

# Интеграция геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений для парирования аварийных ситуаций на предприятиях трубопроводного транспорта нефти

С.В. Павлов<sup>1</sup>, А.В. Соколова<sup>1</sup>, О.И. Христодуло<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

## Аннотация

В статье рассмотрен подход к интеграции геоинформационных технологий и методов цифровой обработки изображений с целью повышения эффективности использования компьютерных технологий в управлении сложными распределенными системами в аварийных ситуациях на примере анализа деятельности предприятий трубопроводного транспорта нефти, включая линейную часть, нефтеперекачивающие станции, административные, ремонтные и спасательные подразделения. Новизна предложенного варианта интеграции геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений состоит в применении теоретико-множественного подхода к единообразному формализованному описанию разнотипных пространственных данных, цифровых изображений и их взаимосвязях, необходимых для построения трехмерных моделей производственных объектов сложно распределенных систем. В дальнейшем она позволила определить критерии, состав и структуру этих трехмерных моделей с применением различных уровней детальности моделей объектов для уменьшения вычислительной нагрузки и ускорения трехмерной визуализации объектов сложно распределенных систем, необходимых для поддержки принятия решений при парировании некоторых видов угроз (аварий). Преимущество предложенного подхода заключается в повышении эффективности поддержки принятия решений при парировании некоторых угроз, которое достигается в том числе за счет применения трехмерной визуализации технологической и оперативной (поступающей в случае аварийной ситуации) информации о производственных объектах сложно распределенных систем, а качество, наполняемость и оптимизация трехмерной модели напрямую влияют на принимаемые решения при реализации действий реагирования на аварийные ситуации. Разработанные методы и алгоритмы доведены до практической реализации и применены для построения трехмерных геоинформационных моделей производственных объектов предприятий трубопроводного транспорта нефти.

**Ключевые слова:** геоинформационные технологии, цифровая обработка изображений, интеграция геоинформационных технологий и цифровых изображений, трехмерное моделирование производственных объектов.

**Цитирование:** Павлов, С.В. Интеграция геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений для парирования аварийных ситуаций на предприятиях трубопроводного транспорта нефти / С.В. Павлов, А.В. Соколова, О.И. Христодуло // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 3. – С. 483-491. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-925.

**Citation:** Pavlov SV, Sokolova AV, Christodulo OI. Integration of geographic information technologies and digital image processing for responding to emergency situations at oil pipeline transportation facilities. Computer Optics 2022; 46(3): 483-491. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-925.

## Введение

Появление новых источников и технологий получения данных о местоположении и взаимном расположении различных объектов, а также их интеграция в методы и алгоритмы управления позволяют повысить эффективность использования компьютерных технологий в управлении сложными распределенными системами (СРС), компоненты которых существенно удалены друг от друга и от центра принятия решений. В качестве СРС в данной статье анализируется деятельность предприятий трубопроводного транспорта нефти, включая линейную часть, нефтеперекачивающие станции, административные, ре-

монтные и спасательные подразделения, в качестве управляемого процесса – парирование одного их видов угроз для этих предприятий (аварийные ситуации на производственных объектах).

На сегодняшний день цифровые изображения (технологические схемы, результаты фото- и видеофиксации, авиационные и космические снимки), а также цифровые карты местности и планы производственных объектов СРС используются в той или иной степени во всех фазах реагирования на аварийные ситуации, что во многом объясняет положительную динамику снижения количества аварийных ситуаций и тяжести их последствий [1, 3, 14]. При этом в острой фазе реагирования на аварийную ситуацию возмож-

ности цифровых изображений и двумерных геоинформационных систем (ГИС) ограничены, поскольку классическое представление пространственных объектов в виде цифровых изображений и плоских карт не всегда позволяет точно отобразить многоуровневые структуры сложных производственных объектов и их специфику, в то же время за критически короткие сроки необходимо проанализировать имеющуюся техническую и пространственную информацию с учетом третьего измерения всех объектов СРС [11, 13].

Ряд государственных нормативно-правовых и нормативно-методических документов обязывают предприятия, эксплуатирующие опасные производственные объекты, формировать трехмерные виды их территорий и производственных объектов (например, Требования Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [5]). Технологии и способы интерпретации реальных объектов средствами ГИС в трехмерном пространстве различны, а результаты обработки имеющихся данных не всегда удовлетворяют требованиям, предъяв-

ленным к ним субъектами управления, в связи с этим возникает необходимость развития методов и алгоритмов обработки информации о производственных объектах СРС на основе технологий геоинформационного моделирования, цифровой обработки изображений и компьютерной трехмерной графики [6].

**1. Интегрированная модель геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений**

Информационной основой управления производственными объектами СРС в аварийных ситуациях, упрощенная схема которой представлена на рис.1, является совокупность данных о самих объектах и их окружении, которые содержат в большом объеме цифровые изображения, полученные непосредственно при фото- и видеосъемке, при моделировании в графических программах (планы тушения пожаров, технологические схемы, поэтажные и генеральные планы территории), а также при использовании геоинформационных систем (географические карты местности, данные дистанционного зондирования Земли, результаты пространственного анализа) (рис. 1) [4].

