

А.Я. ФРИДМАН, В.Г. КУРБАНОВ
**ФОРМАЛЬНАЯ КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
ПРОМЫШЛЕННО-ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСА КАК
СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ
ЭКСПЕРИМЕНТОМ**

Фридман А.Я., Курбанов В.Г. Формальная концептуальная модель промышленно-природного комплекса как средство управления вычислительным экспериментом. Аннотация. В работе представлена ситуационная концептуальная модель, предназначенная для исследования динамических пространственных объектов, в частности, промышленно-природных комплексов (ППК), которая обеспечивает автоматизацию всех этапов вычислительного эксперимента с возможностью равноправной обработки информации от расчетных модулей, имитирующих составные части ППК, и интегрированных с ней ГИС и экспертной системы. Особенности предложенного подхода состоят в широком применении экспертных знаний, поддержке современных сценарных подходов к моделированию, использовании ГИС-технологии не только для графического представления составных частей объекта и результатов моделирования, но также для постановки задачи и выполнения пространственно-зависимых расчетов.

Ключевые слова: динамический пространственный объект, ситуационное управление, концептуальная модель, имитационное моделирование, принятие решений.

Fridman A. Ya., Kurbanov V. G. Formal Conceptual Model of Industry-Natural Complexes as a Mean to Organize Computing Experiments.

Abstract. The paper introduces a situational conceptual model designed to investigate complicated spatial systems, Industry-Natural Complexes (INCs) in particular, that provides automation of every modelling stage with possibilities to equally treat information from calculating modules, which simulate parts of an INC, and from integrated GIS and expert system. This approach is featured with wide usage of expert knowledge, employment of the GIS not for object mapping only, but for task setting, spatial-dependent calculations and modelling results' displaying as well.

Keywords: dynamical spatial object, situational control, conceptual model, simulation, decision-making.

1. Введение. Актуальность работы связана с растущими требованиями по экологическому и экономическому обоснованию производственных и управленческих решений, влияющих на различные аспекты функционирования промышленно-природных комплексов (ППК) - территорий, экосистем, технологий и т.д. Непосредственные экспериментальные воздействия на ППК по различным причинам (ограниченные временные рамки, опасность необратимых изменений, высокая стоимость и др.) обычно невозможны или нежелательны, поэтому основным методом изучения и прогнозирования поведения ППК при изменениях его структуры, параметров и внешних условий служит моделирование.

Моделирование таких объектов с достаточной для получения практически значимых результатов многосторонностью заставляет

рассматривать их как сложные пространственные динамические системы с переменной структурой, множественными внешними и внутренними связями. При этом должны учитываться разнообразные информационные, финансовые, материальные, энергетические потоки, необходимо предусматривать анализ последствий изменения структуры объекта, возможных критических ситуаций и т.п.

Как следует из названия, любой ППК включает как природные, так и технические объекты. Каждый такой объект может представлять собой многоуровневую систему подобъектов, связанных различными сигналами, которые моделируются потоками данных и трактуются в нашем подходе как ресурсы, используемые и/или расходуемые объектами в ходе их жизнедеятельности. Изменения ресурсов внутри объектов описываются некоторым набором процедур или функций, именуемых процессами. Для анализа поведения ППК и сравнения различных наборов значений ресурсов между собой обычно используются один или несколько критериев качества – функционалов, определенных на тех или иных наборах ресурсов. Принципиальное различие между природными и техническими объектами состоит в том, что структура и поведение первых непосредственно не зависят от воли человека, в том числе лица, принимающего решения (ЛПР), особенно когда это касается улучшения жизнедеятельности таких объектов. Соответственно, непосредственное управление природными объектами в анализируемой проблематике не осуществляется и далее в работе не рассматривается. Управление же техническими объектами исследуется преимущественно на уровне принятия решений об изменении (или сохранении) их структуры в зависимости от общего состояния и имеющихся тенденций развития ППК. Аналогичные подходы в настоящее время развиваются для систем поддержки принятия решений (СППР) в чрезвычайных [1] и нештатных [2] ситуациях. СППР такого типа отличаются от описываемой далее системы тем, что из-за особенностей предметной области, во-первых, основной акцент делается на ликвидацию последствий уже реализовавшейся ситуации и, во-вторых, преимущественно ориентируются на сетевые приложения разрабатываемых СППР. Задача же принятия решений по результатам моделирования ППК более традиционна для теории управления, неформально она может быть поставлена как выбор (из набора альтернативных вариантов) предпочтительной структуры реализации технических объектов, обеспечивающей требуемые характеристики их функционирования при приемлемом состоянии природных объектов.

Ядром любого программного продукта, поддерживающего постановку и проведение моделирования, – далее такой продукт называется

ся системой моделирования (СМ) – является та или иная модель предметной области, формализующая представления разработчиков СМ об объекте моделирования. Принципиальная неполнота знаний о сложных объектах существенно ограничивает применимость классических аналитических моделей и определяет ориентацию на использование опыта экспертов, что, в свою очередь, связано с созданием соответствующих средств формализации экспертных знаний и их встраиванием в СМ. Поэтому в современном моделировании существенно возросла роль такого понятия, как концептуальная модель предметной области (КМПО) [3]. Основой КМПО является не алгоритмическая модель передачи и преобразования данных, как в аналитических моделях, а декларативное описание структуры объекта и взаимодействия его составных частей. Таким образом, КМПО изначально ориентирована на формализацию знаний экспертов. В КМПО определяются элементы исследуемой предметной области и описываются отношения между ними, которые задают структуру и причинно-следственные связи, существенные в рамках определенного исследования. Создание концептуальной модели является первичным и основным (по потребляемым ресурсам) этапом моделирования, так как для сложных задач с большим объемом данных эта модель во многом определяет реализацию алгоритмов, характер программ и способы общения исследователей с компьютером.

В ходе моделирования сложных объектов класса ППК могут изменяться и уточняться понятия и связи предметной области, что приводит к необходимости реконструкции концептуальной модели и исключает априорное планирование вычислений. Процесс организации и проведения моделирования включает в себя этапы, которые, как правило, реализуются специалистами различных профилей – от эксперта по конкретной предметной области до программиста.

В связи с изложенным далее описывается ситуационная система моделирования (ССМ), обеспечивающая автоматизированную разработку и сопровождение древовидной ситуационной концептуальной модели (СКМ) для целей моделирования ППК с ориентацией на использование экспертных знаний [4, 5]. Обоснование термина «ситуационный» приведено ниже в Заключение.

При постановке задачи и подготовке процесса моделирования концептуальная модель предназначена для представления знаний о структуре исследуемой предметной области. В обеспечение возможности автоматизации последующих этапов моделирования осуществляется отображение модели предметной области на адекватную ей формальную систему. Этот переход реализуется в ходе построения СКМ путем задания каждому ее элементу некоторого формального описа-

ния. В результате, завершение построения СКМ соответствует переходу от неформальных знаний об исследуемой предметной области к их формальному представлению, допускающему только однозначную процедурную трактовку. Так обеспечивается автоматическая генерация корректных заданий на имитацию всей СКМ или ее частей.

