

УДК 332.1
JEL: C1, C6, D81, F47, L1, L16, M2

DOI: 10.18184/2079-4665.2015.6.4.303.308

ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ПОЭТАПНЫХ И ИЕРАРХИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Николай Иванович Комков¹, Артем Алексеевич Лазарев²

¹⁻² ФГБУН Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук (ИНП РАН)
117418, г. Москва, Нахимовский проспект, 47

¹ Доктор экономических наук, профессор, зав. лаб. ИНП РАН, старший научный сотрудник лаборатории «Системная динамика» С.-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: komkov_ni@mail.ru

² Аспирант ИНП РАН
E-mail: komkov_ni@mail.ru

Поступила в редакцию: 21.11.2015 Одобрена: 28.11.2015

* Статья подготовлена по результатам исследования, выполняемого при финансовой поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект 14-38-00009) «Программно-целевое управление комплексным развитием Арктической зоны РФ» (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого). Авторы благодарят СПбПУ и РНФ за указанную финансовую поддержку, благодаря которой были получены все основные результаты исследования.

Аннотация. В данной статье представлен формализованный подход к построению поэтапных и иерархических информационно-логических моделей научно-технологических и социально-экономических прогнозов. Рассматривается комплекс средств моделирования проблем: от выявления потребностей до получения определенного вида результата, содержание которого отвечает внешним признакам данного состояния. Установление желаемого будущего состояния процесса развития, характеризующего предполагаемый результат, эквивалентно формированию цели развития. Процедуры построения поэтапных и иерархических информационно-логических моделей могут применяться в режиме использования диалога «руководитель – исполнитель», а представленные отношения в виде логических и теоретико-множественных правил согласования информационных составляющих позволяют на содержательном уровне формировать простые вопросы для исполнителей и руководителей.

Ключевые слова: научно-технологический и социально-экономический прогнозы, цели развития, информационно-логические модели.

Для ссылки: Комков Н. И., Лазарев А. А. Формализованный подход к построению поэтапных и иерархических информационно-логических моделей // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2015. Т. 6. № 4. С. 303–308. DOI:10.18184/2079-4665.2015.6.4.303.308

Широкое распространение научно-технологических и социально-экономических прогнозов, а также введение в практику управление развитием стратегий, дорожных карт, программ и проектов обусловили потребность в их методическом обеспечении. Переход от содержательного описания прогнозируемых и управляемых процессов, рассматриваемых на качественном уровне, основывается на использовании разнообразных информационно-логических моделей (ИЛМ) [1, 2], а их построение базируется на поэтапных и иерархических моделях, известных как модель «дерева целей» [3].

Элементами пространства перемещения результатов развития являются характерные, регулярно повторяющиеся состояния процесса развития. Каждое состояние в таком пространстве определено посредством внешнего описания, т.е. путем установления набора внешних признаков, устойчивых по отношению к изменению содержания отдельного конкретного результата. Достижение характерного состояния процесса развития со-

ответствует получению определенного вида результата, содержание которого отвечает внешним признакам данного состояния. Установление желаемого будущего состояния процесса развития, характеризующего предполагаемый результат, эквивалентно формированию цели развития [4, 5].

Цель может быть представлена при помощи трех составляющих $\{C^V, C_R^V, C_R\}$. Составляющая C^V соответствует внешним требованиям к цели, выполнение которых обеспечивает перемещение результатов развития в следующее состояние в рамках полного цикла. Выполнение внешних требований возможно, если предполагаемый результат будет обладать свойствами C_R^V , достаточными для достижения C^V . Иначе говоря, составляющая C_R^V является характеристикой внешних требований к содержанию предполагаемого результата в терминах (на языке) данного результата. Составляющая C_R соответствует содержанию предполагаемого результата. Если C_R^V определяет существенные свойства предполагаемого результата,

согласованные с внешними требованиями, то составляющая C_R характеризует все основные свойства предполагаемого результата развития.

Задание внешних требований C^V , с одной стороны, ориентирует весь процесс развития, а с другой – обеспечивает возможность его согласования с последующими результатами в рамках полного цикла, развития пространства АЗ РФ, т.е. использование, развитие предполагаемого результата.

