

УДК 004.81:621.31

## ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К СТРУКТУРИРОВАНИЮ ЗНАНИЙ И ПРИМЕРЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Л.В. Массель

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия  
massel@isem.irk.ru

### Аннотация

Статья описывает предложенный автором фрактальный подход к структурированию знаний, активно используемый для разработки онтологического пространства знаний, в первую очередь, в области энергетики. Вводится методологическое понятие фрактального информационного пространства и понятие фрактальной стратифицированной модели. Приводятся математическое описание этой модели и пример определения её фрактальной размерности. Рассматриваются примеры применения фрактального подхода и фрактальной стратифицированной модели в работах, выполненных под руководством автора.

**Ключевые слова:** фрактальный подход, фрактальная стратифицированная модель, слой (страта), отображение, инвариант, онтологическое пространство знаний

**Цитирование:** Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, №2(20). – С. 149-161. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.

### Введение

Фрактальный подход был предложен автором в девяностых годах прошлого века [1], и развит в монографии [2]. Следует заметить, что в своё время этот подход вызывал непонимание, тем не менее, он прошёл испытание временем и сейчас получает новое звучание, в частности, в связи с возможностью его применения для обоснования целесообразности введения мета-мета-...уровней при проектировании онтологического пространства знаний различных предметных областей, что будет показано ниже на примерах, связанных с энергетикой.

### 1 Понятие фрактальности

В 90-е годы прошлого столетия в разных областях знания активно осознавалось, что многие изучаемые системы, объекты и процессы имеют фрактальную структуру [3-5]. Понятие «фрактал», впервые введённое Мандельбротом в 1975 году, обозначает широкий класс естественных и искусственных топологических форм, главной особенностью которых является самоподобная иерархически организованная структура [6]. *Самоподобие*, или масштабная *инвариантность*, является характерным свойством фрактальных структур. Математически фрактал определяют как множество с *нецелой*, или *дробной*, размерностью (последняя характеризует скорость увеличения (или уменьшения) элементов фрактала с увеличением (или уменьшением) интервала масштабов, на котором фрактал рассматривается). В качестве математического аппарата предлагается использовать обобщение дифференциального и интегрального исчисления на дробные (включая комплексные) порядки производной и кратности интеграла, с введением для него нового наименования «фрактальное исчисление» [7].

Математический смысл фрактальности, связываемый с дробной или нецелой размерностью, довольно абстрактен, зато геометрический смысл фрактальности более нагляден и прост. Его можно трактовать (используя свойство самоподобия фракталов) как бесконечную (вверх и вниз) - пирамиду единообразно изменяющихся ступеней, причём такая «лестница» масштабов может быть не только иерархически-геометрической, но и скрытой во временном поведении системы. Физический смысл фрактала иллюстрируют ставшими уже хрестоматийными примерами кроны дерева, ветви ели, листа папоротника. Примерами фрактальности в пространстве могут быть модель солнечной системы и планетарная модель атома; фрактальности во времени - клонирование или развитие растения из семени.

В [4] говорится о том, что фрактальность – это свойство не самого объекта, а свойство, которое помогает лучше понять природу объекта. В нашем случае фрактальность используется не в математическом, а в философском смысле, как методологическое свойство, позволяющее одновременное рассмотрение разномасштабных объектов и процессов с сохранением инварианта при изменении масштаба.

## 2 Методологическое понятие фрактального информационного пространства

Скорость обнаружения фрактальных структур в разных областях знания (в физике, геологии, биологии [4-5] и др.) позволила сделать предположение, что знаниям также присуще свойство фрактальности. Проблема структурирования знаний наиболее активно рассматривается в рамках научного направления, условно называемого «искусственный интеллект». Несмотря на то, что теоретики этого направления стараются не использовать понятие «информация», фактически этот термин трактуется не в смысле энтропийной меры неопределённости Шеннона, а как мера приращения знаний либо синоним понятия «знания о предметной области» [8]. В качестве рабочего понятия в теории искусственного интеллекта берётся определение *знаний* как основных закономерностей предметной области (ПрО), позволяющих человеку решать конкретные производственные, научные и другие задачи, т.е. *знания* интерпретируются как факты, понятия, взаимосвязи, оценки, правила, эвристики (фактические знания), а также стратегии принятия решения в этой области (стратегические знания) [9].

