

10. *Mey Kh., Go Ya.* Povsemestnye operatsionnye sistemy [Ubiquitous operating systems], *Otkrytye sistemy. SUBD* [Open systems. DBMS], 2018, No. 1. Available at: <https://www.osp.ru/os/2018/01/13053933/> (accessed 19 June 19).
11. *Smelyanskiy R.* Tekhnologii realizatsii programmno konfiguriruemyykh setey: overlay vs openflow [Technologies for implementing software-defined networks: overlay vs openflow], *Zhurnal setevykh resheniy LAN* [Journal of network solutions LAN], 2014, No. 4, pp. 53-55.
12. *Petrov S.A., Nefed'ev A.I.* Mikrokontrollery izmeritel'nykh sistem [Microcontrollers in measuring systems]. Volgograd: VolgGTU, 2015, 112 p.
13. *Goryachev N.V., Tanatov M.K., Yurkov N.K.* Issledovanie i razrabotka sredstv i metodik analiza i avtomatizirovannogo vybora sistem okhlazhdeniya radioelektronnoy apparatury [Research and development of tools and techniques of analysis and automated choice of cooling systems of electronic equipment], *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems], 2013, No. 3, pp. 70-75.
14. *Solonina A.I., Klioskiy D.M.* TSifrovaya obrabotka signalov i Matlab [Digital signal processing and Matlab]. Saint Petersburg: BKhV–Peterburg, 2013, 512 p.
15. Programmnoe obespechenie s mnogokriterial'nymi algoritmami obrabotki informatsii: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF № 20018610247, 09.01.2018 [Software with a multi-criteria algorithms of information processing: the certificate of state registration of computer programs RF No. 20018610247, 09.01.2018], 3 p.
16. Ispol'zovanie PO Matlab. Arkhiv Statey [Using Matlab software. Archive Articles]. Available at: <https://www.mathworks.com/help/>.
17. *Ralston W.T. and Weitzen J.A.* Spread Spectrum Multiple Access for Mobile Meteor Burst Communications, *IEEE Transactions on vehicular technology*, 1995, Vol. 44, No. 2, pp. 280-290.
18. *Ryan W.E.* Optimal signaling for meteor burst channels, *IEEE Trans. Comm.*, 1997, Vol. 45, No. 5, pp. 489-496.
19. *Cannon P. and Dickson A.* Signalling efficiency modelling and measurement of simplex block encoded MBC systems, *IEEE Proceedings-I*, 1991, Vol. 138, No. 6, pp. 544-548.
20. *Djukanic G.M. u Schilling D.L.* Performance analysis of an ARQ transmission scheme for meteor burst communications, *IEEE Trans. Comm.*, 1994, Vol. 42, No. 2/3/4, pp. 268-271.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., профессор О.В. Воробьев.

**Рыбаков Алексей Игоревич** – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: [lexeus.r1@gmail.com](mailto:lexeus.r1@gmail.com); г. Санкт-Петербург, Рыбачий проспект, д. 15, корп. 1, кв. 47; тел. +79117768371; аспирант; ассистент кафедры радиопередающих устройств и средств подвижной связи.

**Rybakov Alexey Igorevich** – St. Petersburg state University of telecommunications them. prof. M.A. Bonch-Bruevich; e-mail: [lexeus.r1@gmail.com](mailto:lexeus.r1@gmail.com); St. Petersburg, Rybatsky prosp., build. 15, bldg. 1, ap. 47; phone: +79117768371; postgraduate student; assistant of department of radio transmitting devices and means of telecommunication.

УДК 004.89:620.9

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-140-152

**Л.В. Массель, А.Г. Массель, Д.В. Пестерев**

## **ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОНТОЛОГИЙ, КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ И ПРОДУКЦИОННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ**

*Предлагается технология управления знаниями, основанная на совместном использовании онтологий, когнитивных моделей и продукционных экспертных систем. Ядром предлагаемой технологии являются методика когнитивного моделирования и преобразования когнитивных моделей в продукционные правила экспертной системы, а также инструментальные средства поддержки предлагаемой технологии, разрабатываемые на основе агентного подхода. Применены разработанные в авторском коллективе методики и инструментальные средства семан-*

тического моделирования (в первую очередь онтологического и когнитивного). Рассматривается двухуровневая технология многовариантных исследований, интегрирующая уровни качественного (с использованием семантического моделирования) и количественного анализа (с применением математических моделей и вычислительного эксперимента), а также интеллектуальная ИТ-среда, интегрирующая инструментальные средства поддержки двухуровневой технологии. На их основе выполнены модификация и разработка инструментальных средств для поддержки предложенной технологии управления знаниями. Приведена иллюстрация предложенной технологии, семь этапов которой описаны в таблице. Рассмотрена разработка агента конвертирования для преобразования причинно-следственных отношений когнитивных карт в продукционные правила экспертной системы, приведен алгоритм агента. Результат конвертирования - полученный набор правил - передается в оболочку продукционной экспертной системы Clips. Используя машину вывода Clips, эксперт получает выводы о степени взаимовлияния концептов когнитивной карты друг на друга и на их основе интерпретирует когнитивную карту. Приведены примеры онтологий, когнитивных карт, результаты преобразования когнитивных карт в продукционные правила экспертной системы, иллюстрирующие предложенную технологию управления знаниями. Описан вычислительный эксперимент, в котором использована когнитивная карта угрозы «Низкие темпы обновления электрогенерирующего оборудования». Эффективность предложенной технологии для поддержки обоснования и принятия стратегических решений по развитию энергетики в первую очередь может быть оценена качественно, поскольку она обеспечивает научную обоснованность рекомендуемых решений и тем самым повышает их эффективность. Кроме того, применение этой технологии направлено на сокращение трудозатрат эксперта и, соответственно, сокращение времени на анализ и обоснование вариантов решений. Новизна предложенного подхода состоит, во-первых, в интеграции различных интеллектуальных технологий (онтологии, когнитивное моделирование, экспертные системы) в рамках единой технологии управления знаниями в научных исследованиях; во-вторых, в автоматизации анализа и интерпретации когнитивных карт с помощью продукционных экспертных систем. В итоге можно говорить о повышении качества подготовки и обоснования рекомендаций для принятия решений. Технология управления знаниями апробирована в исследованиях проблем энергетической безопасности, но может иметь более широкое применение.