Для обеспечения возможности перемещения результатов в рамках полного цикла развития АЗ РФ при формировании требований к содержанию каждого состояния следует учесть три обязательных организационно-экономических условия: потребность – соответствие предполагаемого результата последующей цели V^* , готовность к развитию – наличие необходимых условий для дальнейшего развития данного результата, завершенность – полнота содержания данного состояния с точки зрения его непосредственного использования для достижения следующего состояния. Первое условие при целевом подходе понимается как согласованность цели развития с последующей целью, определяемой с позиции полного цикла. Второе условие следует рассматривать как наличие необходимых ресурсов, включая кадры, финансы, научное оборудование и т.д.

Степень согласованности (ориентированности) может быть различной, начиная с формирования требований, используемых для обеспечения направленности процесса выполнения сформулированного задания на исследование, до определения лишь некоторой области последующего использования результатов развития. Под условием обеспеченности ресурсами подразумеваются как существующие (наличные), так и предполагаемые (целесообразно возможные) ресурсы.

В качестве основного свойства информационно-логической модели (ИЛМ) развития принимается отношение строгого линейного порядка на множестве характерных состояний полного внутреннего цикла:

$$Q_1 > Q_2 > \dots > Q_m, \quad (1)$$

где Q_1 – начальное состояние процесса, а Q_m – эквивалентно достижению цели V .

За критерий упорядочения состояний полного внутреннего цикла может быть принята характеристика завершенности:

$$P_1(Q_1) < P_2(Q_2) < \dots < P_m(Q_m), \quad (2)$$

которая монотонно возрастает по Q .

К перечисленным должно быть добавлено свойство последовательного увеличения информации о струк-

туре процесса развития и содержании его промежуточных состояний по мере приближения к конечному. При этом каждое состояние $Q_i \in \{Q\}$ может быть представлено в виде двух составляющих:

$$\forall Q_i \in \{Q\}: Q_i = Q_i^I \cup Q_i^{II}. \quad (3)$$

Составляющая Q_i^I эквивалентна содержанию реализованной части процесса для достигнутого состояния Q_i , а Q_i^{II} – оставшейся незавершенной части, информация о содержании которой отсутствует либо определена посредством внешних признаков. Процесс достижения цели управлением развитием может быть представлен в виде упорядоченной последовательности (2), где одновременно происходит увеличение его завершенной части и, наоборот, уменьшение незавершенной. Последние два условия можно представить с помощью следующих соотношений:

$$Q_1^I \subset Q_2^I \subset \dots \subset Q_m^I \quad (4)$$

$$Q_1^{II} \supset Q_2^{II} \supset \dots \supset Q_m^{II} \quad (5)$$

Завершенная часть каждого последующего Q_{i+1} состояния полностью включает завершенную часть ему предшествующего Q_i . Увеличение завершенной части при переходе из Q_i в Q_{i+1} обусловлено частичной детализацией и превращением детализированной части в завершенную $Q_{i+1}^I \setminus Q_i^I$. Справедливо условие:

$$\forall_{i \in M} Q_i, Q_{i+1} \in \{Q\}: Q_{i+1}^{II} \setminus Q_i^{II} \cong Q_{i+1}^I \setminus Q_i^I, \quad (6)$$

$$Q_{j+1}^I \setminus Q_j^I \neq \emptyset$$

т.е. «приращение» завершенной части при переходе из Q_i в Q_{i+1} является подмножеством уменьшения незавершенной составляющей, M – множество номеров состояний.

Если рассматривать (1) как последовательность промежуточных управляющих воздействий на процесс достижения цели, то составляющая будет соответствовать подмножеству принятых условий относительно комплексного обеспечения процесса, а Q_i^{II} – подмножеству решений о возможной детализации принятых условий в последующих состояниях процесса достижения цели. Подмножество Q_i^I характеризующее завершенную часть, прежде всего должно быть структурировано, т.е. должны быть определены основные составляющие комплексного управляющего воздействия и установлены отношения между ними. Структуризация процесса означает введение требований к информации о составных частях комплексного управления.