Предложенная концептуальная модель структурирования знаний основана на представлении разных форм (видов) знаний как объектов расслоенного (стратифицированного) пространства [1, 2].

*Информационное пространство* определяется как пространство, в которое отображается вся доступная нам информация о жизнедеятельности живых и функционировании технических объектов - известная нам часть знаний о картине мира. Под *объектом* в этом информационном пространстве будем понимать некоторую совокупность свойств, проявляющихся в виде реального объекта или процесса. *Сущность объекта* - это инвариант, совокупность существенных и неизменяющихся свойств объекта. Тогда *информация* - это совокупность описания сущностей и отношений между ними (последние порождают изменяющиеся свойства объектов). В информационном пространстве можно представить сущность как дискретную точку - «свёртку» полной информации об объекте, а отношения - как векторы.

Предлагаемая концептуальная модель названа *стратифицированной фрактальной моделью* (или *ФС-моделью*). При построении ФС-модели вводится понятие *информационных миров* - подпространств, объединяющих однотипные информационные объекты, т.е. объекты, определяемые совокупностью свойств, являющихся существенными в этом рассмотрении (координат данного подпространства).

ФС-модель определяется как совокупность непересекающихся слоёв (информационных миров) и их отображений в информационном пространстве. Каждому уровню соответствует свой слой (страта) этого пространства, и, следовательно, свой информационный мир; последовательность отображений отражает процесс познания. Графически ФС-модель удобно представлять в виде совокупности вложенных сферических оболочек. Информационный объект, обозначаемый условно точкой на одной из сфер, в свою очередь, может быть расслоен при необходимости более детального его рассмотрения (возвращаясь к аналогии с «частично-волновым дуализмом», в одном случае может быть удобно рассматривать сложный объект как точку, а в другом - перейти к более детальному рассмотрению выбранного объекта при сохранении «точечного» представления других).

Поскольку знания любого исследователя не всеобъемлющи, каждый практически работает со своим «фракталом» знаний - «вырезкой» из информационного пространства, которую можно представить в виде конуса или пирамиды, что соответствует, например, выделению дисциплин при изучении реального мира. Тогда наша сфера оказывается состоящей из множества пирамид «конусов», что согласуется с «пирамидами знаний» в когнитологии [9].

Ответ на часто задаваемый вопрос при обсуждении фрактального подхода: «Почему фрактальность, а не рекурсия?», состоит в том, что мы считаем рекурсию частным случаем проявления фрактальности. Более того, фрактальный подход может рассматриваться как обобщение объектного подхода к проектированию программных и информационных систем.

### 3 Формализованное описание фрактальной стратифицированной модели

Ниже формулируются, с использованием обозначений теоретико-множественного описания ФС-модели, основные принципы предлагаемого методического подхода к структурированию знаний ПрО [2].

Вся существующая информация о ПрО (знания о реальных объектах и процессах) может быть отображена в информационное пространство  $L$ , состоящее из информационных объектов  $l_i$ :

$$L = \{l_i\}, i = \overline{1, n}.$$

Информационный объект  $l_i$  представляется в виде совокупности свойств  $P_j$ , отражающих реальный объект или процесс:

$$l_i = \{P_j\}, j = \overline{1, m}.$$

Знания некоторой ПрО могут быть структурированы с помощью ФС-модели, определяемой тройкой  $(S, F, G)$  и представляющей пространство  $L$  в виде слоёв (информационных миров) однотипных объектов  $l_i$ , если:

- 1) каждый информационный мир  $S$  может быть расслоен;
- 2) информационный объект  $l_i$  - совокупность элементарных или сложных свойств;
- 3) заданы разбиения  $S$  на слои однотипных объектов

$$S = \{s_i\}, i = \overline{1, n},$$

$$\left( \bigcup s_i = S, s_i \cap s_j = \emptyset, i \neq j \right)$$

такие, что слой  $S_i$  в свою очередь может быть расслоен;

- 4) задано множество отображений  $F$  (из любого слоя в каждый)

$$F = \left\{ F_j^i : s_i \rightarrow s_j, F_j^l = \left\{ f_m^k : l_k \rightarrow l_m \right\}, \right.$$

$$\left. (s_i, s_j) \in S, l_k \in s_i, l_m \in s_j, \right.$$

таких, что сохраняются инварианты (существенные свойства любого  $l_i$  или всех  $l_i \in s_j$ );