Управление знаниями; онтологии; когнитивные модели; экспертная система; энергетическая безопасность.

L.V. Massel, A.G. Massel, D.V. Pesterev

### **KNOWLEDGE MANAGEMENT TECHNOLOGY USING ONTOLOGIES, COGNITIVE MODELS AND PRODUCTION EXPERT SYSTEMS**

*The article proposes a knowledge management technology based on the joint use of ontologies, cognitive models and production expert systems. The core of the proposed technology is the technique of cognitive modeling and the transformation of cognitive models into the production rules of the expert system, as well as the tools to support the proposed technology, developed on the basis of the agent approach. The methods and tools for the semantic modeling (primarily ontological and cognitive) developed in the authors' team were applied. We consider a two-level technology of multivariate research, integrating the levels of qualitative (using semantic modeling) and quantitative analysis (using mathematical models and a computational experiment), as well as an intelligent IT environment that integrates tools for supporting two-level technology. Based on them, the modification and development of tools to support the proposed knowledge management technology was performed. An illustration of the proposed technology is given, the seven stages of which are described in the table. The development of a conversion agent for converting causal relationships of cognitive maps into production rules of an expert system is considered, the algorithm of the agent is presented. The conversion result - the resulting set of rules - is transferred to the shell of the Clips production expert system. Using the Clips inference engine, the expert receives conclusions about the degree to which the concepts of the cognitive map interact with each other and on their basis interprets the cognitive map. Examples of ontologies, cognitive maps, results of converting cognitive maps into production rules of an expert system illustrating the proposed knowledge management technology are given. A computational experiment is described in*

*which a cognitive threat map “Low rates of renewal of electric generating equipment” is used. The effectiveness of the proposed technology to support the justification and adoption of strategic decisions on the development of energy can be first of all evaluated qualitatively, since it ensures the scientific validity of the recommended solutions and thereby increases their effectiveness. In addition, the use of this technology is aimed at reducing the expert’s labor costs and, accordingly, reducing the time for analysis and substantiation of solutions. The novelty of the proposed approach consists, firstly, in the integration of various intelligent technologies (ontologies, cognitive modeling, expert systems) within the framework of a single technology for knowledge management in scientific research; secondly, in the automation of analysis and interpretation of cognitive maps using production expert systems. As a result, we can talk about improving the quality of preparation and substantiation of recommendations for decision-making. The knowledge management technology has been tested in studies of energy security problems, but may have wider application. Knowledge management; ontologies; cognitive models; expert system; energy security.*

**Введение.** В статье рассмотрена проблема управления знаниями в научных исследованиях и предлагаемый подход к ее решению, основанный на совместном использовании онтологий, когнитивных моделей и продукционных экспертных систем. Актуальность поставленной проблемы обусловлена возрастанием ценности экспертных знаний и необходимостью разработки новых подходов, методов и инструментальных средств интеллектуальной поддержки принятия решений, основанных на использовании современных интеллектуальных информационных технологий, в том числе технологий семантического моделирования.

Апробация выполнена на примере исследований проблемы энергетической безопасности, но предлагаемый подход к управлению знаниями может иметь более широкое применение. Ядром предлагаемой технологии являются методика когнитивного моделирования и преобразования когнитивных моделей в продукционные правила экспертной системы, а также инструментальные средства поддержки предлагаемой технологии, разрабатываемые на основе агентного подхода. В исследованиях проблемы энергетической безопасности технология когнитивного моделирования заслужила признание, но анализ и интерпретация когнитивных карт до последнего времени выполнялись экспертом «вручную». Переход от когнитивных карт к продукционным экспертным системам позволяет автоматизировать этот этап и уменьшить количество возможных ошибок. Ниже описываются двухуровневая технология исследований проблемы энергетической безопасности, место в ней когнитивного и онтологического моделирования и предложенная авторами технология управления знаниями.