2. Формальное описание СКМ. Концептуальная модель в настоящей работе базируется на представлении объекта моделирования в виде древовидного И-ИЛИ графа, отображающего иерархическую декомпозицию структурных элементов ППК в соответствии с их организационными связями.

Чтобы избежать вычислительных проблем, связанных с малыми изменениями данных, и обеспечить поддержку совместной расчетно-логической обработки данных, в ССМ выходными данными процедур обработки (исключение составляют данные, вычисляемые ГИС) могут быть только данные с дискретным конечным множеством значений (типа списков). Если значения некоторого данного есть строковые константы, то такое данное называется параметром (категория PAR), а имеющее числовые значения именуется переменной (категория VAR), и над ним можно выполнять определенные математические операции. Если результат вычислений представляет собой значение переменной, то он округляется до ближайшего значения из списка допустимых значений. В дальнейшем, если сказанное относится к данным любого разрешенного в ССМ типа (и к переменным, и к параметрам), употребляется термин «данное». Таким образом, множество имен *данных* делится на множества имен *переменных и параметров*:

$$\begin{aligned} D &::= \langle Var, Par \rangle, \quad Var ::= \{var_i\}, \quad i = \overline{1, N_v}; \\ Par & ::= \{par_j\}, \quad j = \overline{1, N_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

где: N_v и N_p – мощности этих множеств.

Символом $::=$ здесь и далее обозначается равенство по определению. При необходимости используются также другие символы языка БНФ (металингвистических формул Бэкуса-Наура).

Данные являются ресурсами (количественными характеристиками) объектов или процессов (категория RES), переменные могут также использоваться как настроечные параметры функций (критериев) качества функционирования элементов СКМ (категория ADJ). Соответственно, множество имен переменных делится на подмножество имен *ресурсов* элементов КМПО и подмножество имен *настроечных параметров* критериев качества функционирования этих элементов:

$$Var ::= \langle Res, Adj \rangle \quad (2)$$

Отдельную категорию (категию GIS) составляют графические характеристики объектов СКМ, непосредственно вычисляемые средствами ГИС. Все они относятся к переменным, но не рассматриваются как списки, поскольку могут использоваться только как входные ресурсы элементов модели и не меняются в ходе имитации.

Объекты СКМ имеют три основные характеристики: имя, функциональный тип, который определяет структуру и функции объекта и используется в процессе анализа корректности СКМ, и имя суперобъекта, доминирующего данный объект в СКМ (отсутствует для объекта верхнего уровня). По положению в дереве объектов и на карте выделяются три категории объектов КМ: примитивы (категория LEAF), структурно неделимые с точки зрения глобальной цели моделирования, элементарные объекты (категория GISC), географически связанные с одним ГИС-элементом (полигоном, дугой или точкой какого-либо покрытия), и составные объекты (категория COMP), состоящие из элементарных и/или составных объектов. Структура объектов категории GISC в СКМ может быть достаточно сложной, но все их подобъекты имеют одну и ту же географическую привязку. Множество объектов имеет вид:

$$O = \{ \alpha o_{\beta\alpha}^{\gamma} \} ::= \sum_{\alpha=1}^{N_L} O_{\alpha}, \quad (3)$$

где: $\alpha = \overline{1, N_L}$ – номер уровня дерева объектов, к которому относится данный объект (L - общее количество уровней декомпозиции);

$\beta_{\alpha} = \overline{1, N_{\alpha}}$ – порядковый номер объекта на его уровне декомпозиции;

$\gamma = \overline{1, N_{\alpha-1}}$ – порядковый номер суперобъекта, доминирующего данный на вышележащем уровне;

O_{α} – множество объектов, принадлежащих уровню с номером α .

Для обеспечения связности СКМ принимается, что существует единственный суперобъект, доминирующий все объекты первого уровня декомпозиции, то есть справедливо соотношение:

$$O_1 ::= \{ \beta_1^0 \}, \beta_1 = \overline{1, N_1}. \quad (4)$$

Процессы в СКМ отображают преобразования данных и реализуются различными способами в зависимости от присвоенной процессу одной из трех следующих категорий: внутренние процессы (категория INNER), все их входные и выходные данные относятся к одному объекту); внутриуровневые процессы (категория INTRA), связываю-

щие объекты СКМ, не подчиняющиеся друг другу; межуровневые процессы (категория INTER), описывающие передачу данных между объектом и подобъектами или между объектом и суперобъектом. Введенное категорирование процессов несколько усложняет процесс создания СКМ (в некоторых случаях может потребоваться создавать фиктивные процессы, обеспечивающие такую типизацию), но позволяет сделать процедуры формального контроля СКМ значительно более полными и детальными.

Основными характеристиками процессов являются: уникальное имя, характеристика исполнителя процесса и функциональный тип процесса, который определяет тип преобразований, им осуществляемых, и используется в процессе анализа корректности СКМ; дополнительно используются список входных и выходных данных и их допустимых граничных значений. Исполнитель процесса определяет его динамические свойства и способ реализации в компьютере. Исполнитель можно задать либо непосредственно (в виде разностного уравнения), либо косвенно - ссылкой на имя реализующего этот процесс программного модуля.

Схема концептуальной модели в ССМ имеет вид:

$$S_{CCM} ::= \langle O, P, D^{CM}, H, OP, PO, U \rangle, \quad (5)$$

где: O – множество объектов КМПО, определенное в (3);

$P ::= \{p_n\}, n = \overline{1, N_p}$ – множество процессов КМПО;

$D^{CM} \subseteq D$ – множество данных концептуальной модели, где D задано соотношениями (1), (2), а структура множества D^{CM} поясняется ниже;
 H – отношение иерархии объектов, которое с учетом (3) и (4) принимает вид:

$$H = \sum_{\alpha=1}^{N_{L-1}} H_{\alpha},$$

где: $H_{\alpha} \subseteq O_{\alpha-1} \times B'(O_{\alpha})$ – отношения иерархии для каждого из уровней дерева объектов, причем $B'(O_{\alpha})$ есть разбиение множества O_{α} ;

$OP \subseteq O \times B(P)$ – отношение «объект – порождающие его выходные данные процессы», причем $B(P)$ есть разбиение множества P ;

$PO \subseteq P \times B(O)$ – отношение «процесс – создающие его входные данные объекты»;

$U ::= U_p \cup U_0$ – отношение, формализующее управление процессом вычислений на основе СКМ, имеет составляющие следующего вида:

$U_p \subseteq P \times B(Res)$ – отношение «процесс – управляющее данное»;

$U_o \subseteq O \times B(Res)$ – отношение «объект – управляющее данное».

