

© Ключников В.Ю., Канаева Е.И.
Klyushnikov V., Kanaeva E.

КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОСМОДРОМА

COGNITIVE MODEL OF THE ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS OF THE SPACEPORT

Аннотация. Рассматриваются структура, основные элементы и способ построения когнитивной модели экологических последствий деятельности космодрома, основанной на субъективных представлениях эксперта о моделируемой проблемной области. Модель служит эффективным инструментом для формализации и итерационного уточнения гипотезы об экологических последствиях функционирования исследуемого объекта.

Annotation. Considered structure, the basic elements and method of constructing the cognitive model environmental implications of spaceport, based on subjective perceptions of expert a simulated problem area. Model is an effective tool for formalizing and the iterative the verifying of the hypothesis about the environmental consequences of functioning of the object.

Ключевые слова. Космодром, когнитивная модель, нечеткая когнитивная карта, окружающая среда, воздействие на окружающую среду.

Key words. Spaceport, cognitive model, fuzzy cognitive map, environment, environmental impact.

Задача оценки экологических последствий деятельности космодрома является слабоструктурированной и плохо формализуемой по причине сложности объекта, разнообразия механизмов его воздействия на окружающую среду (ОС), неопределенности и изменчивости характеристик окружающей среды и т.д.

Применение традиционных подходов на основе методов исследования операций и теории принятия решений здесь малоэффективно, так как достаточно сложно получить реалистичную количественную модель исследуемых процессов. Связано это с ярко выраженной разнородностью экологических аспектов деятельности космодрома и неоднозначностью восприятия человеком результатов этих воздействий.

Для моделирования подобных объектов используют аппарат знаковых и взвешенных графов, которые позволяют формализовать взаимодействие основных положительных и отрицательных обратных связей, существующих между процессами функционирования космодрома и процессами, происходящими в ОС. При постро-

ении таких моделей может быть использована неполная, нечеткая и даже противоречивая информация.

Удобным инструментом исследования такого рода слабоструктурированных, плохо формализуемых задач является когнитивная структуризация, которая способствует углублению понимания проблем, выявлению противоречий, качественному их анализу.

Когнитивные модели на основе аппарата знаковых и взвешенных графов успешно применяются для анализа названных задач в США компанией Rand Corporation и в России Институтом проблем управления РАН (Москва).

Методология когнитивного моделирования [1] основана на построении субъективной модели ситуации, отражающей знания субъекта о законах ее развития. Модель представляет собой ориентированный знаковый граф (когнитивную карту), в котором вершины соответствуют факторам, описывающим ситуацию, а взвешенные дуги – причинно-следственным отношениям между факторами, вес которых отражает силу их влияния друг на друга.

Ключников Валерий Юрьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника комплекса, ФГУП ЦНИИмаш, тел. +7(903)185-24-91;

Канаева Елена Ивановна – начальник сектора, ФГУП ЦНИИмаш, тел. +7(926)159-79-94.

Klyushnikov Waleriy – doctor of technical sciences, depute head of the complex, Central research institute for machine building, tel. +7(903)185-24-91;

Kanaeva Elena – chief of the sector, Central research institute for machine building, +7(926)159-79-94.

В простейшем случае в когнитивном моделировании используются знаковые когнитивные карты, задаваемые в виде ориентированного графа, в котором множество фактов (концептов), отображающих системные переменные, связаны между собой жесткими причинно-следственными отношениями [1, 2, 3]. Эти отношения могут быть положительными, отрицательными или нейтральными [4]. Знаковые когнитивные карты позволяют исследовать характер протекающих процессов лишь качественно, на основе анализа тенденций изменения системных переменных.

В работе [5] Коско предложил новый тип когнитивных карт, получивших название нечеткие когнитивные карты (Fuzzy Cognitive Maps). Концепты в нечеткой когнитивной карте Коско могут принимать значения из диапазона действительных чисел [0, 1]. Термин «нечеткие» обозначает только то, что причинные связи (связи взаимовлияния) могут принимать не только значение, равное 0 или 1, а лежат в диапазоне действительных чисел, отражающих «силу» влияния одного концепта на другой. За исторически первой статьей Коско появился целый ряд работ, в которых предложены различные модификации нечетких когнитивных карт Коско для моделирования сложных систем [6, 3]. В дальнейшем будет использоваться концепция нечеткой когнитивной карты.