**1. Двухуровневая технология исследований проблемы энергетической безопасности.** Традиционно для исследований проблем энергетической безопасности (ЭБ) в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН использовались экономико-математические модели топливно-энергетического комплекса (ТЭК), реализующие их программные комплексы и вычислительный эксперимент [1]. В современных условиях исследователи, как правило, сталкиваются с проблемой получения достаточной и достоверной исходной информации, что затрудняет или делает нецелесообразным использование детальных математических моделей. Кроме того, многовариантный характер вычислительного эксперимента и принятый в исследованиях ЭБ комбинаторный подход приводит к необходимости анализировать большое количество вариантов (до 5 млн.), что существенно увеличивает нагрузку на эксперта. Коллективом, представляемым авторами, было предложено применить двухуровневую технологию исследований, основанную на концепциях семантического моделирования и управления знаниями [2]. Семантическое моделирование включает как онтологическое моделирование, получившее большое распространение в нашей стране [3–4] и за рубежом [5–7], так и когнитивное, событийное и вероятностное моделирование (методики моделирования и

поддерживающие их инструментальные средства разработаны в авторском коллективе) [8]. При этом используются как явные (опубликованные и представленные в электронном виде), так и неявные (Brain) знания – знания экспертов [9]. Двухуровневая технология предполагает, что на первом уровне экспертом выполняется качественный анализ проблемы с использованием инструментальных средств семантического моделирования и выбираются наиболее вероятные (целесообразные) варианты развития энергетики (уже не 5 млн., а, например, 5 вариантов). На втором уровне может быть выполнено обоснование этих вариантов (вычислительный эксперимент с использованием традиционных программных комплексов и экономико-математических моделей). На рис. 1 представлена архитектура интеллектуальной инструментальной среды, поддерживающей эту технологию.

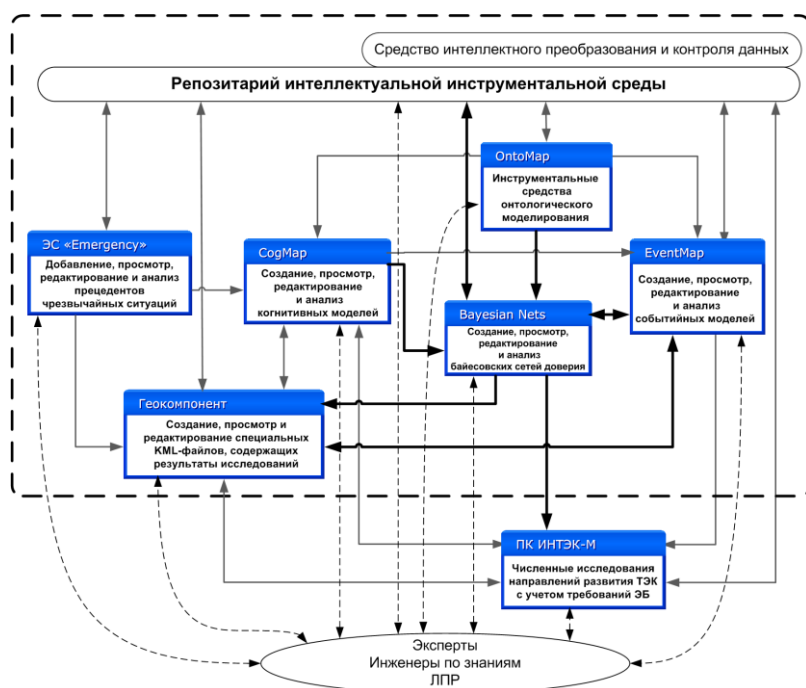


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной ИТ-среды для поддержки двухуровневой технологии исследований

Важное место в предложенной технологии занимает когнитивное моделирование и поддерживающее его инструментальное средство CogMap, которые подробнее рассмотрены ниже

**2. Переход от когнитивных моделей к продукционным правилам экспертной системы.** Под когнитивным моделированием понимается построение когнитивных моделей, представляемых ориентированными графами, в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами положительным или отрицательным в зависимости от характера причинно-следственного отношения. Дуги характеризуются весовыми коэффициентами, в простейшем случае "+1" или "-1", в более сложных случаях эти коэффициенты вычисляются либо описываются аналитическими функциями) [10]. Графическое изображение когнитивных моделей называют когнитивными картами. В последнее время когнитивное моделирование получает все более широкое распространение, как в нашей стране [11, 12], так и за рубежом [13, 14].

В исследованиях проблем ЭБ когнитивное моделирование используется для ситуационного анализа проблемы ЭБ и моделирования угроз ЭБ, под которыми понимаются неблагоприятные для энергетики события. На рис. 2 приведен пример когнитивной карты, построенной в инструментальном средстве CogMap.

Основой для разработки когнитивных моделей в нашем случае являются онтологические модели [15]. Пример типовой онтологии, структурирующей основные концепты, используемые в когнитивных моделях [16], приведен на рис. 3. При этом для построения онтологического пространства знаний используется авторский фрактальный стратифицированный подход к структурированию знаний [17].

Анализ и интерпретация когнитивных карт до последнего времени выполнялись экспертом «вручную», что могло привести к ошибкам и неверным выводам. Учитывая отражение в когнитивных картах причинно-следственных связей, которые хорошо отображаются продукционными правилами «Если *предпосылка*, То *следствие* », было предложено автоматизировать анализ когнитивных карт с использованием продукционных экспертных систем. Правила, описывающие конкретную когнитивную модель, в свою очередь, могут быть организованы в виде фрагмента базы знаний продукционной экспертной системы. Таким образом, предварительный анализ когнитивной модели и выводы на совокупности правил может осуществлять экспертная система, а лицо, принимающее решение (ЛПР), впоследствии может проверить достоверность и/или скорректировать эти выводы.