- 5) задано множество инвариантов  $G$  (инвариант задаётся логической функцией (предикатом), принимающей значение «истина» или «ложь»), определяемое тройкой

$$(G_0, G_i, g_j), i=\overline{1, n}, j=\overline{1, m},$$

где  $G_0$  - инвариант разбиения  $S$ ,  $G_i$  - инвариант слоя  $s_i$ ,  $g_j$  - инвариант объекта  $l_j$ ,

$G_0(S)$  – «истина», если  $(G_1(s_1) \& G_2(s_2) \dots \& G_n(s_n))$  – «истина», а

$G_i(S_i)$  – «истина», если  $(g_1(l_1) \& g_2(l_2) \dots \& g_m(l_m))$  – «истина».

На рисунке 1 показан фрагмент ФС-модели (для разбиения  $S$ ), где выделен конус (соответствующий, например, ПрО), в котором показаны слои  $S_i$  и возможные отображения  $F_j^i$ .

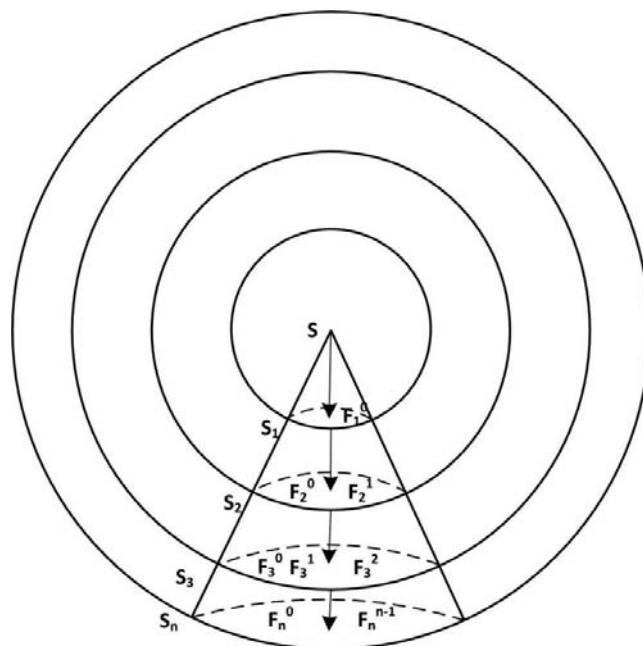


Рисунок 1 - Пример графического представления фрактальной стратифицированной модели

#### 4 Один из подходов к определению размерности ФС-модели

При информационном моделировании или извлечении знаний об объекте можно условно поместить в центр ФС-модели изучаемый объект, считая, что его сущность окружена «слоями» информации, каждый из которых характеризует какой-то аспект (функциональную совокупность аспектов) жизнедеятельности объекта.

Тогда внешняя поверхность сферы есть пространство данных, причем нам известны, как правило, только некоторые точки этой поверхности. Внутренние слои – слои знаний об объекте, и они тем «концентрированнее», или агрегированнее, чем «ближе» к сущности объекта (или чем точнее описывают объект). Отображения слоёв можно сопоставить с переходами от фактов – к понятиям, далее – к правилам, закономерностям, законам. В связи с этим, отталкиваясь от понятий «область знаний» и «глубина знаний», можно рассмотреть один из подходов к определению фрактальной размерности ФС-модели.

Применим формальный метод, который позволит получить как степенной закон, так и выразить степенной показатель через фрактальную размерность.

Пусть гипотетическая область знаний имеет «длину»  $L$  (рисунок 2а), где некоторая часть (образно говоря, «рассекающая» гипотетическую область знания) нам неизвестна – см. рису-

нок 2б. В каждой области знаний все равно остаются неизведанные области (рисунок 2в). Тогда процесс получения новых знаний можно проиллюстрировать рисунком 3.