Когнитивная карта описывается в виде кортежа (F, W) , где F – множество вершин – факторов ситуации, $W = \{w_{ij}\}$ – множество отношений факторов x_i и x_j , $i, j = 1, \dots, n$ [7].

Для получения прогнозов развития ситуации в нечетких когнитивных картах [8] для каждого фактора определено упорядоченное множество лингвистических значений $Z_i = \{z_{iq}\}$ и шкала фактора как отображение лингвистических значений на отрезок числовой оси $[0, 1]$, т.е. $\varphi: Z_i \rightarrow X_p$, где $X_i = \{x_{iq}\}$, $x_{iq} \in [0, 1]$, $\forall i, q$. $|w_{ij}|$ характеризует силу влияния факторов. Заданы также начальное состояние ситуации как вектор значений всех факторов ситуации $X(0) = (x_1^0, \dots, x_m^0)$ и начальный вектор приращений факторов ситуации $P(t) = (p_1, \dots, p_m)$.

Когнитивные карты позволяют получить прогноз развития ситуации: $X(t), X(t+1), \dots, X(t+n)$, – векторы состояния ситуации в последовательные дискретные моменты времени $t, t+1, \dots, t+n$, где t – номер шага (такта) моделирования. Состояние ситуации в последовательные моменты времени в нечетких когнитивных моделях определяется парой: $\langle X(t+1), C(t+1) \rangle$, где $C(t+1)$ – вектор когнитивного консонанса значения фактора.

Когнитивный консонанс значения фактора $c_i(t+1) \in C(t+1)$ используется для характеристики уве-

ренности субъекта в результатах моделирования [9]. При $c_i(t+1) \approx 1$ уверенность субъекта в значении фактора максимальна, а при $c_i(t+1) \approx 0$ минимальна.

Наиболее распространенный подход к вычислению нечетких влияний заключается в следующем. Пусть между f_i и f_j имеется m путей и $I_r(f_i, f_j)$ обозначает влияние f_i на f_j по r -му пути, а $T(f_r, f_j)$ – суммарное влияние f_i на f_j по всем m путям. Тогда

$$I_r(f_i, f_j) = \min_p(w, p+1);$$

$$T(f_r, f_j) = \max_{1 \leq r \leq m} I_r(f_i, f_j),$$

где $w_{p, p+1}$ – вес ориентированного ребра от f_p к f_{p+1} на r -м пути.

Операция $I_r(v_i, v_j)$ выделяет наиболее слабую связь в r -м пути, а операция $T(v_i, v_j)$ – наиболее сильную из связей $I_r(v_i, v_j)$.

Построение когнитивной модели экологических последствий деятельности космодрома включает ряд логически связанных этапов.

Первый этап – когнитивная структуризация проблемы. Суть его заключается в декомпозиции проблемы – выделении ее составных частей. В результате декомпозиции проблемы получена общая структура модели экологических последствий деятельности космодрома (рис. 1).

Космодром, будучи сам по себе достаточно специфичным и сложным объектом, оказывает воздействие практически на все геосферы, – от поверхности планеты до околоземного космического пространства. Локальные экологические последствия функционирования космодрома проявляются сильнее всего вблизи стартового комплекса и в сухопутных районах падения отделяющихся частей. С учетом воздействия космодрома на верхние геосферы можно говорить и о глобальных экологических последствиях космических запусков. В свою очередь загрязнение, разрушение и модификация геосфер и природных сред способны оказывать влияние на здоровье населения, персонала космодрома, а также на функционирование различного рода хозяйственных объектов. Обобщенная когнитивная модель экологических последствий деятельности космодрома представлена на рис. 2.

