стандартинформ, 2022. – 19 с.
8. Level of Development (LOD) Specification [Электронный ресурс]. – URL: <https://bimforum.org/lod/> (дата обращения: 04.09.2025).
9. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла: свод правил / Минстрой России. – М., 2020. – 177 с.

*Поступила в редакцию 09.09.2025 г., рекомендована к печати 02.10.2025 г.*

**DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL SCHEME FOR A SPATIAL DATABASE OF LIMITED SPACE**

*Sorokin A.I., Kurnosov V.G.*

This paper presents the development of a structural diagram of a spatial database of a limited space based on spatial scanning data obtained using a depth camera. A conceptual model of a spatial database for information modeling of limited spaces of underground mine workings, industrial enterprises, buildings and structures is considered. The structure of input and output data is considered. The main entities are identified and the relationships between them are described in the form of an ER diagram.

**Keywords:** structural diagram, spatial database, limited space, photographic image, 3D model, depth camera, ER diagram.

**Сорокин Александр Игоревич**

младший научный сотрудник отдела автоматизации горных машин ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: alexandrsorokin96@mail.ru

**Sorokin Aleksandr Igorevich**

Junior Researcher at Department of Mining Machine Automation at the Research and Design Institute for Mining Machine Automation named after V.A. Antipov,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Курносов Вячеслав Григорьевич**

доктор технических наук, профессор, первый заместитель директора по научной работе ГБУ «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации горных машин «Автоматгормаш имени В.А. Антипова», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: avtomatgormash@mail.ru

**Kurnosov Viacheslav Grigorevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, First Deputy Director for Scientific Work of State Institution of Automatgormash named after V.A. Antipov,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.