Отношение «объект (процесс) – управляющее данное» ставит в соответствие некоторому объекту (процессу) модели данное, которое доопределяет этот объект при переходе к алгоритмической интерпретации. Передача данных между объектами осуществляется только через списки входных и выходных данных этих объектов, что согласуется с принципами инкапсуляции данных, принятыми в современном объектно-ориентированном программировании. Все процессы, приписанные к одному объекту, описываются отношением $OA \subseteq O \times B(P)$ «объект – приписанные к нему процессы». Это отношение не входит в схему КМПО, поскольку, в отличие от отношений H , OP и PO , не задается пользователем при конструировании модели, а формируется автоматически.

Отношения, определенные в модели, удобно представлять в форме функций (6), частично определенных на множествах O и P , областями значений которых являются $B(P)$, $B(O)$ или $B'(O_\alpha)$. Названия функций обозначены строчными символами, соответствующими прописным символам в названиях отношений:

$$\begin{aligned}
 h_\alpha : O_{\alpha-1} &\rightarrow B'(O_\alpha), (\forall o_j \in O_\alpha, \forall o_i \in O_{\alpha-1}) ((o_j = h_\alpha(o_i)) \Leftrightarrow o_j H_\alpha o_i); \\
 op : O &\rightarrow B(P), (\forall o_i \in O, \forall p_j \in P) ((p_j = op(o_i)) \Leftrightarrow o_i OP p_j); \\
 po : P &\rightarrow B(O), (\forall o_i \in O, \forall p_j \in P) ((o_i = po(p_j)) \Leftrightarrow p_j OP o_i); \\
 oa : O &\rightarrow B(P), (\forall o_i \in O, \forall p_j \in P) ((p_j = oa(o_i)) \Leftrightarrow o_i OA p_j); \\
 u_p : P &\rightarrow B(Res), (\forall p_i \in P, \forall res_j \in Res) ((res_j = u_p(p_i)) \Leftrightarrow p_i U_p res_j); \\
 u_o : O &\rightarrow B(Res), (\forall o_i \in O, \forall res_j \in Res) ((res_j = u_o(o_i)) \Leftrightarrow o_i U_o res_j).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Множества значений функций (6), соответствующие сечениям областей значений введенных отношений по некоторому элементу областей их определения, обозначаются жирным шрифтом:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{h}_\alpha(o_i) &::= \{o_j : o_j = h_\alpha(o_i)\}, \quad \mathbf{op}(o_i) ::= \{p_j : p_j = op(o_i)\}, \\
 \mathbf{po}(p_j) &::= \{o_i : o_i = po(p_j)\}, \quad \mathbf{oa}(o_i) ::= \{p_j : p_j = oa(o_i)\}, \\
 \mathbf{u}_p(p_i) &::= \{res_j : res_j = u_p(p_i)\}, \quad \mathbf{u}_o(o_i) ::= \{res_j : res_j = u_o(o_i)\}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Аналогично (7) обозначаются сечения введенных отношений по некоторым подмножествам их областей определения, которые опреде-

ляются как объединения всех сечений по элементам этих подмножеств. Например, $h_\alpha(O_i)$, где $O_i \subseteq O_{\alpha-1}$, есть множество объектов уровня α , доминируемых данным подмножеством объектов $o_i \in O_i$, которые находятся на уровне $\alpha - 1$. Ниже в формулах также используется множество подчиненности объекта $o_i \stackrel{\alpha}{=} h^\alpha(o_i) ::= \bigcup_{\alpha \leq k \leq L} h_k^\alpha(o_i)$.

Модель атрибутов СКМ образуется кортежем:

$$A_{CCM} ::= \langle N, \mathbf{T}, \mathbf{n}, \mathbf{E}, \mathbf{T}_e, \mathbf{t}, \mathbf{t}_e, T_h, t_{ho} \rangle,$$

где: $N ::= \langle N_p, N_o, N_r \rangle$ и $\mathbf{T} ::= \langle T_p, T_o, T_r \rangle$ – множества имен и типов процессов, объектов и ресурсов соответственно;

$\mathbf{E} ::= \langle E_p, E_o, E_r \rangle$ и $\mathbf{T}_e ::= \langle T_{ep}, T_{eo}, T_{er} \rangle$ – множества имен и типов исполнителей процессов, объектов и ресурсов соответственно;

$\mathbf{n} ::= \langle n_p, n_o, n_r \rangle$, $\mathbf{t} ::= \langle t_p, t_o, t_r \rangle$, $\mathbf{t}_e ::= \langle t_{ep}, t_{eo}, t_{er} \rangle$, где:

$$n_p : P \rightarrow N_p; \quad n_o : O \rightarrow N_o; \quad n_r : D^{CM} \rightarrow N_r;$$

$$t_p : P \rightarrow T_p; \quad t_o : O \rightarrow T_o; \quad D^{CM} \rightarrow T_r;$$

$$t_{ep} : P \rightarrow T_{ep}; \quad t_{eo} : O \rightarrow T_{eo}; \quad t_{er} : D^{CM} \rightarrow T_{er}$$

– функции, описывающие текущий набор элементов СКМ;

$T_h ::= \{\&, \vee, *\} \cup N$ (N – множество натуральных чисел) – множество типов отношений иерархии объектов, причем в качестве отношения классификации используется строго дизъюнктивное «или»;

$t_{ho} : O \rightarrow T_h$ – функции, задающие отношения иерархии объектов.

Разработанные алгоритмы присвоения категорий элементам СКМ используют вышеописанные отношения и выявляют все возможные ошибки категоризирования элементов модели [4]. Процедуры контроля правильности назначений исполнителей элементов СКМ используют следующие ограничения (доказательства даны в [4]).

Теорема 1. В конечной СКМ не может иметь места рекурсивная декомпозиция типов исполнителей объектов, то есть ни один объект, входящий во множество подчиненности некоторого объекта, не может иметь исполнителя того же типа, что и исходный объект.

Теорема 2. В конечной СКМ не может иметь места инверсия подчиненности исполнителей объектов, то есть ни один объект, входящий во множество подчиненности некоторого объекта с исполнителем типа e_1 , не может иметь исполнителя того же типа, что и любой другой объект, во множестве подчиненности которого содержится какой-либо объект с исполнителем типа e_1 .

3. Модели подсистем ССМ. Проведенная параметризация схемы СКМ дает возможность уточнить основные характеристики объекта исследования, а также более детально описать модели основных подсистем ССМ, к которым относятся ГИС, ЭС, база данных предметной области и библиотека «вычислительных» программных модулей, обеспечивающих реализацию процессов и ресурсов СКМ в ходе имитации. Эта подсистема называется библиотекой исполнителей элементарных задач (БИЭЗ).

Формализация подсистемы ГИС. Одно из достоинств ГИС в рамках рассматриваемой задачи заключается в том, что с каждым графическим элементом можно связать дополнительные поля БД, доступные для модификации внешними вычислительными модулями, в отличие от графических атрибутов. В частности, эти поля можно использовать для хранения атрибутов концептуальной модели, относящихся к данному элементу, и других параметров, необходимых для организации и проведения моделирования.