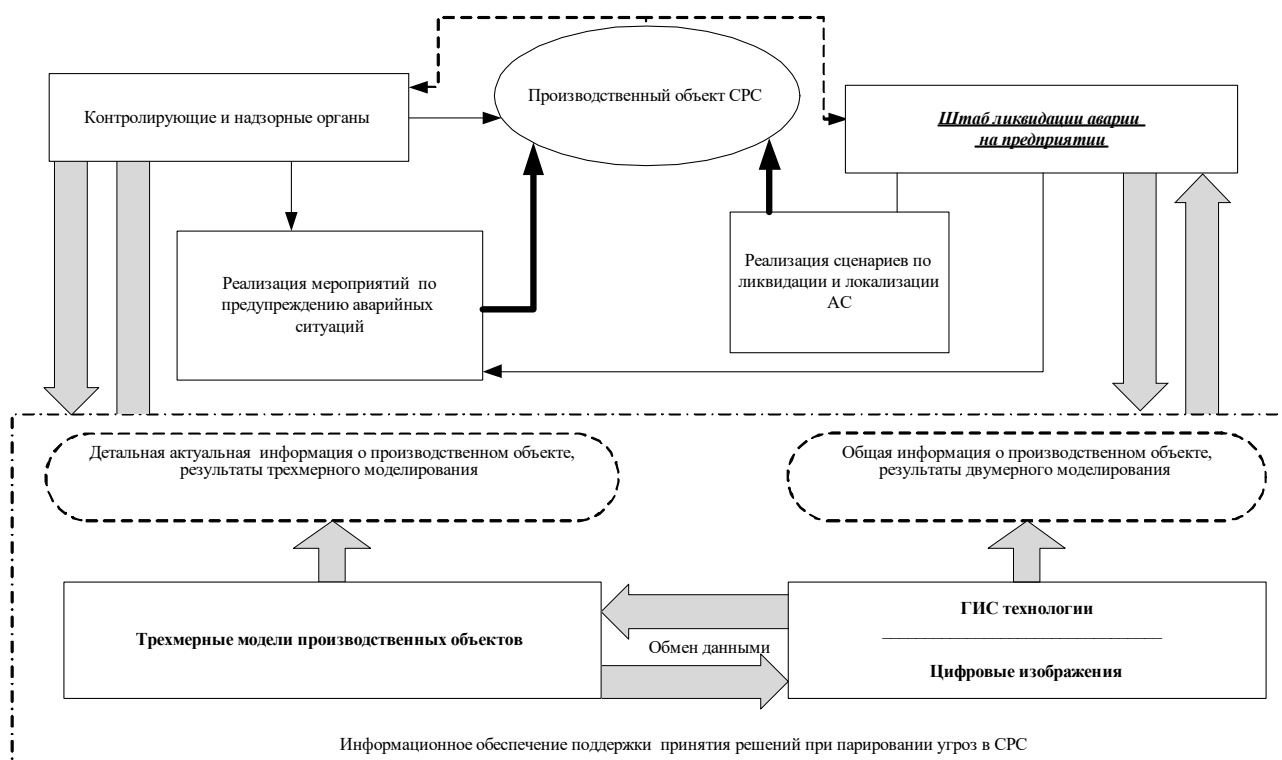


Рис. 1. Схема совместного использования пространственных данных и цифровых изображений при парировании угроз в СРС

Особо следует отметить, что одной из важных составляющих информационного обеспечения поддержки принятия решений в области реагирования на аварийную ситуацию являются пространственные данные, объем и доступность которых влияют на качество результата использования геоинформационных технологий в обозначенной области [4, 12]. При этом уже накоплены пространственные данные в виде плоских чертежей и двумерных карт, которые не все-

гда позволяют всесторонне изучить особенности местности и планировку территории производственного объекта, а также увеличивают время оценки обстановки в случае возникновения экстренной ситуации, что, в свою очередь, влияет на оперативность принимаемых решений [8, 11]. Так, например, сведения об инженерных сетях и объектах инфраструктуры могут быть представлены в виде технологических схем, которые не отражают размещение объектов на

местности, а тем более в трехмерном пространстве и не могут естественным образом (без дополнительной обработки) совмещаться с цифровыми моделями, а опираются на знания специалистов, участвующих в парировании угроз.

Для этих целей все большее применение [5] находят трехмерные модели СРС, их объектов и развивающихся на них процессов, причем эти модели должны, по возможности, наиболее точно отражать местоположение и взаимное расположение различных

(производственных, инфраструктурных, природных и др.) пространственных объектов, что достигается согласованностью координатной привязки различных видов информации об этих объектах, а также единой методологией их формального описания. Взаимосвязь различных видов информации, описывающей основные атрибуты моделируемых объектов, а также их местоположение и трехмерное представление и используемой для поддержки принятия решений при парировании аварийных ситуаций, представлена на рис. 2.