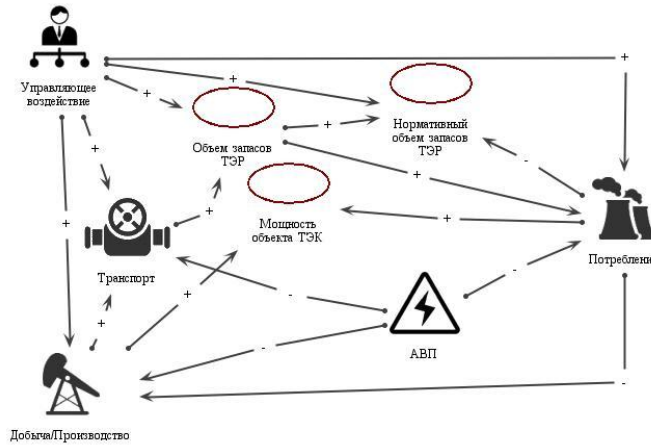


Рис. 2. Фрагмент когнитивной карты угрозы «Аварии, взрывы, пожары (АВП)» в нотации CogMap

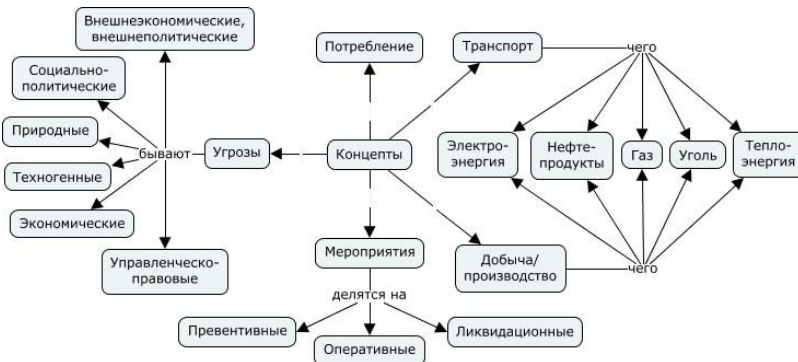


Рис. 3. Исходная онтология для когнитивного моделирования

**3. Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционной экспертной системы.** Рассмотрение полного цикла извлечения, представления и интерпретации знаний позволяет говорить не просто о технологии перехода от когнитивных карт к продукционным правилам, а о технологии управления знаниями, включающей этапы извлечения знаний, представления знаний, преобразование представлений знаний (переход от одного вида представления к другому) и интерпретации знаний. Технология представлена в табл. 1 и иллюстрируется рис. 4.

Таблица 1

**Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционной экспертной системы**

№ этапа	Содержание этапа	Инструментарий (исполнители)	Результат этапа
1	Анализ предметной области и извлечение знаний	Эксперт, исследователь (инженер-когнитолог)	Основные концепты предметно области и отношения между ними
2	Построение онтологий	OntoMap, SMapTools, Protégé	Знания, представленные в виде онтологии
3	Построение когнитивных карт на основе онтологий	CogMap	Знания, представленные в виде когнитивной карты
4	Построение матрицы инцидентности для когнитивной карты (КК)	Агент конвертирования КК	Знания, представленные в виде матрицы инцидентности для КК
5	Конвертирование КК в продукционные правила экспертной системы (ЭС)	Агент конвертирования КК	Знания, представленные в виде продукционных правил
6	Анализ КК (логический вывод в ЭС)	Экспертная система	Выдача результатов (интерпретация знаний в виде КК)
7	Анализ результатов вывода	Эксперт	Рекомендация решения или уточнение знаний (переход на этапы 2,3)

В рамках предлагаемой технологии на начальных этапах выполняется онтологический инжиниринг предметной области и строятся онтологии с помощью инструментальных средств: авторского OntoMap или распространенных SMapTools, Protégé и др. На третьем этапе, используя понятия онтологии, с использованием авторского инструментального средства CogMap строится когнитивная карта для решаемой задачи. На 4-5 этапах КК конвертируется в продукционные правила экспертной системы, которая осуществляет анализ КК (логический вывод) на 6 этапе. На завершающем этапе эксперт рассматривает результаты вывода и рекомендует решение или уточняет исходные посылки (редактируя онтологии или КК).

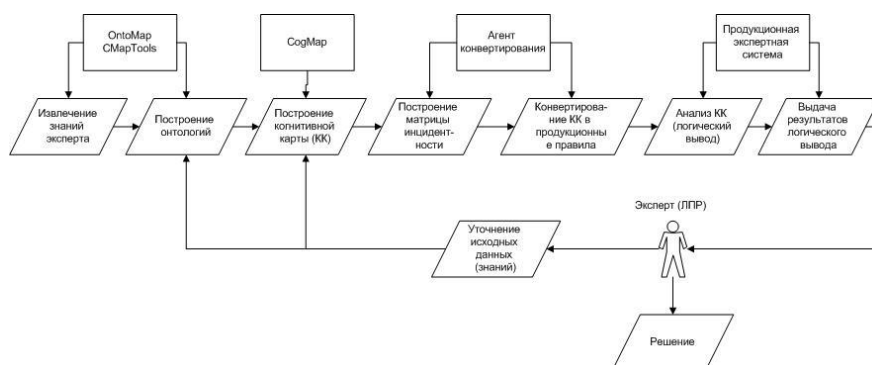


Рис. 4. Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционной экспертной системы

#### 4. Инструментальные средства поддержки предложенной технологии.

Для поддержки предложенной технологии были выполнены модификация методики когнитивного моделирования и инструментального средства CogMap и разработка агента конвертирования.

В инструментальное средство CogMap был интегрирован разработанный модуль сохранения когнитивной карты в формате, необходимом для выполнения 4-го этапа, где когнитивная карта в формате xml передается на вход агента конвертирования (табл. 1).