Множество данных (1), (2) с учетом (5) можно разбить на следующие попарно не пересекающиеся подмножества:

$$D ::= D^{CM} \cup D^{ES} \cup D^{GIS} \cup D^{DB} \cup D^C ::= D^{LIST} \cup D^{GIS}, \quad (8)$$

где: D^{CM} – данные, описывающие концептуальную модель ППК;

D^{ES} – внутренние данные ЭС, встроенной в ССМ;

D^{GIS} – графические характеристики объектов модели, поступающие от ГИС;

$D^{DB} ::= D^{ED} \cup D^{SC}$ – внешние данные, состоящие из экспериментальных данных и данных сценариев;

D^C – подмножество общих данных (“common”), используемых и СКМ, и ЭС;

D^{LIST} – подмножество данных, имеющих списковый формат.

Все элементы множества D^{GIS} по определению относятся к множеству Res (2), элементы остальных перечисленных подмножеств множества данных могут относиться как к переменным, так и к параметрам (см. (1)).

Множество D^C разбивается на два непересекающихся подмножества, в первое из которых входят ресурсы, исполнителем которых является ЭС, а во второе – входные и выходные ресурсы процессов, исполняемых экспертной системой:

$$D^C ::= D^{CR} \cup D^{CP}, \quad D^{CR} \cap D^{CP} = \emptyset, \quad \text{где:}$$

$$D^{CR} ::= \{d_k \in D : t_{er}(d_k) = ES\};$$

$$D^{CP} ::= \{d_k \in D : d_k \in (list_in(p_1 : t_{ep}(p_1) = ES) \vee list_out(p_m : t_{ep}(p_m) = ES))\} \quad (9)$$

а обозначения $list_in(*)$ и $list_out(*)$ здесь и далее определяют множества входных и выходных ресурсов элементов модели, заданных условиями внутри скобок.

В свою очередь, последнее множество можно представить как объединение двух, возможно, пересекающихся подмножеств входных и выходных переменных СКМ:

$$D^{CP} ::= D_{in}^{CP} \cup D_{out}^{CP}. \quad (10)$$

В базу данных предметной области (БДПО) входят все элементы подмножества D^{DB} (они имеют тип исполнителя DB или GEN) и те элементы подмножества D^{CM} , которым присвоен тип исполнителя SMP, а также элементы множества D^{GIS} , но в режиме «только для чтения», как и экспериментальные данные. В частности, в БДПО сохраняются элементы множества D^{CM} , представляющие собой характеристики модификации ГИС-элементов СКМ (параметры допустимых операций над ГИС-элементами). Эти параметры используются для представления и сопоставления результатов моделирования на картографической основе. Указанная специфическая возможность ввода данных в ГИС показана ниже на рис. 1 стрелкой от D^{CM} к ГИС.

Множество объектов (4) разбивается на попарно не пересекающиеся подмножества по категориям объектов:

$$O ::= O^{LEAF} \cup O^{COMP} \cup O^{GISC}. \quad (11)$$

Если к множеству (11) добавить множество элементарных объектов ГИС, то получим все множество объектов КМПО:

$$O' ::= O \cup O^{ELEM},$$

причем множество ГИС-элементов, типы которых должны начинаться со стандартных типов элементов ГИС (обозначено символом ∞), задается соотношением:

$$O^{GIS} ::= O^{GISC} \cup O^{ELEM} ::= \{o_i \in O' : t_o(o_i) \in ("dot" \vee "arc" \vee "pol")\}. \quad (12)$$

Каждый из ГИС-элементов (элементов множества (12)) в ГИС хранится в виде двух- или трехмерного (в зависимости от типа ГИС)

конечного массива координат. Далее без потери общности рассматривается двумерная ГИС, все объекты которой задаются на декартовом произведении конечных множеств координат $X \times Y$. Конечность этих множеств (наряду со списковым форматом данных) обосновывает возможности анализа ППК в классе дискретных систем. Структура ГИС-элементов описывается отношением «объект ГИС – координаты объекта» OC , ставящим в соответствие каждому элементу множества (12) декартово произведение некоторых равномошных подмножеств множеств X и Y , и функцией определения типа ГИС-элемента, аналогичной функции t_o (см.(9)). Однако при формировании этого отношения следует учесть две дополнительные особенности представления информации в ГИС:

— множество координат, соответствующее некоторому объекту ГИС, зависит от масштаба $m_i \in M$ карты (M – заданное множество масштабов), на которой он рассматривается (с уменьшением масштаба растет размерность множеств X и Y);

— ГИС-тип некоторого объекта, заданный в определении множества (12), также в принципе зависит от m_i (с уменьшением масштаба точка или линия могут превратиться в полигон, а полигон может превратиться в полигон с анклавами).

Поэтому функция определения типа для ГИС-элементов задается соотношением (13), а отношение OC имеет вид (14):

$$t_o^{GIS} : O^{GIS} \times M \rightarrow T_o^{GIS}, \quad (13)$$

где: T_o^{GIS} – разрешенное множество типов ГИС-элементов, которое в общем случае определяется типом используемой ГИС.

$$OC \subseteq O^{GIS} \times M \times B(X) \times B(Y). \quad (14)$$

Для отношения (14) аналогично функциям (8) можно ввести частичную функцию (15), возвращающую множество точек отображения заданного объекта в ГИС на карте заданного масштаба:

$$oc : O^{GIS} \times M \rightarrow B(X) \times B(Y) \quad (15)$$

для которой можно определить сечения аналогично (7).

Разрешенные типы данных ГИС, поступающих в другие подсистемы ССМ, зависят от типа и количества объектов, для которых вычисляются эти данные. Далее без потери общности рассматривается наиболее распространенный на практике случай, когда графические

характеристики вычисляются только для одиночных ГИС-элементов и пар таких элементов. Тогда по аналогии с функцией t_r (9) для ГИС-элементов необходимо ввести две функции описания типов графических данных: первую для одиночных объектов ГИС, а вторую – для их пар:

$$t_{r1}^{GIS} : T_o^{GIS} \rightarrow T_r^{GIS}; \quad (16)$$

$$t_2^{GIS} : T_o^{GIS} \times T_o^{GIS} \rightarrow T_r^{GIS}, \quad (17)$$

где T_r^{GIS} - разрешенное множество типов графических характеристик ГИС-элементов, которое в общем случае определяется типом и макроязыком используемой ГИС.