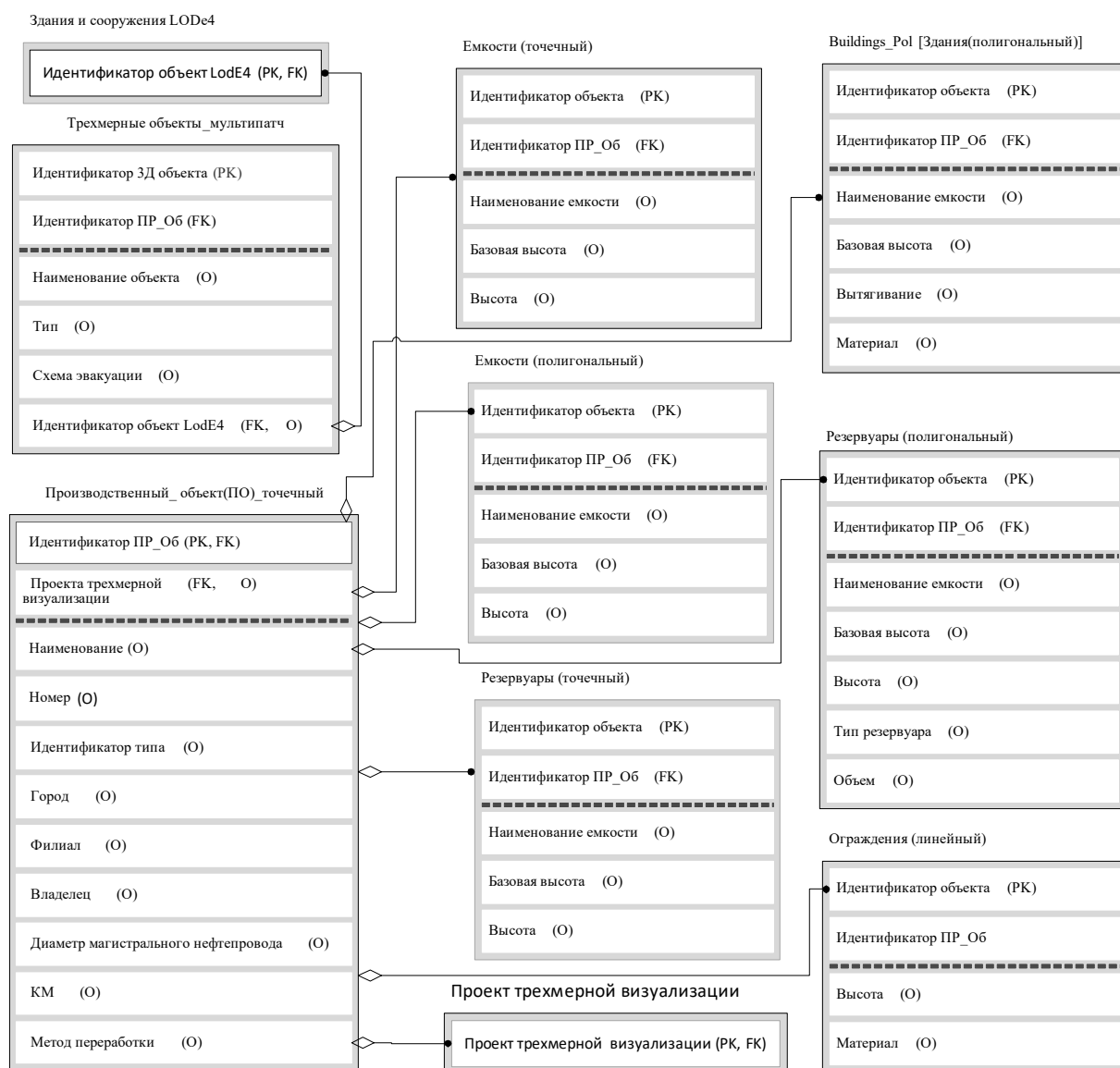


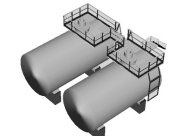
Рис. 2. Фрагмент информационной модели применения различных видов информации при парировании угроз

В качестве инструмента интерпретации производственных объектов СРС выступает трехмерная модель  $M^3$ , которая представляет собой результат совместной обработки всех видов пространственных данных  $D^3$ , описывающих реальные объекты (включая цифровые изображения  $Img$ ), а также функции манипулирования  $F$  и визуализации их в трехмерном виде  $Pr$ :

$$M^3 = \langle D^3, Img, F, Pr \rangle. \quad (1)$$

Таким образом, в составе трехмерных моделей производственных объектов СРС необходимо обеспечить обработку большого количества разнотипной пространственной информации, для этого предложено сформировать интегрированную модель описания разнотипных представлений пространственных данных и их взаимосвязей о производственных объектах, основанную на теоретико-множественном подходе [9] и представленную в таблице.

Табл. 1. Формальное представление элементов трехмерных моделей производственных объектов СРС

Наименование вида объекта реального мира	Модель данных и компьютерное представление	Теоретико-множественное описание
Рельеф местности	Триангуляционная модель рельефа 	$T$ – модель данных о поверхности высот, хранящаяся в виде триангуляционных сетей, образованных гранями ( $T_S$ ), ребрами ( $T_E$ ) и узлами ( $T_N$ ), в пространстве: $T = \{T_S, T_E, T_N\}. \quad (2)$
	Растровая модель рельефа (GRID) 	Растровая модель данных ( $R$ ) предусматривает разбиение пространства на неделимые элементы – ячейки ( $R_{cell}$ ), образующие регулярную сеть (в том числе матрицу высотных отметок ( $GRID$ )), каждая из которых может содержать атрибутивную информацию $I_{cell}^{atr}$ : $R = \{R_{cell}\} = \{(x, y, z)_{cell}, I_{cell}^{atr}\}. \quad (3)$
Инженерные коммуникации (запорная арматура трубопроводов, опоры линий электропередач, молниезащиты), расстановка сил и средств спасательных служб	Векторная модель данных (точечные объекты) 	$P^3 = \left\{ \left\{ (x^p, y^p, z^p)_j \right\}, \left\{ I_j^{atr} \right\} \right\}, j = \overline{1, n_p}, \quad (4)$ где $P^3$ – множество точечных объектов, расположенных в трехмерном пространстве; $n_p$ – количество точечных объектов; $I_j^{atr}$ – атрибутивная информация $j$ -го точечного объекта.
Инженерные коммуникации (трубопроводы, линии связи и электропередач и др.), пути следования спасательных бригад, маршруты эвакуации	Векторная модель данных (линейные объекты) 	$L^3 = \left\{ \left\{ (x^l, y^l, z^l)_q \right\}, \left\{ I_j^{atr} \right\} \right\}, j = \overline{1, n_l}, q = \overline{1, b_j}, \quad (5)$ где $L^3$ – множество линейных объектов, расположенных в пространстве; $n_l$ – количество линейных объектов; $b_j$ – количество вершин в $j$ -й линии; $I_j^{atr}$ – атрибутивная информация $j$ -го линейного объекта.
Здания и технические сооружения, емкости, резервуары, дороги и др.	Векторная модель данных (полигональные объекты) 	$Pol^3 = \left\{ \left\{ \left\{ (x^{pol}, y^{pol}, z^{pol})_t \right\}_q \right\}, \left\{ I_j^{atr} \right\} \right\}, j = \overline{1, n_{pol}}, q = \overline{1, b_j}, t = \overline{1, c_q}, \quad (6)$ где $Pol^3$ – множество полигональных объектов, расположенных в пространстве; $n_{pol}$ – количество полигональных объектов; $b_j$ – количество линий в $j$ -м полигоне; $c_q$ – количество вершин в $q$ -й линии; $I_j^{atr}$ – атрибутивная информация $j$ -го полигонального объекта.
Здания и технические сооружения, оборудование на резервуаре и нефтепроводе и др.	Векторная модель данных (сложные трехмерные объекты, объекты мультипатч) 	$MP^3 = \left\{ b_j \right\}_j = \left\{ \left\{ \left\{ (x^{MP}, y^{MP}, z^{MP})_m \right\}_t, Tex \right\}_q \right\}_j, \left\{ I_j^{atr} \right\}, \quad (7)$ $j = \overline{1, n_{MP}}, q = \overline{1, b_j}, t = \overline{1, c_q}, m = \overline{1, a_t}$ где $MP^3$ – множество сложных трехмерных объектов, расположенных в пространстве, изначально имеющих объем и текстуры; $n_{MP}$ – количество сложных трехмерных объектов; $b_j$ – количество полигонов (треугольников, колец) в $j$ -м сложном трехмерном объекте; $c_a$ – количество линий в $q$ -м полигоне; $a_t$ – количество вершин в $t$ -й линии; $Tex$ – текстурированное изображение $q$ -го полигона; $z_j$ – координата $z$ для $j$ -го сложного трехмерного объекта; $I_j^{atr}$ – атрибутивная информация $j$ -го сложного трехмерного объекта.