Второй этап – детализация выделенных в общей структуре блоков (рис. 1). Результатом детализации являются перечни факторов, характеризующих деятельность космодрома и процессы, происходящие в окружающей среде (соответственно табл. 1 и табл. 2). Факторы могут быть описаны как количественно, так и качественно при помощи лингвистических переменных.

Лингвистическая шкала качественной оценки фактора выглядит следующим образом: незначительный (н),

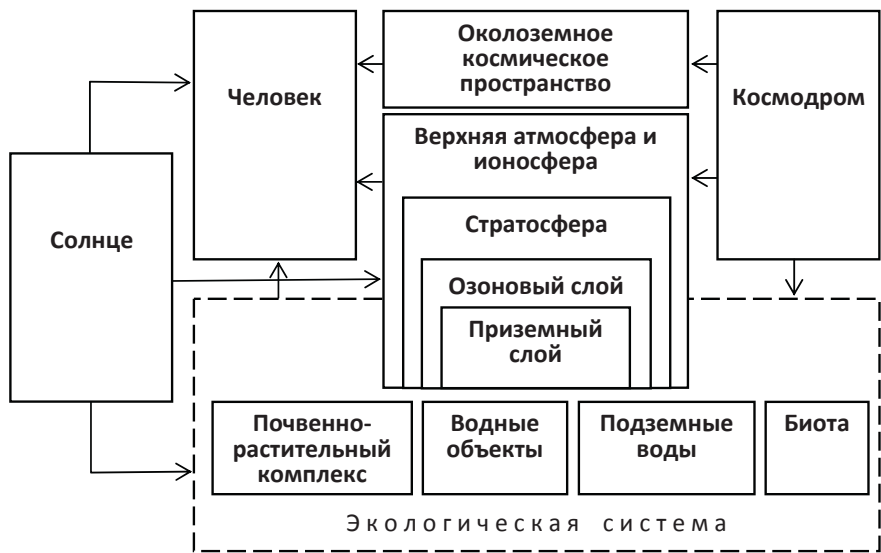


Рис 1. Структура модели экологических последствий деятельности космодрома

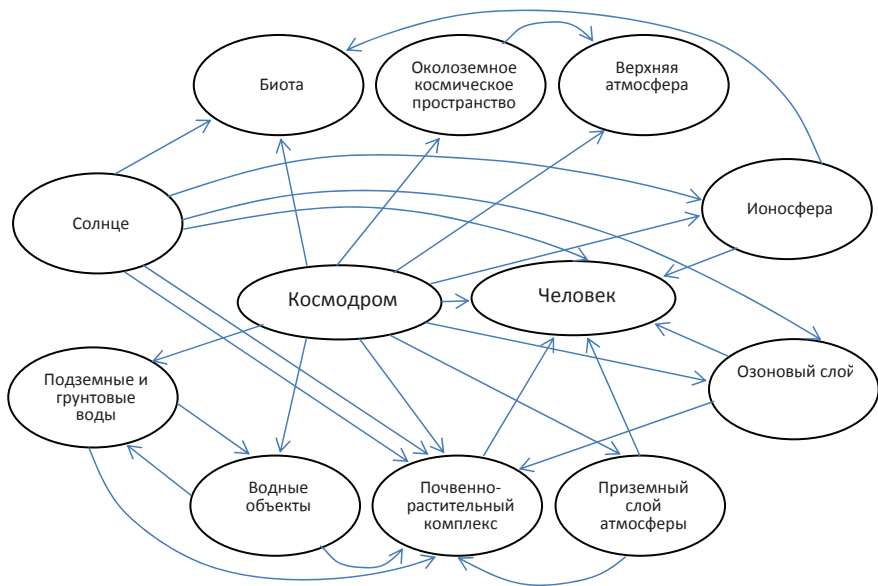


Рис 2. Обобщенная когнитивная модель экологических последствий деятельности космодрома

малый (м), средний (с), большой (б), очень большой (об).

Третий этап – установление причинных связей между факторами.