Агент конвертирования, в соответствии с авторским алгоритмом, выполняет обход графа, формирует список концептов (сущностей) и связей между ними; далее, проходя по этому списку, формирует набор продукционных правил в формате, используемом оболочкой Clips. При реализации агента спроектированы четыре класса объектов: карта, сущность, связь, правило.

Алгоритм включает следующие шаги:

1. Выбор концепта преобразуемой когнитивной модели.
2. Выбор связи преобразуемой когнитивной модели для этого концепта.
3. Если связь исходящая, то записать в матрице инцидентности на пересечении строки концепта и столбца связи «1», если входящая – «-1», иначе «0».
4. Выбор следующей связи для этого концепта и повторение шага 3 до перебора всех связей.
5. Выбор следующего концепта и повторение шагов 2-4 до перебора всех концептов; если все концепты просмотрены – то «конец» этого блока (формирования матрицы инцидентности).
6. Выбрать ячейку первой (очередной) строки матрицы инцидентности.
7. Если в ней «1», то пометить концепт, связанный с этой ячейкой, как «предпосылка», если «-1», то пометить как «следствие».
8. Переход к следующей строке матрицы инцидентности (на шаг 6); если строка последняя, то переход к шагу 9.
9. Составить правило по шаблону: если «предпосылка» то «следствие».
10. Перейти к следующему столбцу и повторить шаги 6-9; повторять до последнего столбца матрицы. Если столбец последний, то – «конец» алгоритма.

Фактически данный алгоритм можно разбить на две части. При выполнении первой части (шаги 1-5) выполняется обход графа, который представляет когнитивную модель, и формируется матрица инцидентности данного графа. При выполнении второй части (шаги 6-10) данная матрица анализируется по столбцам и формируется набор продукционных правил.

Полученный набор правил передается в оболочку продукционной экспертной системы Clips. Используя машину вывода Clips, эксперт получает выводы о степени взаимовлияния концептов когнитивной карты друг на друга, либо, если этого требовала исходная задача, степени влияния концептов на какой-либо целевой концепт (например, «нормативный объем запасов ТЭР» в когнитивной карте на рис. 2).

**5. Вычислительный эксперимент с использованием предлагаемого подхода.** На рис. 5 представлена когнитивная карта угрозы «Низкие темпы обновления электрогенерирующего оборудования». Если каждому концепту поставить в соответствие обозначение  $C_i$ , можно составить лингвистические описания правил, приведенные ниже.



Рис. 5. Когнитивная карта угрозы «Низкие темпы обновления электрогенерирующего оборудования»

Ниже приведен перечень правил для когнитивной карты, представленной на рис. 5, с использованием лингвистических описаний правил:

1. Если "Капиталовложения" увеличиваются то "Ввод мощностей" увеличивается;

Лингвистическое описание: Если  $C1 \uparrow$ , то  $C2 \uparrow$ , в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если  $C1 \downarrow$ , то  $C2 \downarrow$

2. Если "Капиталовложения" увеличивается, то "Демонтаж мощностей" уменьшается;

Лингвистическое описание: Если  $C1 \uparrow$ , то  $C3 \downarrow$ , в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если  $C1 \downarrow$ , то  $C3 \uparrow$

3. Если "Капиталовложения" увеличивается, то "Возраст оборудования" уменьшается;

Лингвистическое описание: Если  $C1 \uparrow$ , то  $C4 \downarrow$ , в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если  $C1 \downarrow$ , то  $C4 \uparrow$

4. Если "Ввод мощностей" увеличивается, то "Мощности" увеличиваются;

Лингвистическое описание: Если  $C2 \uparrow$ , то  $C5 \uparrow$ , в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если  $C2 \downarrow$ , то  $C5 \downarrow$

5. Если "Демонтаж мощностей" увеличивается, то "Возраст оборудования" уменьшается;

Лингвистическое описание: Если  $C3 \uparrow$ , то  $C4 \downarrow$ , в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если  $C3 \downarrow$ , то  $C4 \uparrow$

6. Если "Демонтаж мощностей" увеличивается, то "Мощности" уменьшается;

Лингвистическое описание: Если  $C3 \uparrow$ , то  $C5 \downarrow$ , в обратном случае:



Лингвистическое описание: Если C3↓, то C5↑

7. Если "Возраст оборудования" увеличивается, то "Аварийность" увеличивается;

Лингвистическое описание: Если C4↑, то C6↑, в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если C4↓, то C6↓

8. Если "Аварийность" увеличивается, то "Мощности" уменьшается;

Лингвистическое описание: Если C6↑, то C5↓, в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если C6↓, то C5↑

9. Если "Потребление" увеличивается, то "Мощности" уменьшаются;

Лингвистическое описание: Если C7↑, то C5↓, в обратном случае:

Лингвистическое описание: Если C7↓, то C5↑

В качестве примера рассмотрим два показателя: средний возраст и аварийность. Для задания значений были взяты допустимые пределы и дискретизированы для каждого показателя, диапазоны возможных значений были определены с использованием статистической информации по объемам капиталовложений, ввода нового и демонтажа старого оборудования, а также возрастной структуре генерирующего оборудования (за 2000–2009 гг.) [18–20].

Средний возраст оборудования за рассматриваемый период менялся от 27 до 32 лет, поэтому для того, чтобы описать более подробно самую большую группу (от 20 до 40 лет), интервалы уменьшены для более подробного описания. Для оборудования возрастом до 20 лет и от 41 года зададим интервалы по 10 лет. Показатель аварийности отражает вероятность возникновения аварийных ситуаций и может изменяться от 0 до 1.