Функции (16), (17) дают исходную информацию для формирования наборов одно- и двухместных стандартных функций ГИС F_1^{GIS} и F_2^{GIS} соответственно, использование которых при конструировании СКМ формализуется отношениями «ГИС-объект (или пара ГИС-объектов) – графическая характеристика»:

$$OD_1^{GIS} \subseteq oc(O^{GIS}, M) \times F_1^{GIS};$$

$$od_2^{GIS} : oc(O^{GIS}, M) \times oc(O^{GIS}, M) \rightarrow F_2^{GIS}.$$

для которых также можно ввести (в общем случае неоднозначные) частичные функции, возвращающие значения той или иной графической характеристики:

$$od_1^{GIS} : oc(O^{GIS}, M) \rightarrow F_1^{GIS} \quad (18)$$

$$od_2^{GIS} : oc(O^{GIS}, M) \times oc(O^{GIS}, M) \rightarrow F_2^{GIS}. \quad (19)$$

Функции (18), (19) дают макроописание библиотеки стандартных функций и макрокоманд ГИС, с их помощью текущее значение любого ресурса категории GIS может быть представлено в виде (20) или (21), где $o_l, o_j \in O^{GIS}$, $m_i \in M$:

$$res_{1k} \in D^{GIS} = od_1^{GIS}(oc(o_j, m_i)); \quad (20)$$

$$res_{2k} \in D^{GIS} = od_2^{GIS}(oc(o_j, m_i), oc(o_l, m_i)) \quad (21)$$

С помощью введенных выше отношений иерархии любой составной объект СКМ однозначно сопоставляется с некоторым подмножеством множества (12). Показано, что множество подчиненности

$\underline{h}^a(o_i)$ (см. (7)) любого объекта, не относящегося к ГИС-элементам, можно представить как объединение «основного подмножества» подчиненных ему ГИС-элементов, которые присутствуют в любой альтернативной структуре этого объекта, и множества альтернативных ГИС-элементов, появляющихся при той или иной реализации объекта:

$$\left(\forall o_i \in O \setminus O^{GIS}\right) \left(\underline{h}^a(o_i) = O_0(o_i) \cup Alt(o_i)\right),$$

где символом \setminus обозначена операция вычисления разности множеств, а

$$Alt(o_i) := \bigcup_{j=1}^n O_j(o_i),$$

причем $O_j(o_i) \subset O^{GIS}$, $j = \overline{0, n}$; $O_0(o_i) \cap O_j(o_i) = \emptyset$, $j = \overline{1, n}$.

Во множество O_0 входят те ГИС-элементы, которые не имеют суперобъектов, атрибутированных типом декомпозиции ИЛИ. ГИС-представление любой конкретной структуры ППК реализуется множеством O_0 и одним из множеств O_j :

$$Alt_j(o_i) := O_0(o_i) \cup O_j(o_i).$$

Можно утверждать, что для природных объектов, входящих в состав ППК, альтернативы реализации отсутствуют, то есть:

$$Alt(o_i) := \emptyset \tag{22}$$

Соотношение (22) рассматривается как ограничение на допустимые структуры ГИС-представлений природных объектов в отличие от технических объектов, для которых допустимы (и обычно представляют интерес для сопоставительного моделирования) альтернативные структуры ГИС-реализации.

Следующим и основным по сложности компонентом ССМ является комплекс сопровождения «вычислительных» программных модулей, обеспечивающих моделирование объекта в динамическом режиме. В него входят средства анализа корректности заданных описаний, планирования процесса моделирования (дополняющие возможности ГИС), выбора (формирования) и анализа сценариев развития исследуемого объекта, а также сама библиотека программных модулей для реализации моделей предметной области на компьютере.

Формальное описание БИЭЗ и ЭС. БИЭЗ содержит функции и программные модули, реализующие в ходе имитации процессы СКМ согласно их описаниям в пространстве состояний. В качестве управлений на входы этих исполнителей поступают элементы множеств D^{CR}

(9), D_{in}^{CP} (10), и может поступать часть элементов множеств D^{GIS} и D^{DB} (8), а результатом их работы являются элементы множества D^{CM} (8). Поэтому для описания выполняемых БИЭЗ преобразований данных аналогично (14) введено отношение «управляющие данные – выходные данные» (или просто «вход-выход»):

$$IO^{EXEC} \subseteq D^{CR} \times D_{in}^{CP} \times D^{GIS} \times D^{DB} \times F^{EXEC} \quad (23)$$

и частичная функция, возвращающая имена векторов текущих значений выходных переменных:

$$io^{EXEC} : D^{CR} \times D_{in}^{CP} \times D^{GIS} \times D^{DB} \rightarrow F^{EXEC}, \quad (24)$$

где: $F^{EXEC} \subseteq list_out(P_{cyu})$ – множество выходов набора процессов $P_{cyu} \subseteq oa(O)$, существенных для функционирования модели. Тогда элементы множества D^{CM} представляют собой выходы функции (24):

$$\left(\forall res_k \in D^{CM} \right) \left(res_k = io^{EXEC} (*) \right) \quad (25)$$

для некоторого корректного набора входных данных, условно обозначенных в (25) символом *.

Описание преобразований данных в ЭС строится так же, как для БИЭЗ, за тем отличием, что входными сигналами ЭС являются элементы множества D_{out}^{CP} (10) и множества внутренних данных ЭС D^{ES} (8), а выходными сигналами - элементы множеств D^{CR} (9) и D_{in}^{CP} (10). Аналогично (23) – (25) имеем:

$$IO^{ES} \subseteq D_{out}^{CP} \times D^{ES} \times \left(D^{CR} \cup D_{in}^{CP} \right); \quad io^{ES} : D_{out}^{CP} \times D^{ES} \rightarrow F^{ES}, \quad (26)$$

где: F^{ES} – множество нелистьевых данных ЭС. Элементы множества $D^{CR} \cup D_{in}^{CP}$ представляют собой выходы функции (26):

$$\left(\forall d_k \in \left(D^{CR} \cup D_{in}^{CP} \right) \right) \left(d_k = io^{ES} (*) \right)$$

Отношение множеств и элементов, описанных выше, иллюстрируется на рисунке 1.

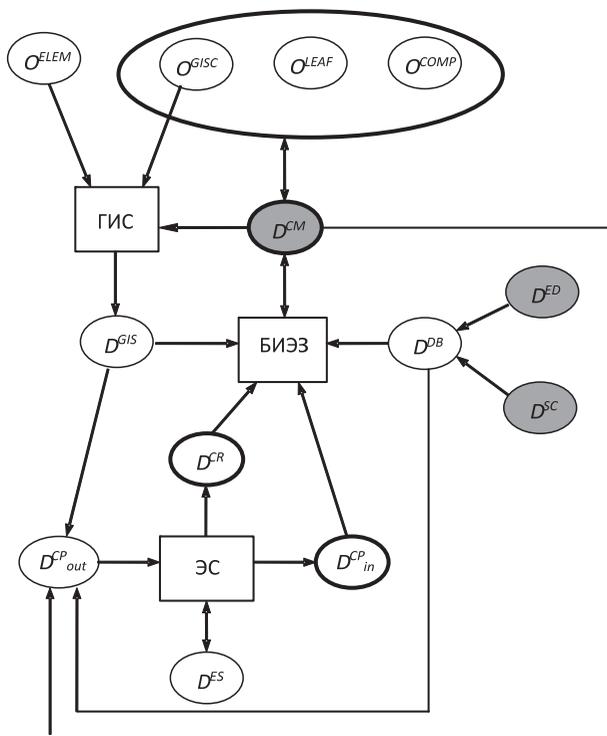


Рис. 1. Схема преобразования данных подсистемами ССМ

На рисунке 1 затенены элементы, структурно входящие в БДПО, а жирными рамками обведены элементы СКМ. Часть элементов множества D^{CM} (8) относится к БДПО, а часть – к СКМ.