В противоположность Q_i^I составляющая Q_i^{II} не структурирована, а задана лишь посредством

внешних признаков, характеризующих ожидаемые решения.

ИЛМ (1) – (6) конкретизируются с учетом дополнительных особенностей каждого класса процессов управления ИР. Идентификация ИЛМ развития предполагает последовательное решение задач: нахождение наиболее детальной последовательности состояний (1), отвечающих условиям (2) – (6) (задача А), и определение среди найденных только характерных состояний (задача В).

Формальная постановка задачи А состоит в следующем. Найти эффективный алгоритм, задающий линейный порядок для состояний полного цикла, образованных в соответствии с условиями (1) – (6), а также:

$$\{Q\} = \begin{matrix} q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n \\ q_{12} > q_{22} > \dots > q_{p2}, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ q_{1n} > q_{2n} > \dots > q_{sn} \end{matrix},$$

$$\forall q_{ij} \in q_j: q_{ij} = q_{(i-1)j} \cup \Delta q_{(i-1)j}^i \exists q_{(i-1)j}^i \neq \emptyset, j = \overline{1, n} \quad (7)$$

Построение модели (1) – (7) может быть представлено как пошаговый процесс выбора состояний, каждое из которых характеризуется соответствующим кортежем. Алгоритм ее решения рассмотрен далее.

В общем случае, когда характеристика $P(Q)$ задается в порядковой шкале, требуется:

$$\left(\prod_{j=1}^n k_j \right) \frac{(\prod_{j=1}^n k_j) - 1}{2}$$

парных сравнений, где k_j - число уровней j -й компоненты.

Предложенный в [2] алгоритм позволяет существенно снизить трудоемкость построения (1) – (7), а оценкой сверху есть:

$$(n - 1) \cdot \left(\sum_{j \in n} j - 2 \right).$$

Последовательность состояний полного цикла процесса развития, найденная в результате решения задачи А, наиболее детальна. Однако на практике далеко не всегда удобно пользоваться детальной ИЛМ, часто более предпочтительно использование агрегированных ИЛМ, в которых выделены лишь некоторые состояния либо часть состояний агрегирована в характерные.

Данная задача относится к классу известных задач автоматической классификации и распознавания образов.

В общем случае задача определения характерных состояний среди последовательности (1) может быть представлена как поиск отношения эквивалентности R^{\sim} на $\{Q\}$:

$$Q_{(1-d)}^{(1)} \cup Q_{(d+1-k)}^{(2)} \cup \dots \cup Q_{(p+1-m)}^{(s)}, \quad (8)$$

$$Q_{(1-d)}^{(1)} > Q_{(d+1-k)}^{(2)} > \dots > Q_{(p+1-m)}^{(s)}, \quad (9)$$

$$\forall Q_j^{(i)}, Q_j^{(j)} \in \{Q^{\sim}\}: Q_j^i \cap Q_j^j \neq \emptyset, \quad (10)$$

где $\{Q^{\sim}\}$ – множество агрегированных состояний (классов эквивалентности):

$$Q_{(1-d)}^{(1)} = \bigcup_{f=1}^d Q_f, Q_{(d+1-k)}^{(2)} = \bigcup_{n=d+1}^k Q_n$$

Под «деревом целей» проблемы P будем понимать согласованную и упорядоченную по уровням иерархии совокупность целей (подпроблем) необходимых и достаточных для достижения цели (проблемы) V_p . Подпроблемой P_i^k R -го уровня иерархии является часть проблемы, соответствующая R -му уровню иерархии, цель V_i^k которой необходима для достижения цели проблемы V_p . Подпроблема P_e^m , которая в свою очередь не может быть представлена (либо такое представление нецелесообразно) с помощью совокупности, содержащей не менее двух подпроблем следующего $(m+1)$ уровня детализации, называется неделимой подпроблемой.