При этом наибольший объем подготовительных работ для построения трехмерных моделей приходится на создание и анализ базы пространственных и ат-

рибутивных данных, в связи с чем целесообразно преобразовать накопленные пространственные данные об объектах СРС в трехмерный вид, а цифровые

изображения использовать для придания трехмерной карте реалистичности. При этом цифровые изображения могут выступать в качестве самостоятельных объектов модели (например, космические снимки), а также элементов пространственных данных (текстуры объектов, атрибуты данных).

Для реализации возможности отображения (в том числе визуализации) пространственных объектов СРС в трехмерном пространстве при организации хранения пространственной информации об этих объектах в виде координат местоположения на местности (как правило, в виде цифровых карт, планов и схем) к имеющейся паре координат  $(x, y)$  необходимо добавить значение третьей координаты  $z$ , характеризующей высоту положения объекта относительно местности. Первоначально в двумерных (плоских) моделях местности и производственных объектов  $z=0$ , а в дальнейшем для перехода к трехмерным моделям необходимо определить (рассчитать) значения высот для каждого пространственного объекта, что и будет составлять фактическое значение координаты  $z$ .

Вся пространственная информация о производственном объекте СРС (для примера пусть это будет нефтеперекачивающая станция некоторого трубопровода) может быть представлена в виде многослойной карты

$$K = \{S^1, S^2, \dots, S^m\} = \{S^j\}_{j=\overline{1, m}}, \quad (8)$$

где  $m$  – общее количество слоев карты данного производственного объекта. В свою очередь, каждый тематический слой представляет собой совокупность (множество) пространственной информации об однотипных пространственных объектах

$$\{S^j\} = \{S^j_1, S^j_2, \dots, S^j_{n_j}\} = \{S^j_l\}_{l=\overline{1, n_j}}, \quad (9)$$

где  $n_j$  – количество объектов, входящих в  $j$ -й слой,  $l = \overline{1, m}$ . Например, это может быть слой резервуаров для хранения нефтепродуктов или слой опор (столбов), линий электропередач (ЛЭП).

В свою очередь, каждый пространственный объект слоя описывается одной (для точечных объектов) или несколькими (для линейных и полигональных объектов) парами координат  $x$  и  $y$ . Например, в слое опор ЛЭП (пусть он имеет, например, номер  $j=j_0$  в (8), то есть  $S^{j_0}$  – это слой информации об опорах ЛЭП), местоположение опоры с номером  $l=l_0$  в (9) будет описываться парой координат  $S^{j_0}_{l_0} = (x^{j_0}_{l_0}, y^{j_0}_{l_0})$ .

Так как на карте  $K$  из (8) отображается только расположение всех пространственных объектов на поверхности Земли (или проекции этих объектов на поверхность Земли), то координата  $z$  для всех этих объектов не рассматривается.

При построении трехмерных моделей у всех пространственных объектов появляется третье измерение

и вводится в рассмотрение координата  $z$  (физический смысл которой, как правило, определяет высоту расположения некоторой точки над уровнем моря), то есть возникает задача построения трехмерной карты

$$\overline{K} = \{\overline{S}^j\}_{j=\overline{1, m}}, \quad (10)$$

где в каждом слое каждый объект характеризуется значениями 3 координат:

$$\overline{S}^j_l = (x^j_l, y^j_l, z^j_l), \quad (11)$$

для  $j = \overline{1, m}$  и  $l = \overline{1, n}$ . Другими словами,  $K$  – карта двумерных (плоских) пространственных объектов, а  $\overline{K}$  – карта трехмерных пространственных объектов, и важной научной задачей становится построение отображения

$$F : K \rightarrow \overline{K}. \quad (12)$$

Учитывая, что слои  $S^j$  и  $\overline{S}^j$  при различных значениях  $j$  состоят из различных смысловых (например, резервуары, трубопроводы) и структурных (точки, линии и полигоны) типов пространственных объектов, то для преобразования каждого конкретного слоя отображение будет иметь свой вид, то есть

$$F = \{f^j\}, f^j : S^j \rightarrow \overline{S}^j, \quad (13)$$

для  $j = \overline{1, m}$ .

Часть слоев трехмерной карты из (10), содержащих пространственную информацию об объектах СРС, может располагаться на земной поверхности (например, дороги, опоры ЛЭП) или на определенном расстоянии от нее (например, канализация залегает на определенной глубине от поверхности, ЛЭП проходят над земной поверхностью на определенной высоте). Кроме того, существуют слои, для которых объекты или их части могут располагаться как над землей, так и под ней (например, линейный слой нефтепроводов может размещаться под поверхностью земли и над ней).