Для задания зависимостей между показателями использовались экспертные оценки, в частности, [21] показывает, что с течением срока службы оборудование в большей степени подвержено возникновению аварийных ситуаций. В то же время и оборудование с малым сроком службы в силу возможных производственных недостатков и дефектов монтажа также может иметь более высокие показатели аварийности. То есть выделяют три периода в работе технических объектов: первый – период приработки объекта, второй – нормальная эксплуатация, третий – старение. Значения вероятностей представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Таблица условных вероятностей для переменной «Аварийность»**

Возраст, лет	Аварийность									
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1
0-10	5	5	5	10	10	20	20	10	10	5
11-20	55	5	5	5	5	5	5	5	5	5
21-25	50	10	5	5	5	5	5	5	5	5
26-28	45	15	5	5	5	5	5	5	5	5
29-30	35	15	15	5	5	5	5	5	5	5
31-32	25	20	15	10	5	5	5	5	5	5
33-35	15	25	20	10	5	5	5	5	5	5
36-40	5	5	10	15	20	15	10	10	5	5
40-50	2	3	10	10	15	20	20	10	5	5
50-60	0	0	2	3	5	10	20	25	25	10

После дополнительного анализа выводим усредненный коэффициент зависимости возраста оборудования и аварийности, который используется в когнитивной карте.

Следующим этапом проводится вычислительный эксперимент с использованием ПК ИНТЭК-М. Результаты отражены в табл. 3 и на графике на рис. 6.

Таблица 3

**Изменение значений переменной модели в ответ на заданные объемы капиталовложений**

Капиталовложения, млрд руб.	Ввод новых мощностей, МВт	Демонтаж, МВт	Средний возраст оборудования, лет	Аварийность
25	600	334	29,3	0,368
75	1400	490	28,8	0,364
125	1730	650	28,3	0,358
175	1920	798	27,9	0,353
225	2110	934	27,5	0,35
275	2180	1040	27,3	0,348

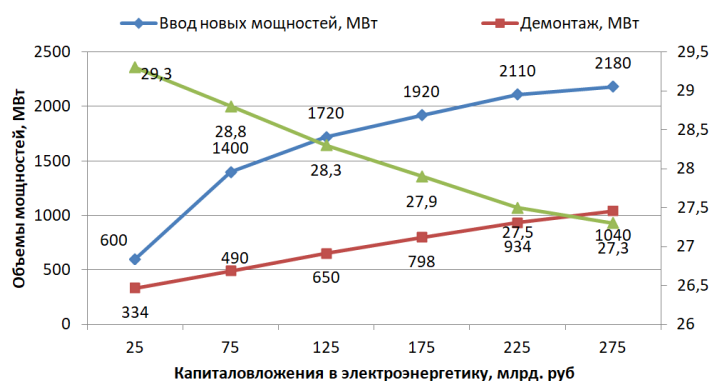


Рис. 6. Средние значения объемов демонтажа старого и ввода нового оборудования (МВт) и возраста оборудования (лет)

Эффективность предложенной технологии поддержки обоснования и принятия стратегических решений по развитию энергетики в первую очередь может быть оценена качественно, поскольку она обеспечивает научную обоснованность рекомендуемых решений по стратегическому развитию энергетики и тем самым повышает эффективность этих решений. Кроме того, применение этой технологии направлено на сокращение трудозатрат эксперта и, соответственно, сокращение времени на анализ и обоснование вариантов решений.

По экспертным оценкам (свидетельствам экспертов), для расчета и анализа результатов одного варианта требуется не менее одной недели работы эксперта (условно – 5 человеко-дней, или 40 часов), причем подключение специалистов дополнительно не ускорит работу, т.к. потребуются их обучение и «вхождение» в тему. На качественном уровне с использованием семантических моделей (на примере вычислительного эксперимента с угрозой ЭБ «Низкие темпы обновления электрогенерирующего оборудования»), обработка одного варианта может быть выполнена в течение одного дня (условно – 8 рабочих часов). Таким образом, даже с учетом того, что скорость и качество анализа существенно зависят от квалификации эксперта, можно считать, что время обработки информации только для одного варианта сокращается не менее, чем в 3–5 раз.

**Заключение.** В статье представлена технология управления знаниями в научных исследованиях, основанная на использовании онтологий, когнитивных моделей и продукционной экспертной системы. Предлагаемая технология включает этапы извлечения знаний, представления знаний, преобразование представлений знаний (переход от одного вида представления к другому) и интерпретации знаний.

В настоящее время, когда возрастают значение экспертных знаний, а также роль интеллектуальных инструментальных средств, предложенная технология направлена на интеллектуальную поддержку обоснования и формирования рекомендаций экспертами для подготовки научно обоснованных и взвешенных решений лицами, принимающими решения (ЛПР).

Новизна предложенного подхода состоит, во-первых, в интеграции различных интеллектуальных технологий (онтологии, когнитивное моделирование, экспертные системы) в рамках единой технологии управления знаниями в научных исследованиях; во-вторых, в автоматизации анализа и интерпретации когнитивных карт с помощью продукционных экспертных систем. В итоге можно говорить о повышении качества подготовки и обоснования рекомендаций для принятия решений (в нашем случае – решений по обеспечению энергетической безопасности).