Под $(k+1)$ уровнем иерархии (детализации) проблемы понимается ее представление с помощью необходимой и достаточной, с точки зрения достижения цели, совокупности таких подпроблем:

$$\{P_{i1}^{k+1}, P_{i2}^{k+1}, \dots, P_{im}^{k+1}\},$$

что каждая P_{i1}^{k+1} подпроблема этой совокупности является частью подпроблемы более высокого R -го уровня. Совокупность детализирующих подпроблем $(R+1)$ -го

уровня: $\{P_{i1}^{k+1}, P_{i2}^{k+1}, \dots, P_{im}^{k+1}\}$, является

достаточной по отношению к исходной P_i^R подпроблеме более высокого R -го уровня, если достижение цели, соответствующей исходной подпроблеме, обеспечивается при одновременном достижении целей соответствующих детализирующим ее подпроблемам.

Построение дерева целей состоит в последовательной детализации проблемы до уровня неделимой

мых подпроблем и в проверке правильности полученного разбиения. Процесс построения дерева целей может быть представлен с помощью упорядоченной совокупности стандартных процедур, которые могут рассматриваться как операторы преобразования.

Под стандартной процедурой понимается совокупность действий (как формальных, так и неформальных), направленных на преобразование исходных данных для достижения требований, предъявленных к завершению этой процедуры. При построении дерева целей каждая процедура выполняется экспертом или группой экспертов. Действия экспертов при построении дерева целей регламентируются следующими правилами:

1. Переход от исходной цели V_{α}^{j-1} к множеству обеспечивающих ее достижение целей:

$\{V_{\alpha 1}^j, V_{\alpha 2}^j, \dots, V_{\alpha m}^j\}$ осуществляется на основе использования некоторого оператора преобразования F_j^{j-1} , имеющего содержательную интерпретацию в виде идеи, гипотезы, совокупности правил и т.п., обосновывающих причины и возможность такого перехода. Формально данное условие можно представить в следующем виде:

(11)

$$F_j^{j-1}: V_{\alpha}^{j-1} \leftrightarrow \{V_{\alpha 1}^j, V_{\alpha 2}^j, \dots, V_{\alpha m}^j\} F_j^{j-1} \neq \emptyset$$

2. Каждая обеспечивающая цель $V_{\alpha i}^j$ должна быть независима в смысле существования и необходима для достижения исходной.

Независимость в смысле существования отдельных обеспечивающих целей означает, что для них найдены такие специфические и устойчиво различимые стороны каждой цели, которые можно исследовать независимо от остальных, а ожидаемые результаты их достижения имеют самостоятельное значение, условие независимости в смысле существования, обеспечивающих целей формально записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} (\forall V_{\alpha i}^j)(\forall V_{\alpha k}^j)[i = 1, m \& k = \overline{1, m} \& i \\ = k \& V_{\alpha i}^j \neq \emptyset \end{aligned} \quad (12)$$

$$\& V_{\alpha n}^j \neq \emptyset \rightarrow V_{\alpha i}^j \& V_{\alpha k}^j \subset V_{\alpha}^{j-1} \& V \cap V_{\alpha k}^j = \emptyset$$

3. Выполнение обеспечивающих целей должно быть достаточно для достижения исходной цели, т.е.

$$\left(\bigcup_{i=1}^m V_{\alpha i}^j \right) \geq V_{\alpha}^{j-1} \quad (13)$$

4. Каждая обеспечивающая цель $V_{\alpha i}^j$, детализирующая исходную V_{α}^{j-1} , обладает множеством признаков $\hat{\pi}^j(V_{\alpha i}^j)$ соответствующих установленным для L^j уровня признакам $\hat{\pi}^j$

$$\pi^j(V_{\alpha i}^j) \geq \hat{\pi}^j, i = \overline{1, m} \quad (14)$$

5. Для обеспечения различия каждый уровень детализации должен быть представлен множеством существенных признаков $\{\hat{\pi}_1^j, \hat{\pi}_2^j, \dots, \hat{\pi}_n^j\}$,

так, что их совместное выполнение, обеспечивает устойчивое различие уровней детализации:

$$\left(\bigcup_{j=1}^n \pi_{\alpha}^i \right) \sim \hat{\pi}^j; \left(\bigcup_{e=1}^f \pi_e^p \right) \sim \hat{\pi}^p \quad (15)$$

$$\hat{\pi}^j \sim > \hat{\pi}^p; j = \overline{1, r}; p = \overline{1, r}, j \neq p$$

Под признаками L^j уровня понимается набор качественно отличных свойств, которыми обладают все цели исследований, представленных на данном уровне детализации. В качестве этих признаков могут использоваться, например, предлагаемый объем исследований π^V (трудоемкости) и требуемая специализация коллективов исполнителей $\pi^S \langle \pi_1^S, \pi_2^S, \dots, \pi_n^S \rangle$, где π_i^S – соответствует i -му виду специализации.