Этот факт закладывается в основу построения отображений  $f^j$ , физический смысл которых заключается в «подъеме» или «опускании» каждой точки пространственного объекта относительно поверхности Земли:

$$f^j : (x, y) \rightarrow \begin{cases} (x, y, z + h), (1) \\ (x, y, z), (2) \\ (x, y, z - h), (3). \end{cases} \quad (14)$$

При этом значение координаты  $z$  вычисляется для каждой точки в (14) по известным правилам соответствующей модели рельефа ((2) или (3)), высота  $h$  определяется из атрибутивной таблицы соответствующих векторных пространственных объектов, входящих в  $j$ -й векторный слой из (9). Согласно формуле

(14)  $h$  определяет местоположение точки относительно поверхности рельефа тремя возможными способами: (14.1) точка находится над поверхностью, (14.2) находится на поверхности, (14.3) точка находится под поверхностью. Данный подход реализован на основе предложенного в [7] теоретико-множественного описания объектов, примененного авторами для формализации представлений о взаимном расположении пространственных объектов относительно цифровой модели рельефа и друг друга, а также их связи в трехмерном пространстве, применительно к объектам трубопроводного транспорта.

Космические снимки в трехмерной модели могут выступать в качестве драпировки поверхности цифровой модели рельефа или в качестве источников высот. При этом следует отметить, что на стадии формирования базы пространственных данных для трехмерных моделей космические снимки могут использоваться для определения экстенда будущей трехмерной карты, а также для географической привязки векторных планов и схем предприятия к их реальному расположению на местности (то есть к реальной системе координат) (рис. 3). Кроме того, цифровые изображения с точки зрения структуры данных можно рассматривать как отдельный тематический слой в (8).



Рис. 3. Цифровое изображение территории объекта и географически привязанный фрагмент генерального плана

### 2. Формирования состава и структуры трехмерных моделей производственных объектов СРС с учетом различной детальности объектов

Специфика разрабатываемых трехмерных моделей заключается в том, что производственные объекты содержат сравнительно небольшое количество зданий и сооружений (относительно населенных пунктов) и большое количество коммуникаций и специального оборудования, которые могут располагаться многослойно относительно земной поверхности.

В связи с этим предлагается адаптировать предложенную в [2, 10] концепцию уровня детализации представления пространственных объектов к особенностям разрабатываемых трёхмерных моделей СРС,

где все пространственные объекты СРС можно разделить на 4 уровня.

1-й уровень ( $LoD_{E1}$ ).  $LoD_{E1}$  – здания и сооружения в виде полигональных объектов, вытянутых по высоте (соответствует общепринятому стандарту детализации  $LoD1$ ), дороги и ограждения территории, расположенные на поверхности рельефа.

2-й уровень ( $LoD_{E2}$ ).  $LoD_{E2}$  – здания и сооружения с различными конструкциями (окна, двери и прочее) (соответствует общепринятому стандарту детализации  $LoD3$ ).

3-й уровень ( $LoD_{E3}$ ).  $LoD_{E3}$  – инженерные коммуникации, трубопроводы и оборудование.

4-й уровень ( $LoD_{E4}$ ).  $LoD_{E4}$  – здания и сооружения  $LoD_{E2}$  с детальными внутренними планировками (соответствует общепринятому стандарту детализации  $LoD4$ ).

Повышение уровня детализации представления пространственных объектов приводит к увеличению вычислительной нагрузки в операциях, связанных с визуализацией и преобразованием моделей [2], в связи с этим необходимо определить критерии состава и структуры трехмерной модели СРС, а также условия и механизмы их отображения с учетом уровня детализации.

1-й критерий. Пространственные объекты уровня  $LoD_{E4}$  следует отображать только по требованию, поскольку отображение планировок зданий и сооружений во время общей оценки территории объекта при парировании угроз нецелесообразно.

Это достигается за счет хранения планировок зданий и сооружения в виде отдельных моделей в обменном формате пакетов трехмерной графики за пределами базы  $D^3$  (рис. 4).

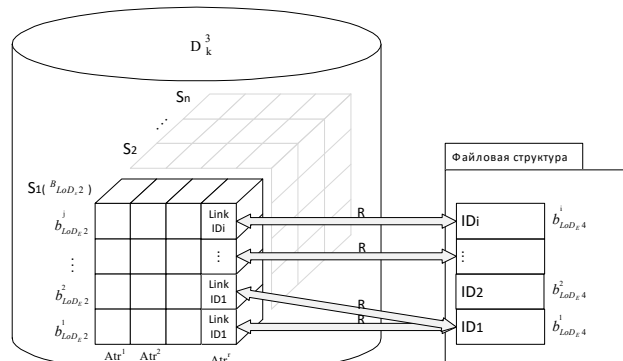


Рис. 4. Организация связи между объектами базы пространственных данных  $D^3$  и других форматов

Для этого необходимо организовать связь между объектами  $b_{LoD_{E2}}$  и  $b_{LoD_{E4}}$ . При этом множество объектов  $\{b_{LoD_{E2}}\}$  представляют собой пространственные объекты из (7), объединенные в  $i$ -й трехмерный слой (11) и хранящие пространственную информацию о зданиях и сооружениях с уровнем детализации  $LoD_{E2}$  (без планировок) в базе данных  $D^3$

$$B_{LoD_E2}^i = \{b_{LoD_E2}^j\}_j^i = MP^{3(i)} \in D^3, \quad (15)$$

а множество объектов  $\{b_{LoD_E4}\}$  – те же здания и сооружения уровня детализации  $LoD_E4$  (с планировками и коммуникациями), созданные средствами современных пакетов трехмерной графики для более детальной визуализации планировок зданий и сооружений, для которых выполняется следующее условие:

$$B_{LoD_E4} = \{b_{LoD_E4}^j\}_j, b_{LoD_E4}^j \notin D^3, j = \overline{1, n_{b_{LoD_E4}}}, \quad (16)$$

где  $n_{b_{LoD_E4}}$  – количество объектов уровня  $LoD_E4$ , относящихся к конкретной трехмерной модели СРС. При этом некоторые типовые здания (например, блок-боксы) могут иметь одинаковый вид и планировку, поэтому связь объектов  $b_{LoD_E2}$  и  $b_{LoD_E4}$  может быть неоднозначной, то есть  $b_{LoD_E4}$  может соответствовать одному и более объекту  $b_{LoD_E2}$  из  $D^3$ .