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках научного проекта программы фундаментальных исследований СО РАН Ш.17.2, рег. № АААА-А17-117030310444-2, а также при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №19-07-00351, 18-07-00714, 19-57-04003.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения. – Новосибирск: СО РАН, 2011. – 198 с. – ISBN 978-5-7692-1163-8.
2. *Масель Л.В., Масель А.Г.* Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 135-141.
3. *Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Муромцев Д.И.* Инженерия знаний. Модели и методы: учебник. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 324 с.
4. *Гаврилова Т.А.* Онтологический инжиниринг. Технологии менеджмента знаний. – Режим доступа: [http://www.kntec.ru/publications/library/authors/ontolog\\_engineering.shtml](http://www.kntec.ru/publications/library/authors/ontolog_engineering.shtml) (дата обращения: 15.09.2019).
5. *De Leenheer P., de Moor A., Meersman R.* Context dependency management in ontology engineering: A formal approach // J. Data Semantics. – 2007. – No. 8. – P. 26-56.
6. *Euzenat J., Shvaiko P.* Ontology matching. – Heidelberg: Springer, 2013.
7. *Suarez-Figueroa M.C., Gomez-Perez A., Motta E., Gangemi A.* Ontology engineering in a networked world. – Springer Science & Business Media, 2012.
8. *Масель Л.В., Масель А.Г.* Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // III международная научно-техническая конференция OSTIS-2013: Тр. Беларусь, Минск: БГУИР, 2013. – С. 247-250.
9. *Масель Л.В.* Онтологический инжиниринг и управление знаниями для поддержки принятия стратегических решений по развитию интеллектуальной энергетики // Тр. XX Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ – 2017)». – М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2017. – С. 59-65. – ISBN 978-57307-1222-5, ISBN 978-5-7307-123323-2.
10. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
11. *Авдеева З.К., Коврига С.В.* Эвристический метод концептуальной структуризации знаний при формализации слабоструктурированных ситуаций на основе когнитивных карт // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН. 2010. – № 31. – С. 6-34.
12. *Масель А.Г.* Когнитивное моделирование в исследованиях проблем энергетической безопасности: применения и перспективы развития // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'14». – М.: Физматлит, 2014. – Т. 2. – С. 153-158.
13. *Groumpos P., Stylios C.* Modelling supervisory control systems using fuzzy cognitive maps // Chaos, Solitons & Fractals. – 2000. – Vol. 11, No. 1-3. – P. 329-336.

14. Papageorgiou E., Stylios C., Groumpos P. An integrated two-level hierarchical system for decision making in radiation therapy based on fuzzy cognitive maps // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2003. – Vol. 50, No. 12. – P. 1326-1339.
15. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 1 (23). – С. 66-76. – DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
16. Massel A.G., Pesterev D.V. Transformation of cognitive models into knowledge base of production expert system // Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. Germany, Baden-Baden. – Publisher Ufa: USATU, 2017. – Vol. 1, – P. 121-124. – ISBN 978-5-1030-8, ISBN 978-4-4221-1031-5.
17. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 2 (20). – С. 149-161. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
18. Топливо-энергетический комплекс России: 2000-2007 гг. (справочно-аналитический обзор) / под общ. ред. В.В. Бушуева, А.М. Мастепанова, А.И. Громова; Институт энергетической стратегии (ГУ ИЭС). – М.: ИАЦ «Энергия», 2008. – 359 с.
19. Топливо-энергетический комплекс России: 2000–2008 гг. (справочно-аналитический обзор) / под общ. ред. В.В. Бушуева, А.М. Мастепанова, А.И. Громова; Институт энергетической стратегии (ГУ ИЭС). – М.: ИАЦ «Энергия», 2009. – 316 с.
20. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2009 г. // Открытое акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы», 2010. – 23 с.
21. Еришевич В.В., Зайлигер А.Н., Илларионов Г.А. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

#### REFERENCES

1. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya [Energy security of Russia: problems and solutions]. Novosibirsk: SO RAN, 2011, 198 p. – ISBN 978-5-7692-1163-8.
2. Massel' L.V., Massel' A.G. Intel'ektual'nye vychisleniya v issledovaniyakh napravleniy razvitiya energetiki [Intelligent computing in studies of energy development directions], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2012, Vol. 321, No. 5, pp. 135-141.
3. Gavrilova T.A., Kudryavtsev D.V., Muromtsev D.I. Inzheneriya znaniy. Modeli i metody: uchebnik [Knowledge Engineering. Models and Methods: textbook]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2016, 324 p.
4. Gavrilova T.A. Ontologicheskii inzhiniring. Tekhnologii menedzhmenta znaniy [Ontological engineering. Knowledge Management Technologies]. Available at: [http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/ontolog\\_engeneering.shtml](http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/ontolog_engeneering.shtml) (accessed 15 September 2019).
5. De Leenheer P., de Moor A., Meersman R. Context dependency management in ontology engineering: A formal approach, *J. Data Semantics*, 2007, No. 8, pp. 26-56.
6. Euzenat J., Shvaiko P. Ontology matching. Heidelberg: Springer, 2013.
7. Suarez-Figueroa M.C., Gomez-Perez A., Motta E., Gangemi A. Ontology engineering in a networked world. Springer Science & Business Media, 2012.
8. Massel' L.V., Massel' A.G. Semanticheskie tekhnologii na osnove integratsii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytiynogo modelirovaniya [Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling], *III mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya OSTIS-2013: Tr. Belarus', Minsk: BGUIR, 2013* [III international scientific and technical conference OSTIS-2013: Transactions. Belarus, Minsk: BSUIR, 2013], pp. 247-250.
9. Massel' L.V. Ontologicheskii inzhiniring i upravlenie znaniyami dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh resheniy po razvitiyu intellektual'noy energetiki [Ontological engineering and knowledge management to support the adoption of strategic decisions on the development of intelligent energy], *Tr. XX Rossiyskoy nauchnoy konferentsii «Inzhiniring predpriyatiy i upravlenie znaniyami (IP&UZ – 2017)»* [Proceedings of the XX Russian Scientific Conference "Enterprise Engineering and Knowledge Management (IP & UZ - 2017)"]. Moscow: REU im. G.V. Plekhanova, 2017, pp. 59-65. ISBN 978-57307-1222-5, ISBN 978-5-7307-12332-2.
10. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy [Computer decision support]. Moscow: SINTEG, 1998, 376 p.