4. Основные принципы контроля корректности КМПО. В дальнейшем автоматическом анализе СКМ используются новые понятия и отношения между элементами модели [4], вводимые следующими определениями. Доказательства свойств этих отношений для корректной СКМ здесь не приводятся ввиду ограничений объема настоящей публикации.

Определение 1. Отношением порождения объектов называется отношение «объект – порождающие его выходные ресурсы объекты» $OO \subseteq O \times B(O)$, ставящее в соответствие каждому объекту СКМ все другие объекты, ресурсы которых непосредственно (без участия других промежуточных объектов) используются для порождения выходных ресурсов данного объекта.

Теорема 3. $oo(o_i) = po(oo(o_i)) \setminus \{o_i\}$.

Определение 2. Отношением порождения процессов называется отношение «процесс – непосредственно необходимые для его функционирования процессы» $PP \subseteq P \times B(P)$, ставящее в соответствие каждому процессу СКМ все другие процессы, выходные ресурсы которых непосредственно (без участия других промежуточных процессов) используются для порождения входных ресурсов данного процесса.

Теорема 4. $pp(p_i) = op(po(p_i) \setminus \{oa^{-1}(p_i)\})$

Для выявления имеющихся в модели циклов предложены алгоритмы контроля корректности отношений порождения [4]. В отличие от основного прототипа рассматриваемой СКМ – концептуальной модели [6], где любые циклы в отношениях порождения запрещались, поскольку не предусматривался учет количества ресурсов, – в данной СКМ нарушения в работе объекта, вызванные цикличностью, выявляются в имитационном режиме, и сама по себе цикличность не всегда является конфликтом. Более того, в ряде приложений, например, моделирующих экономические отношения между объектами модели, цикличность взаимодействия элементов предметной области является их естественным или типичным свойством. Поэтому выявленные циклы утверждаются или запрещаются пользователем в зависимости от семантики предметной области. Безусловно запрещаются только пути между объектами или процессами, реализующими альтернативные варианты структуры предметной области, объектами-синонимами и объектами из их множеств подчиненности. Но иерархическая структура отображения объекта исследования, принятая в ССМ, накладывает несколько иные ограничения, отражающие базовые требования теории иерархических систем к организации взаимодействий между компонентами модели. Так, в силу необходимости реализации принципа приоритета действия суперобъектов [7] на их подобъекты для объектов СКМ запрещается наличие путей (для потоков материальных ресурсов) между объектами, связанными отношениями подчинения, поскольку такие пути идут «в обход» межуровневых процессов настройки и агрегирования данных и могут привести к неконтролируемому нарушению условий координации работы элементов иерархии. Для корректной реализации того же принципа контролируются отношения следования между параметрами межуровневых процессов. Кроме того, ниже вводятся дополнительные ограничения для реализации выбранного метода декомпозиции глобального объекта (стратификации, слойного или пошелонного разделения).

Все алгоритмы контроля отношений порождения используют транзитивные замыкания отношений порождения объектов и процессов (Определения 1 и 2), которые далее обозначаются OO^* и PP^* соответственно. По аналогии с введенными выше обозначениями, например, запись $o_i \in oo^*(o_j)$ означает, что $o_i \in oo(o_j)$ или существуют o_k, o_1, \dots, o_n , такие, что $o_k \in oo(o_j), o_1 \in oo(o_k), \dots, o_i \in oo(o_n)$.

Поскольку среди всех элементов СКМ именно процессы играют определяющую роль в моделировании и порождении различных ресурсов объекта исследования, для каждого из них выполняется специальная процедура контроля, гарантирующая нормальное функционирование модели процесса в имитационном режиме. В этой группе алгоритмов используется новое определение шаблона некоторого процесса модели как подструктуры СКМ. Шаблон описывает процесс преобразования минимального набора ресурсов, поступающих из других объектов в объект, к которому приписан процесс-владелец шаблона, и необходимых для функционирования этого процесса.

Схема шаблона в ССМ, как часть схемы СКМ, имеет аналогичный (5) вид:

$$S_{\text{ш}} ::= \langle O_{\text{ш}}, P_{\text{ш}}, H_{\text{ш}}, OP_{\text{ш}}, PO_{\text{ш}}, U_{\text{ш}} \rangle, \quad (27)$$

где:

$$O_{\text{ш}} \subset O; P_{\text{ш}} \subset P; H_{\text{ш}} \subset H; U_{\text{ш}} \subseteq U;$$

$$OP_{\text{ш}} \subseteq O_{\text{ш}} \times B(P_{\text{ш}}) \subset OP; PO_{\text{ш}} \subseteq P_{\text{ш}} \times B(O_{\text{ш}}) \subset PO.$$

Теорема 5:

$$O_{\text{ш}} = po(pp(p_i)); \quad (28)$$

$$P_{\text{ш}} = pp(p_i) \cup (oa(po(p_i)) \cap (pp^*(p_i) \cup (pp^*)^{-1}(p_i)))$$

Теорема 6. Корректные относительно правил назначения имен и отношений концептуальные модели ССМ разрешимы, если разрешимы все входящие в их состав шаблоны процессов категории INTRA и процессов агрегирования.

Следующий этап анализа СКМ предусматривает контроль неявно заданных отношений следования, который в ССМ особенно ответственен для межуровневых процессов, обеспечивающих существование иерархии объектов и ответственных за решение основных для иерархических систем вопросов согласования и координации взаимодействий между подсистемами объекта исследования.

Исходным при анализе отношений следования является не объект или процесс, как в представленных ранее процедурах анализа, а конкретный ресурс (настроечный параметр или выход процесса вычисления функции качества некоторого объекта), и цель анализа состоит в контроле и запрете наличия циклов по этому ресурсу, поскольку ресурсы рассматриваемой группы являются чисто информационными и не предполагают итеративных процессов вычисления. Анализ отношений следования проводится путем построения сечений транзитивных замыканий отношений порождения процессов (Определение 2), причем начальным процессом служит процесс, порождающий исследуемый ресурс. На каждом шаге построения сечений множество процессов, для которых строятся сечения отношения порождения процессов (см. теорему 4), пополняется процессами, полученными на предыдущем шаге. Соотношения (29) задают подмножества процессов $P_k(p_i) \subset B(P)$, для которых должны строиться сечения отношения порождения процессов на k -том шаге ($k ::= 0, 1, 2, \dots, n_i$) анализа для процесса $p_i \in P$:

$$\begin{aligned} P_0(p_i) &::= \{p_i\} \\ P_{k+1}(p_i) &::= P_k(p_i) \cup \mathbf{pp}(P_k(p_i)). \end{aligned} \quad (29)$$

На некотором шаге k процесс построения сечений (29) прерывается и диагностируется конфликт, если на этом шаге во множестве $P_k(p_i)$ найдены процессы, удовлетворяющие заранее заданному условию. В противном случае процесс продолжается до момента, когда множества $P_k(p_i)$ и $P_{k+1}(p_i)$ совпадут, это условие трактуется как отсутствие конфликтов по заданному ресурсу.