6. Совокупность уровней $\{L^1, L^2, \dots, L^r\}$, характеризуемых множеством существенных признаков $\{\hat{\pi}^1, \hat{\pi}^2, \dots, \hat{\pi}^r\}; L^j \leftrightarrow \hat{\pi}^j, j = \overline{1, r}$ упорядочена так, что:

$$L^1 > L^2 > \dots > L^r \quad (16)$$

7. Множество признаков уровней $\{\hat{\pi}^1, \hat{\pi}^2, \dots, \hat{\pi}^r\}$ независимы в смысле существования:

$$\begin{aligned} \{\hat{\pi}^k \setminus \hat{\pi}^f\} \sim \{\hat{\pi}^{k/f}\} \neq \emptyset L^f > L^R; R = \\ = \overline{1, r}; f = \overline{1, r} \end{aligned} \quad (17)$$

и находятся в отношении включения:

$$\hat{\pi}^1 \supset \hat{\pi}^2 \supset \dots \supset \hat{\pi}^r \quad (18)$$

Указанные правила служат основой для формирования стандартных процедур построения дерева целей. При построении дерева целей достаточно использования следующих процедур, которые делятся на два класса: процедуры построения и проверки.

К процедурам построения относятся

1. Процедура редукции цели – неформальная (эвристическая) процедура, с помощью которой осуществляется переход от данной цели к множеству подцелей, обеспечивающих ее достижение. В основе этой процедуры, согласно правила 1, лежит оператор преобразования, имеющий содержательную интерпретацию идеи, гипотезы, обосновывающую причины и возможность такого перехода.
2. Процедура определения содержания цели – неформальная процедура, направленная на выявление основных свойств, признаков, характеризующих цель системы, которые позволяют дать ее формулировку.
3. Процедура определения требований к достижению цели – неформальная процедура состоит в установлении допустимых количественных оценок показателей, а также их возможных комбинаций, при наличии которых можно считать, что цель достигнута. В том случае, когда показатель не может быть определен количественно, формулируются качественные признаки достижения цели, допустимые с точки зрения данного показателя.

Проверка правильности построения дерева целей может быть выполнена с помощью следующих процедур:

1. Процедура проверки соответствия цели рассматриваемому уровню иерархии. Эта процедура состоит в установлении действительного уровня детализации и сравнении его с заданным согласно правила 5.
2. Процедура проверки достаточности для конъюнктивного объединения обеспечивающих целей, с точки зрения достижений исходной цели, состоит в определении возможности достижения исходной цели при достижении всех обеспечивающих (правило 3).
3. Процедура проверки необходимости обеспечивающей цели, с точки зрения исходной, заключается в оценке возможности достижения исходной цели при исключении данной обеспечивающей цели (правило 2).

Процесс построения дерева целей состоит из циклов, шагов и операций. Под i -м циклом понимается процесс построения дерева целей системы на i -ом уровне иерархии. Цикл, в свою очередь, состоит из ряда шагов. Шагом будем называть совокупность операций необходимых и достаточных для детализации, исходной цели R -го уровня на обеспечивающие ее цели $(k+1)$ -го уровня, причем каждая операция направлена на формирование определенной обеспечивающей цели $(R+1)$ -го уровня. В свою очередь любая операция может

быть выполнена с помощью перечисленных ранее стандартных процедур. Поэтому весь процесс построения дерева целей можно представить в виде упорядоченного набора стандартных процедур, объединенных в операции, шаги и циклы.