Связь подобного типа может быть организована посредством механизма прикреплений, при условии выполнения условия

$$\{b_{LoD_E2}^j\}_j \geq \{b_{LoD_E4}^k\}_k, j \neq k. \quad (17)$$

*2-й критерий.* Количество пространственных объектов уровня  $LoD_E2$  в обозначенной области аварийной ситуации должно быть максимальным.

Пусть  $FO_d$  – область операционного понимания  $d$ -й аварии в пространстве трехмерной модели производственного объекта СРС:

$$FO_d = \begin{cases} g_d(x_d^n, y_d^n, z_d^n) = 0, \text{ граница мн-ва;} \\ g_d(x_d^n, y_d^n, z_d^n) < 0, \text{ внутренняя область мн-ва;} \end{cases} \quad (18)$$

где  $d = \overline{1, M}$ ,  $M$  – количество областей операционного понимания  $FO_d$ .

Тогда задача определения состава и структуры модели сводится к визуализации детализированных пространственных объектов  $LoD_E2$ , попавших в  $FO_d$ , которую можно обозначить следующим способом:

$$\bar{S}^i = \left( \bigcup_{j=1, l} O_{ij} \right) \cap \left( \bigcup_{d=1, M} FO_d \right), \quad (19)$$

где  $O_{ij}$  – это область отображения  $j$ -го объекта в  $i$ -м слое уровня  $LoD_E2$ .

*3-й критерий.* Стратегически важных объектов постоянное количество.

На трехмерной модели производственного объекта СРС всегда отображаются стратегически важные объекты (например, контрольно-пропускной пункт, пожарная насосная, водонасосная, электрическая подстанция) в детализации до  $LoD_E3$ , так как они могут быть задействованы при парировании некоторых угроз и, следовательно, их вид, местоположение и характеристики отображаются независимо от местоположения аварии [6].

Таким образом, определение состава и структуры трехмерной модели производственного объекта СРС имеет важное ресурсное значение – снижение компьютерных и временных затрат на обработку и визуализацию пространственных данных, а также стратегическое – повышение уровня операционного понимания аварийной ситуации на месте без отвлечения на несущественные детали при выбранном очаге распространения аварии.

Представленные в данной статье методы доведены до практической реализации в виде алгоритма (блок-схема представлена на рис. 5) и разработанного на его основе программного обеспечения в среде ArcGIS, которые использовались для построения трехмерных моделей производственных объектов одного из предприятий трубопроводного транспорта нефти (рис. 6) и их использования для парирования некоторых видов аварий, например: взрывы, пожары, аварийные разливы нефти, более подробно изложенных авторами в [6].

Согласно регламентирующим документам надзорных ведомств и предприятий ([4, 5]) определены этапы реагирования на различные виды угроз, требующие поддержки принятия решений на основе совместного использования геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений (в том числе трёхмерных моделей производственных объектов и окружающих территорий), которые могут существенно отличаться друг от друга и представляют собой самостоятельные научно-технические задачи, выходящие за рамки настоящей статьи. Более того, несмотря на то, что большинство задач реагирования на аварийные ситуации используют трёхмерные модели, состав и внешний вид этих трёхмерных моделей может существенно отличаться для различных задач и для различных специалистов, участвующих в решении этих задач (диспетчеры, спасатели, технологи и др.). Поэтому качество (или пригодность) этих моделей определяется экспертно конкретными специалистами при решении определенных задач. Например, анализ временных затрат специалистов диспетчерских служб на каждом этапе процесса принятия решений показал, что их большая часть приходится на интерпретацию и анализ данных о реальных производственных объектах СРС. Так, при определении места аварии и объектов, попавших в зону аварии, оператор диспетчерской службы должен сопоставить данные технологической схемы, генерального плана территории производственного объекта СРС, космических снимков, технической документации для дальнейшей координации работ по ликвидации аварии.

Практическое применение такого подхода при проведении учений по ликвидации аварий на одном из предприятий показало, что повышение эффективности поддержки принятия решений при парировании некоторых угроз достигается в том числе за счет интеграции геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений в виде трехмерной визуализации технологической и оперативной (посту-

пающей в случае аварийной ситуации) информации о | производственных объектах СРС.