Основное условие констатации конфликта, гарантирующее корректную реализацию принципа приоритета действий, в этом случае имеет вид:

$$(\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) \left((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta < \alpha) \right). \quad (30)$$

Для дополнительных условий констатации конфликта пользователь может выбрать различные опции, например:

— дополнительно запретить использование информации от объектов равного ранга, при этом строгое неравенство в условии (30) заменяется знаком «меньше или равно»:

$$(\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) \left((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta \leq \alpha) \right);$$

— запретить обмен информацией между объектами различного подчинения, тогда во множествах (29) допускаются только процессы, приписанные к таким объектам, которые связаны с исходным объектом отношениями подчинения. Дополнительное условие констатации конфликта для этой опции принимает вид:

$$(\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) \left((oa^{-1}(p_m) \notin \underline{h}(oa^{-1}(p_i))) \right);$$

— разрешить обмен информацией только между объектами, отстоящими от исходного не более чем на $\Delta\alpha$ уровней, тогда во множествах (29) допускаются только процессы, приписанные к таким объектам. Дополнительное условие констатации конфликта для этой опции аналогично (30), но в нем вместо неравенства $\beta < \alpha$ используется: другое неравенство:

$$(\exists p_m \in P_{k+1}(p_i)) \left((oa^{-1}(p_m) \in O_\alpha) \wedge (oa^{-1}(p_i) \in O_\beta) \wedge (\beta > \alpha + \Delta\alpha) \right).$$

Допускается совместное использование перечисленных дополнительных условий, если они не противоречат друг другу. Полученные результаты позволяют установить описательные возможности СКМ:

Теорема 7. СКМ описывает все основные типы иерархий, рассматриваемые общей теорией иерархических систем (стратифицированные, многослойные и многоэшелонные иерархии) [7].

5. Заключение. Для организации вычислительного эксперимента над представленной выше СКМ ситуационный подход [8] распространен одним из авторов на проблему моделирования нестационарных ППК [4] с возможностью анализа надежности и безопасности таких систем [5]. Для СКМ даны формальные определения факта и ситуации. Они выходят за рамки данной работы и приведены в публикациях [4, 5]. Здесь следует лишь отметить некоторые методические отличия выполненной разработки от прототипов:

иерархическая КМПО применяется не только для фиксации структуры объекта и статического контроля взаимосвязей компонентов объекта, но и как основное средство обработки ситуаций на всех этапах моделирования. На этапе постановки задачи моделирования КМПО управляет выбором релевантных исходных данных, участвует в процедурах пополнения и доопределения ситуаций. При реализации имитационного режима КМПО диспетчирует вызов программных модулей и управление потоками данных. По завершении расчетов эта

модель организует распределение результатов по модулям хранения и представление результатов моделирования;

относительное пространственное расположение составных частей объекта, отображаемое средствами ГИС, используется как естественная основа при построении иерархии объектов КМПО, графические атрибуты ГИС-представления объекта входят в критерии качества компонентов КМПО и участвуют в определении концептуального уровня реализации текущей ситуации;

знания экспертов используются не только при построении КМПО, но и непосредственно управляют логическим выводом в ходе доопределения, обобщения и классификации ситуаций;

предусмотрена возможность назначения экспертной системы исполнителем процессов и ресурсов КМПО, это позволяет непосредственно применять экспертные знания для создания «быстрых прототипов» ССМ, а также повысить детальность и адекватность формального анализа СКМ;

разработанные структуры и интерфейсы данных позволили унифицировать процедуры обработки числовых и ранжированных данных в процессе моделирования, то есть организовать совместную логико-аналитическую обработку данных;

СКМ по терминологии ситуационного управления относится к семиотическим моделям, для обработки ситуаций в ее рамках разработаны три группы логико-трансформационных правил, хранимых в ЭС ССМ и используемых при реализации предложенных методов пополнения, классификации и обобщения ситуаций.

Область применимости ССМ ограничена комплексами, допускающими древовидную декомпозицию и представление их компонентов в виде ограниченного множества ГИС-элементов.

ССМ предоставляет ЛПР алгоритмическую поддержку для обоснования его решений об изменении или сохранении структуры подчиненного ему объекта и в этом смысле является альтернативой экспертному совету. Подобные обоснования целесообразны как в случае отсутствия достаточного количества экспертов, так и при ограниченных возможностях их приглашения (по временным, финансовым или иным соображениям). По мнению авторов, ССМ может служить оболочкой при создании современных систем административного управления на различных организационных уровнях. В исследовательских целях ССМ применима для разработки сектора Интернета (Modelling WEB), обеспечивающего автоматизированный поиск и интегра-

цию в ССМ требующихся в текущей задаче моделей, созданных специалистами различных профилей для решения своих задач.

Литература

1. *Кравченко Б.В., Черкасов Д.Н.* Системы интеллектуальной поддержки принятия управляющих решений при ликвидации последствий ЧС // URL: <http://mars.biophys.msu.ru/awse/CONFER/MCE99/149.htm> (дата обращения: 06.09.2014).
2. *Геловани В.А., Бритков В.Б.* Системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием современной информационной технологии // URL: <http://sr.isa.ac.ru/sr-95-96/gelbrit3.html> (дата обращения: 06.09.2014).
3. *Цаленко М.Ш.* Моделирование семантики в базах данных // М.: Наука. 1989. 288 с.
4. *Фридман А.Я., Фридман О.В., Зуенко А.А.* Ситуационное моделирование природно-технических комплексов // СПб.: Изд-во Политех. ун-та. 2010. 436 с.
5. *Фридман А.Я., Курбанов В.Г.* Ситуационное моделирование надежности и безопасности промышленно-природных систем // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4(71). С. 68–77.
6. *Бржезовский А.В., Фильчаков В.В.* Концептуальный анализ вычислительных систем // СПб.: Изд. ЛИАП. 1991. 78 с.
7. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем // М.: Мир. 1973. 344 с.
8. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика // М.: Наука. 1986. 288 с.