Установление факта наличия причинной связи основывается на следующих свойствах причинных связей: во-первых, причинная связь имеет всеобщий характер, во-вторых, причина всегда предшествует следствию, в третьих, интенсивность проявления причины определяет интенсивность проявления следствия.

Описание причинных связей ситуации включает следующие классы причинных отношений:

- достоверные причинные связи;
- правдоподобные причинные связи;
- гипотетические причинные связи.

Сила связей между факторами устанавливается с учетом результатов инструментальных наблюдений и

математического моделирования частных экологических последствий деятельности космодрома и задается в виде суждений эксперта как элемент терм-множества $E=\{e_l\} \quad l=1, \dots, m$.

Результатом этого этапа построения модели является взвешенный граф $G(X,W)$, где X – нечеткое множество отображений лингвистических значений факторов Z на единичный отрезок числовой оси (результат шкалирования лингвистических переменных); W – нечеткое множество весов связей (силы связей) между различными факторами.

Матрица причинных связей между факторами (матрица смежности) представляет собой матрицу размерности $n \times n$, на пересечении факторов f_i и f_j которой располагается значение величины силы связи w_{ij} между факторами f_i и f_j .

Таблица 1

Факторы, характеризующие деятельность космодрома

| Фактор | Нулевое значение | Область определения | |
|--|------------------|---------------------|------|
| | | min | max |
| Масса выброса загрязняющих веществ в приземный слой атмосферного воздуха в позиционном районе космодрома, в том числе, ^{1,2} т: | 0 | 10,0 | 1000 |
| • токсичных соединений; | 0 | 9,0 | 100 |
| • кислотных оснований; | 0 | 0,1 | 5 |
| • озоноразрушающих соединений | 0 | 1,0 | 10 |
| Массы выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух в районах падения отдельных частей (ОЧ) РН, ^{1,2} т | 0 | 0 | 10 |
| Массы выброса продуктов сгорания ракетных топлив в F-слой ионосферы ^{1,2} , т | 0 | 0 | 100 |
| Масса сброса жидких отходов и промстоков в зоны аэрации в позиционном районе космодрома ^{1,2} , т | 0 | 0 | 1 |
| Масса сброса жидких отходов и промстоков в зоны аэрации в районах падения ОЧ РН ^{1,2} , т | 0 | 0 | 5 |
| Масса твердых промышленных отходов, образующихся в позиционном районе космодрома ^{1,2} , т | 0 | 0 | 400 |
| Масса твердых промышленных отходов, образующихся в районах падения ОЧ РН ^{1,2} , т | 0 | 0 | 200 |
| Локальное превышение температуры в позиционном районе космодрома над фоновой, °С | 0 | 0 | 3 |
| Количество техногенных фрагментов, остающихся на орбитах выше 200 км | 0 | 1 | 30 |

Примечания: 1. Масса токсичных соединений выброса (сброса) приводится по токсичности к веществам 1-го класса опасности. 2. В таблице приведены суммарные показатели за год.

Таблица 2

Факторы, характеризующие процессы, происходящие в окружающей среде

| Фактор | Нулевое значение | Область определения | |
|---|------------------|---------------------|-----|
| | | min | max |
| Биопродуктивность экосистемы, средняя по площади позиционного района космодрома ¹ , т/га·год | 0 | 0,10 | 10 |
| Биомасса экосистемы, средняя по площади позиционного района космодрома, т/га·год | 0 | 0,30 | 300 |
| Биопродуктивность экосистемы, средняя по площади района падения ОЧ РН ¹ , т/га·год | 0 | 0,10 | 10 |
| Биомасса экосистемы, средняя по площади района падения ОЧ РН ¹ | 0 | 0,30 | 300 |
| Уровень загрязнения верхнего слоя почвы, средний по площади позиционного района космодрома ² | 0 | 0,05 | 10 |
| Уровень загрязнения верхнего слоя почвы, средний по площади района падения ОЧ РН ² | 0 | 0,10 | 100 |
| Уровень загрязнения приземного слоя атмосферы ² | 0 | 0,05 | 100 |
| Уровень загрязнения водных объектов ² | 0 | 0,05 | 100 |
| Уровень загрязнения подземных и грунтовых вод ² | 0 | 0,05 | 100 |
| Снижение индекса здоровья населения ³ , % | 0 | 5 | 100 |
| Снижение индекса здоровья персонала ³ , % | 0 | 5 | 100 |
| Видовое разнообразие биоты ⁴ | 1,5 | 1,5 | 4,5 |