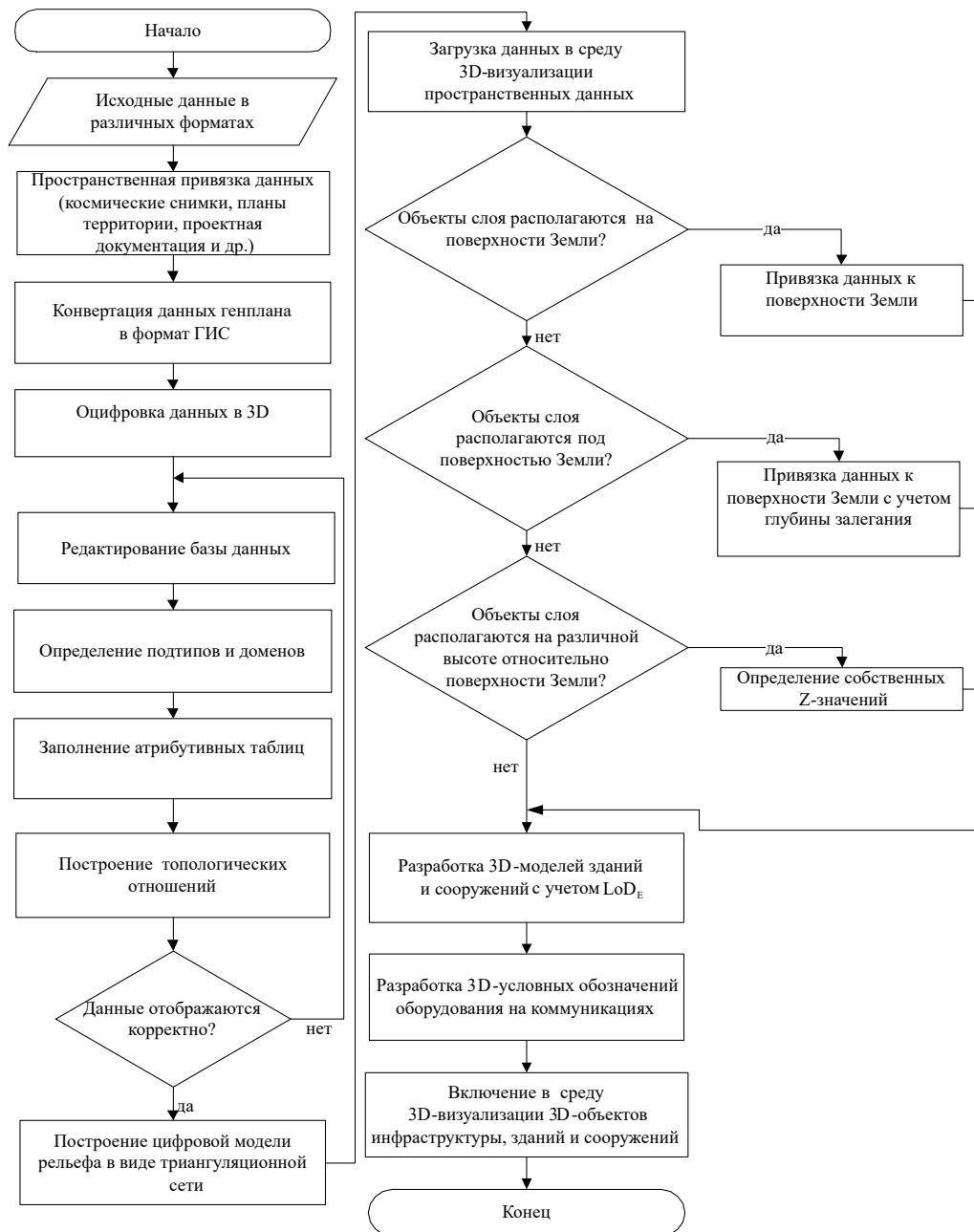


Рис. 5. Блок-схема алгоритма построения трехмерных моделей производственных объектов

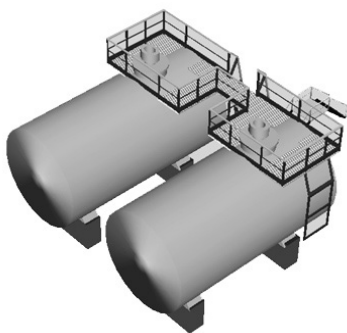


Рис. 6. Результат интеграции геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений для построения трехмерной модели производственного объекта с использованием различных уровней детализации

### Заключение

Предложенный вариант интеграции геоинформационных технологий и цифровой обработки изображений основан на теоретико-множественном подходе к описанию разнотипных пространственных данных, цифровых изображений и их взаимосвязях, необходимых для построения трехмерных моделей производственных объектов СРС. Использование этих моделей для парирования некоторых угроз (аварий) позволяет существенно сократить время поиска, анализа, совместного представления и наглядной визуализации всей необходимой информации и тем самым повысить эффективность поддержки принятия решений и самих



решений по предотвращению и ликвидации аварий на предприятиях трубопроводного транспорта нефти.

### *Благодарности*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00301.

### *References*

- [1] Afanasyev AP, et al. Information-analytical system for decision-making based on a network of distributed situational centers [In Russian]. *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy* 2010; 2: 3-14.
- [2] Bugakov PYu. Foreign experience in the field of cartographic generalization of three-dimensional models of urban areas [In Russian]. *Vestnik of SSUGT* 2017; 22(1): 151-159.
- [3] Efremova OA, Kunakov YuN, Pavlov SV, Sultanov AKh. An algorithm for mapping flooded areas through analysis of satellite imagery and terrestrial relief features. *Computer Optics* 2018; 42(4): 695-703. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-695-703.
- [4] Recommendations for cartographic support of the Russian Emergencies Ministry [In Russian]. In Book: *Civil security technologies*. Moscow: Publishing house of VNI GOChS; 2013: 44-48.
- [5] Recommendations for the creation of three-dimensional geo-images (models) of territories and life support facilities, potentially dangerous, critical for national security / Regulatory and methodological documents on the organization of research and development work [In Russian]. Moscow: Publishing house of VNI GOChS; 2009.
- [6] Sokolova AV, Pavlov SV, Christodulo OI. Information support for decision-making on the prevention and elimination of emergency situations at industrial facilities based on technologies of three-dimensional geoinformation modeling [In Russian]. *Auditorium* 2019; 1(21). Source: (<http://auditorium.kursksu.ru/pdf/021-004.pdf>).
- [7] Christodulo OI, et al. Processing of two-dimensional spatial information as part of a three-dimensional model of an industrial facility [In Russian]. *Petroleum Engineering* 2015; 1: 152-162.
- [8] Sokolova AV, Khristodulo OI. Application of technologies of three-dimensional geoinformation modeling taking into account the level of detail for solving managerial problems. *Information Technologies for Intelligent Decision Support (ITIDS'2015): Proceedings 3th International Scientific and Practical Conference 2015*; 1: 123-126.
- [9] Pavlov SV, Efremova OA, Sokolova AV. Formalized description of spatial information as part of three-dimensional models of potentially dangerous objects based on the set-theoretic approach [In Russian]. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems* 2014; 10(1): 66-72.
- [10] Biljecki F. Formalisation of the level of detail in 3D city modeling. *Comput Environ Urban Syst* 2014; 48: 1-15.
- [11] Lee J, Zlatanova S. A 3D data model and topological analyses for emergency response in urban areas. In Book: *Geospatial information technology for emergency response*. London, UK: Taylor & Francis Group; 2007: 143-168.
- [12] Choudhary K, Boori MS, Kupriyanov AV. A remote sensing and GIS based approach for land use/cover, inundation and vulnerability analysis in Moscow, Russia. *Computer Optics* 2019; 43(1): 90-98. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-1-90-98.
- [13] Lebedev LI, Yasakov YuV, Utesheva TSh, Gromov VP, Borusjak AV, Turlapov VE. Complex analysis and monitoring of the environment based on Earth sensing data. *Computer Optics* 2019; 43(2): 282-295. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-282-295.
- [14] Umar HA, et al. Spatial database development for oil spills pollution affecting water quality system in Niger delta. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 6th International Conference on Geomatics and Geospatial Technology (GGT 2019) 2019; XLII-4/W16: 645-657.*