References

1. *Kravchenko B.V., Cherkasov D.N.* *Sistemy intellektual'noj podderzhki prinjatija upravljajushhij reshenij pri likvidacii posledstvij ChS* [The intellectual support of decision-making control during emergency response]. Available at: <http://mars.biophys.msu.ru/awse/CONFER/MCE99/149.htm> (accessed 06.09.2014) (In Russ.).
2. *Gelovani V.A., Britkov V.B.* *Sistemy podderzhki prinjatija reshenij v neshtatnykh situacijah s ispol'zovaniem sovremennoj informacionnoj tehnologii* [Decision support systems in emergency situations using modern information technology] Available at: <http://sr.isa.ac.ru/sr-95-96/gelbrit3.html> (accessed 06.09.2014) (In Russ.).
3. *Tsalenko M.Sh.* *Modelirovanie semantiki v bazakh dannyxh* [Modeling semantics in databases]. Moscow: Pub.Nauka. 1989. 288 p. (In Russ.).
4. *Fridman A. Ya., Fridman O. V., Zuenko A. A.* *Situacionnoe modelirovanie prirodno-tehnicheskikh kompleksov* [Situational Modeling of Nature-Technical Complexes]. Saint-Petersburg: Polytechnic Univ. Publ. 2010 436 p. (In Russ.).
5. *Fridman A.Ia., Kurbanov V.G.* [Situational Modeling of Reliability and Safety for Industry-Natural Systems]. *Informatsionno-upravliaushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2014. vol. 4(71). pp. 68–77. (In Russ.).
6. *Brzhezovskii A.V., Fil'chakov V.V.* *Kontseptual'nyi analiz vychislitel'nykh sistem* [Conceptual analysis of computer systems]. Saint-Petersburg: Pub. LIAP. 1991. 78 p. (In Russ.).
7. *Mesapovich M., Mako D., Takakhara I.* *Teoriia ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem* [The theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Pub. Mir. 1973. 344 p (In Russ.).
8. *Pospelov D.A.* *Situatsionnoe upravlenie: teoriia i praktika* [Contingency management: theory and practice]. Moscow: Pub.Nauka, 1986. 288 p. (In Russ.).

Фридман Александр Яковлевич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий управления промышленно-природными системами, Институт информатики и математического моделирования технологических процес-

сов Кольского научного центра Российской академии наук. Область научных интересов: моделирование комплексных технологий и их воздействия на окружающую среду, прикладные интеллектуализированные системы. Число научных публикаций — 230. fridman@iimm.kolasc.net.ru; 184209, Мурманская обл., г.Апатиты, ул.Ферсмана, 24а; р.т. +7(81555) 79782.

Fridman Alexander Jakovlevich — Ph.D., Dr. Sci., leading researcher of Laboratory of Information Technologies for Nature-Industrial Systems Control, Institute for Informatics and Mathematical Modelling of Technological Processes of the Kola Science Center of Russian Academy of Sciences. Research interests: modeling of complex technologies and their impact on the environment, application intellectualized system. The number of publications — 230. fridman@iimm.kolasc.net.ru; 24A, Fersman st., 184209, Apatity, Murmansk Region, Russian Federation; office phone +7(81555) 79782.

Курбанов Вугар Гариб оглы — к-т техн. наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук (ИПМАШ РАН). Область научных интересов: общие вопросы математики, математическая кибернетика, математическое моделирование, оптимальные системы. Число научных публикаций — 60. vugar_borchali@yahoo.com; 196135, Санкт - Петербург, Большой пр., 61, В.О.; р.т. +7(812)3219007.

Kurbanov Vugar Garib ogli — Ph.D., senior researcher, Institute of Problems in Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences (IPME RAS). Research interests: general questions of mathematical cybernetics, mathematical modeling, optimum systems. The number of publications — 60. vugar_borchali@yahoo.com; 61, V.O., Bol'shoi av., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation; office phone +7(812)3219007.

Поддержка исследований. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 14-07-00256-а, 14-07-00257-а, 14-07-00205-а, 13-07-00318-а, 12-07-00689-а, 12-07-000550-а, 12-07-00302-а) и Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 16).

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 14-07-00256-a, 14-07-00257-a, 14-07-00205-a, 13-07-00318-a, 12-07-00689-a, 12-07-000550-a, 12-07-00302-a) and Presidium RAS (project 4.3 of the program #16).

РЕФЕРАТ

Фридман А.Я., Курбанов В.Г. Формальная концептуальная модель промышленно-природного комплекса как средство управления вычислительным экспериментом.

В работе представлена ситуационная концептуальная модель, предназначенная для исследования динамических пространственных объектов, в частности, промышленно-природных комплексов (ППК), которая обеспечивает автоматизацию всех этапов вычислительного эксперимента с возможностью равноправной обработки информации от расчетных модулей, имитирующих составные части ППК, и интегрированных с ней ГИС и экспертной системы.

Эта модель базируется на представлении объекта моделирования в виде древовидного И-ИЛИ графа, отображающего иерархическую декомпозицию структурных элементов ППК, также называемых объектами, в соответствии с их организационными связями. Модель включает в себя три множества компонентов: объекты, процессы и ресурсы (данные), – на которых определены связи и отношения. Каждому объекту может приписываться набор процессов, моделирующих преобразование входных ресурсов в выходные. В качестве ресурса рассматривается любой материальный или информационный сигнал, которым обмениваются элементы модели. С помощью отношений иерархии любой объект однозначно сопоставляется с некоторым подмножеством ГИС-элементов, отображаемых геоинформационной системой и формирующих его графическое представление, что позволяет автоматически измерять графические характеристики для использования в расчетах. Экспертная система, в частности, используется для моделирования тех частей ППК, для которых отсутствуют математические модели.

Особенности предложенного подхода состоят в широком применении экспертных знаний, поддержке современных сценарных подходов к моделированию, использовании ГИС-технологии не только для графического представления составных частей объекта и результатов моделирования, но также для постановки задачи и выполнения пространственно-зависимых расчетов.

SUMMARY

Fridman A.Ya., Kurbanov V.G. **Formal Conceptual Model of Industry-Natural Complexes as a Mean to Organize Computing Experiments.**

The paper introduces a situational conceptual model (SCM) designed to investigate complicated spatial systems, Industry-Natural Complexes (INCs) in particular, that provides automation of every modelling stage with possibilities to equally treat information from calculating modules, which simulate parts of an INC, and from integrated GIS and expert system.

The model requires for representing the object under investigation as a tree-like AND/OR graph that reflects the hierarchical decomposition of INC structural elements (we call them “objects” as well) according to their organizational links. The SCM includes three sets of components, they are objects themselves, processes describing transformations of input resources into output ones, and resources (data), which can correspond to any material or informational signal transferred among objects and/or processes. The model also contains relations linking elements of these sets. By means of hierarchical relations, we can identically assign any SCM element with a subset of GIS-elements defined in a GIS, thus forming its graphical representation. This way we automate measuring graphic parameters of SCM elements to consider them in calculations. The expert system is particularly used for modelling those parts of an INC having no mathematical models.

Our approach is featured with wide usage of expert knowledge, employment of the GIS not for object mapping only, but for task setting, spatial-dependent calculations and modelling results' displaying as well.