Примечания: 1. Биомассу (биопродуктивность) измеряют по массе сухого вещества. 2. Уровни загрязнения приводят к кратности превышения над предельно допустимой концентрацией (или над аналогичным показателем: ориентировочно допустимой концентрацией или уровнем, кларком содержания в почве и т.п.), установленной для данного химического соединения в данной природной среде. 3. Под индексом здоровья понимают количество людей ни разу не заболевших в течение года в расчете на 100 человек. 4. Видовое разнообразие биоты оценивают по индексу Шеннона.

Для оценки значения w_{ij} необходимо определить, как изменение значения одного фактора (фактора-причины) изменяет значение другого фактора (фактора-следствия). Если значения факторов причины и следствия могут быть точно измерены в количественной или качественной шкале, то определение силы причинной связи заключается в определении частного от деления изменения значения фактора-следствия на изменение значения фактора-причины.

При когнитивном моделировании, в соответствии с целью моделирования, разрабатывается программа исследования ситуации на модели. Программа исследования ситуации включает три последовательных этапа.

Первый этап заключается в выдвижении суждений (гипотез) о состоянии ситуации и (или) возможных ее изменениях, т.е. формулируются начальные условия и ряд управляющих воздействий на ситуацию в соответствии с сутью проблемы и целью исследования ситуации. В данном случае к начальным условиям относятся характери-

стики (факторы) деятельности космодрома и фоновые характеристики ОС. К управляющим воздействиям могут быть отнесены характеристики (факторы) мероприятий по ограничению воздействия космодрома на ОС.

Второй этап – этап непосредственного моделирования ситуации заключается в исследовании и сравнении различных сценариев функционирования космодрома и, возможно, реализации мероприятий по ограничению воздействия космодрома на ОС.

Третий этап – этап интерпретации результатов моделирования и исследования проблемы.

В результате когнитивного моделирования влияния космодромов на окружающую среду был получен ряд нетривиальных результатов, в частности, касающихся сравнения экологических последствий деятельности космодромов, расположенных в различных природно-географических зонах, а также влияния различных техногенных и естественно-природных факторов на здоровье населения и персонала космодрома.

Литература:

1. Axelrod R. *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites*. - Princeton. University Press, 1976.
2. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В.В. Корнеев, А.Ф. Гафеев, С.В. Васютин, В.В. Райх. – М.: Нолидж, 2001. – 496 с.
3. Роберте Ф.С. *Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам*. Пер. с англ. / Ф.С. Роберте. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. - 496 с.
4. Трахтенгерц Э.А. *Компьютерная поддержка принятия решений* / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 1998. - 376 с.
5. Kosko, B. *Fuzzy cognitive maps* / B. Kosko // *International Journal of Man- Machine Studies*. – 1986. - № 24. - P. 65-75.
6. Максимов В.И. *Структурно-целевой анализ развития социально-экономических ситуаций* / В.И. Максимов // *Проблемы управления*, 2005. – №3. – С. 30–38.
7. Кулинич А.А., Титова Н.В. *Модель оценки альтернатив управления слабоструктурированными динамическими ситуациями* // *Искусственный интеллект. Десятая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2006*. Обнинск, 25–28 сентября 2006 года. Труды конференции. Т.1, М.: Физматлит, 2006. – С. 348–356.
8. Kosko B. *Fuzzy thinking*. Hyperion, 1993.
9. Фестингер Л. *Теория когнитивного диссонанса*. – СПб.: Ювента, 1999. – С.15-52.

Материал поступил в редакцию 19. 03. 2014 г.