### *Сведения об авторах*

**Павлов Сергей Владимирович.** В 1977 году окончил Башкирский государственный университет по специальности «Математик, вычислительная математика». Доктор технических наук, профессор УГАТУ. Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан. Область научных интересов: системный анализ, информационные системы, разработка многомерных моделей данных, интеграция баз данных, геоинформационные системы. E-mail: [psvgis@mail.ru](mailto:psvgis@mail.ru).

**Соколова Анна Васильевна.** В 2013 году окончила магистратуру Уфимского государственного авиационного технического университета по специальности «Информационные системы и технологии». Кандидат технических наук, доцент кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: геоинформационные системы, обработка пространственной информации. E-mail: [beldyanova@ya.ru](mailto:beldyanova@ya.ru).

**Христодуло Ольга Игоревна.** В 1991 году окончила Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». Доктор технических наук, заведующий кафедрой геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета. Область научных интересов: системный анализ, проектирование корпоративных информационных систем, обработка пространственной информации. E-mail: [o-hristodulo@mail.ru](mailto:o-hristodulo@mail.ru).

ГРНТИ: 20.15.13

Поступила в редакцию 18 мая 2021 г. Окончательный вариант – 29 октября 2021 г.

---

# Integration of geographic information technologies and digital image processing for responding to emergency situations at oil pipeline transportation facilities

S.V. Pavlov<sup>1</sup>, A.V. Sokolova<sup>1</sup>, O.I. Khristodulo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> USATU – Ufa State Aviation Technical University, 450005, Ufa, Bashkortostan, Russia, 12 K. Marx

## Abstract

In this article, we consider an approach to integrating geoinformation technologies and digital image processing methods aimed at increasing the efficiency of computer technologies in controlling complex distributed systems (CDS) in emergency situations. The analysis is conducted using an example of the activity of oil pipeline transport enterprises, including pipelines, oil pumping stations, administrative, repair and emergency response units. The novelty of the proposed version of integration of geoinformation technologies and digital image processing consists in the application of a set-theoretic approach to a uniform formal description of various types of spatial data, digital images and their interrelationships necessary for constructing three-dimensional models of production facilities of CDS. This has allowed criteria, composition and structure of these 3D models to be defined using different levels of detail of the object models in order to reduce the computational load and speed up the 3D visualization of objects of CDS. These are necessary to support the decision-making when responding to certain types of emergency situations. The advantage of the proposed approach is that it increases the efficiency of decision-making support in countering some emergencies, which, among others, is achieved through the use of three-dimensional visualization of technological and operational (obtained in the event of an accident) information about the production facilities of the CDS, whereas the quality and fullness of the optimized 3D model directly affect the decisions made in response to the emergencies. The developed methods and algorithms have been practically implemented when building 3D geoinformation models.

**Keywords:** geoinformation technologies, digital image processing, integration of geoinformation technologies and digital images, three-dimensional modeling of production facilities.

**Citation:** Pavlov SV, Sokolova AV, Christodulo OI. Integration of geographic information technologies and digital image processing for responding to emergency situations at oil pipeline transportation facilities. *Computer Optics* 2022; 46(3): 483-491. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-925.

**Acknowledgements:** This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-08-00301.

---

## Authors' information

**Sergey Vladimirovich Pavlov.** In 1977 he graduated from Bashkir State University with a degree in Mathematician, Computational Mathematics. Doctor of Technical Sciences, Professor of USATU. Honored Scientist of the Republic of Bashkortostan. Research interests: systems analysis, information systems, development of multidimensional data models, database integration, geographic information systems. E-mail: [psvgis@mail.ru](mailto:psvgis@mail.ru).

**Anna Vasilievna Sokolova.** In 2013 she graduated from the magistracy of the Ufa State Aviation Technical University with a degree in Information Systems and Technologies. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Geographic Information Systems department, Ufa State Aviation Technical University. Research interests: geographic information systems, spatial information processing. E-mail: [beldyanova@ya.ru](mailto:beldyanova@ya.ru).

**Olga Igorevna Christodulo.** In 1991 she graduated from the Ufa State Aviation Technical University with a degree in Automated Information Processing and Control Systems. Doctor of Technical Sciences, Head of Geographic Information Systems department, Ufa State Aviation Technical University. Research interests: systems analysis, design of corporate information systems, processing of spatial information. E-mail: [o-hristodulo@mail.ru](mailto:o-hristodulo@mail.ru).

---

*Received May 18, 2021. The final version – October 29, 2021.*

---