11. Avdeeva Z.K., Kovriga S.V. Evristicheskiy metod kontseptual'noy strukturizatsii znaniy pri formalizatsii slabostruktirovannykh situatsiy na osnove kognitivnykh kart [Heuristic method of conceptual structuring of knowledge in the formalization of poorly structured situations based on cognitive maps], *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of large systems]. Moscow: IPU RAN. 2010, No. 31, pp. 6-34.
12. Massel' A.G. Kognitivnoe modelirovanie v issledovaniyakh problem energeticheskoy bezopasnosti: primeneniya i perspektivy razvitiya [Cognitive modeling in studies of energy security problems: applications and development prospects], *Tr. Kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS&IT'14»* [Congress Proceedings on Intelligent Systems and Information Technology "IS & IT'14"]. Moscow: Fizmatlit, 2014, Vol. 2, pp. 153-158.
13. Groumpos P., Stylios C. Modelling supervisory control systems using fuzzy cognitive maps, *Chaos, Solitons & Fractals*, 2000, Vol. 11, No. 1-3, pp. 329-336.
14. Papageorgiou E., Stylios C., Groumpos P. An integrated two-level hierarchical system for decision making in radiation therapy based on fuzzy cognitive maps, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, Vol. 50, No. 12, pp. 1326-1339.
15. Massel' L.V., Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskii inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh resheniy v energetike [Ontological engineering to support strategic decision making in the energy sector], *Ontologiya proektirovaniya* [Design Ontology], 2017, Vol. 7, No. 1 (23), pp. 66-76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.
16. Massel A.G., Pesterev D.V. Transformation of cognitive models into knowledge base of production expert system, *Proceedings of the 19th International Workshop on Computer Science and Information Technologies. Germany, Baden-Baden*. Publisher Ufa: USATU, 2017, Vol. 1, pp. 121-124. ISBN 978-5-1030-8, ISBN 978-4-4221-1031-5.
17. Massel' L.V. Fraktal'nyy podkhod k strukturirovaniyu znaniy i primery ego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application], *Ontologiya proektirovaniya* [Design Ontology], 2016, Vol. 6, No. 2 (20), pp. 149-161. DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
18. Toplivno-energeticheskii kompleks Rossii: 2000-2007 gg. (spravochno-analiticheskiy obzor) [Fuel and energy complex of Russia: 2000–2007 (reference and analytical review)], under the ed. by V.V. Bushueva, A.M. Mastepanova, A.I. Gromova; Institute of Energy Strategy (SI IES). Moscow: IATS «Energiya», 2008, 359 p.
19. Toplivno-energeticheskii kompleks Rossii: 2000–2008 gg. (spravochno-analiticheskiy obzor) [Fuel and energy complex of Russia: 2000–2008 (reference and analytical review)], under the ed. by V.V. Bushueva, A.M. Mastepanova, A.I. Gromova; Institute of Energy Strategy (SI IES). Moscow: IATS «Energiya», 2009, 316 p.
20. Otchet o funktsionirovanii EES Rossii v 2009 g. [Report on the functioning of the UES of Russia in 2009], *Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo «Sistemnyy operator Edinoy energeticheskoy sistemy», 2010* [Open Joint Stock Company "System Operator of the Unified Energy System", 2010], 23 p.
21. Ershevich V.V., Zayliger A.N., Illarionov G.A. i dr. Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem [Reference design of electric power systems], under the ed. by S.S. Rokotyana i I.M. Shapiro. 3rd ed. revised and add. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 352 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Л.В. Аршинский.

**Массель Людмила Васильевна** – Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; e-mail: massel@isem.irk.ru; 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130; тел.: +79148736049; д.т.н.; профессор; г.н.с.

**Массель Алексей Геннадьевич** – e-mail: amassel@gmail.com; тел.: +79149271241; к.т.н.; с.н.с.

**Пестерев Дмитрий Вячеславович** – e-mail: pesterev.dmitriy@gmail.com; тел.: +79041135393; инженер.

**Massel Liudmila Vasilievna** – Melentiev Energy Systems Institute SB RAS; e-mail: massel@isem.irk.ru; 664033, Irkutsk, Lermontova st., 130; phone: +79148736049; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

**Massel Aleksey Genadievich** – e-mail: amassel@gmail.com; phone: +79149271241; cand. of eng. sc.; senior researcher.

**Pesterev Dmitrii Vyacheslavovich** – e-mail: pesterev.dmitriy@gmail.com; phone: +79041135393; engineer.