Рассмотрим последовательность стандартных процедур, используемых при выполнении отдельной операции. Она сводится к выделению отдельной (обеспечивающей) подпроблемы, детализирующей исходную проблему более высокого уровня. В содержательных понятиях такое построение состоит в следующем. Предположим, что часть обеспечивающих подпроблем уже найдена. После этого находится оставшаяся недетализированная часть исходной проблемы. Она устанавливается как неструктуризованная часть исходной проблемы, оставшаяся после сформулированных обеспечивающих подпроблем. Из этой части необходимо выделить подпроблему данного уровня иерархии. При этом используется следующий порядок.

При детализации в первую очередь следует попытаться выделить (сформулировать) такую подпроблему, с которой может быть начато решение оставшейся недетализированной части на данном уровне.

Формирование исходной проблемы начинается с определения ее содержания, после чего устанавливается цель и показатели, характеризующие степень достижения цели, а также допустимая область значений этих показателей. После этого определяется оставшаяся недетализированная часть исходной проблемы, находится ее содержание, цель, показатели и требования к ним. Это необходимо для проверки достаточности детализации, когда определяется соответствие содержания всех целей обеспечивающих подпроблем, а также оставшейся недетализированной части содержанию и целям исходной проблемы. Если достаточность обеспечивается, то проверяют необходимость наличия ранее сформулированной подсистемы и оставшейся после ее формирования части исходной. Проблему, не являющуюся необходимой, исключают. Если выполняется условие достаточности, то уточняют содержание и цели как найденной подпроблемы, так и оставшейся недетализированной части исходной проблемы.

Практическая реализация процесса построения дерева целей на основе описанных выше стандартных процедур осуществляется путем формирования вопросов к экспертам. Полученные от экспертов ответы анализируются и сопоставляются с требованиями, определяемыми содержанием и условиями завершения самих процедур, в результате чего процесс построения дерева целей повторяется либо заканчивается совсем.

Построение информационно-логической модели процесса достижения целей в виде упорядоченной последовательности характерных состояний имеет ряд достоинств, среди которых основными являются простота и наглядность представления процесса решения сложных проблем. Простота описания достигается за счет агрегирования отдельных промежуточных состояний в характерные и установления их логической последовательности (линейного порядка).

Список литературы

1. Балаян Г.Г., Жарикова Г.Г., Комков Н.И. Информационно-логические модели научных исследований. М.: Наука, 1978.
2. Комков Н.И. Модели управления научными исследованиями и разработками. М.: Наука, 1978.
3. Янг Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1970.
4. Александров Н.И., Комков Н.И. Моделирование организации и управления решением научно-технических проблем. М.: Наука, 1988.
5. Стратегические приоритеты развития Российской Арктики: сборник научных трудов / под науч. ред. В. В. Ивантера, академика РАН. М.: Издательский Дом «Наука», 2014. 368 с.

M.I.R. (Modernization. Innovation. Research)
ISSN 2411-796X (Online)
ISSN 2079-4665 (Print)

INNOVATION

A FORMAL APPROACH TO BUILDING INCREMENTAL AND HIERARCHICAL INFORMATION AND LOGICAL MODELS

Nikolai Komkov, Artem Lazarev

Abstract

This article provides a formalized approach to building incremental and hierarchical information and logical models of scientific-technological and socio-economic forecasts. We consider a set of tools for modeling problems: from identification of needs to produce a certain kind of result, the content of which corresponds to the external signs of this condition. Establish the desired future state of the process of characterizing the intended result is equivalent to the formation of development. Procedures for constructing incremental and hierarchical information and logical models can be used in the mode of using dialogue "director - executor", and presented in the form of logical relations and set-theoretic rules harmonizing information components allows for a meaningful level to form simple questions for the artists and executives.

Keywords: scientific, technological and socio-economic forecasts, development, information and logical models.

Correspondence: Komkov Nikolai Ivanovich, Lazarev Artem Alekseevich, Institute of Economic Forecasting (47, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117418), Russian Federation, komkov_ni@mail.ru

Reference: Komkov N. I., Lazarev A. A. A formal approach to building incremental and hierarchical information and logical models. M.I.R. (Modernization. Innovation. Research), 2015, vol. 6, no. 4, pp. 303–308. DOI:10.18184/2079-4665.2015.6.4.303.308