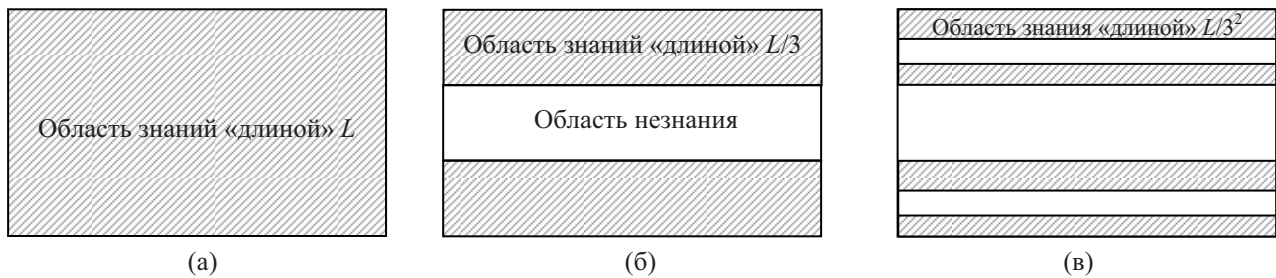


Рисунок 2 – Соотношение известного и неизвестного в гипотетической области знания

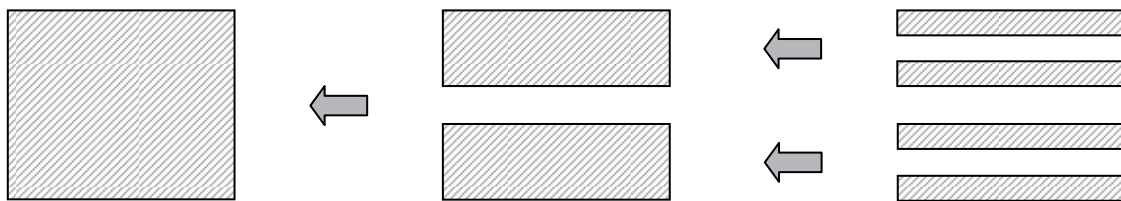


Рисунок 3 – Образная картина процесса получения знаний

Получаемая в итоге структура (см. рисунок 3) называется канторовским множеством, которое имеет фрактальную размерность:

$$(1) \quad D = \ln 2 / \ln 3$$

Введём понятие «глубина знаний»  $H$ , которая, очевидно, будет зависеть от размера области знаний, т.е.  $H = H(L)$ .

Согласно концептуальному рассуждению, которое фиксирует рисунок 3, увеличение глубины знаний в 2 раза сопровождается уменьшением размера области знаний в 3 раза. Отсюда следует функциональное уравнение:

$$2 \cdot H = H(L / 3).$$

Его решение:

$$H(L) \sim L^{-\ln 2 / \ln 3}.$$

Отождествляя  $\ln 2 / \ln 3$  с фрактальной размерностью  $D$  (1), находим

$$H(L) \sim L^{-D}.$$

В таком виде формула имеет общий характер. Таким образом:

$$\text{глубина знаний} = (\text{область знаний})^{-D}.$$

## 5 Примеры применения фрактального подхода

### 5.1 Фрактальный подход к построению информационных технологий

В соответствии с классической традиционной цепочкой решения задачи в области информационных технологий (задача – модель – алгоритм – программа – данные – программный продукт) можно выделить основные базовые слои или миры: мир математических моделей, мир алгоритмов, мир программ, мир моделей данных, мир моделей знаний. Учитывая последние тенденции, их можно дополнить миром онтологий.

Переход от «слоя» к «миру» обусловлен тем, что графически после расслоения информационного пространства мы можем представить любой слой в виде совокупности вложенных сферических оболочек.

При использовании фрактального подхода мы можем представить любую информационную технологию (ИТ) как совокупность информационных слоёв и их отображений. Процесс построения информационной технологии в таком случае заключается в разработке способов описания информационных слоёв (или объектов) и способов отображений из любого слоя в каждый, а реализация этих способов даёт инструментальные средства поддержки конкретной информационной технологии [2].

Фрактальность здесь проявляется, в частности, в том, что предлагаемый подход работает при построении разномасштабных информационных технологий: например, от проектирования ИТ системных исследований в энергетике (ИТ «в большом») до реализации конкретных информационно-программных систем (ИТ «в малом»).

Использование ФС-модели при построении ИТ позволяет:

- концептуально объединить разные способы структурирования знаний, применяемые в различных областях знаний, необходимых для решения поставленной задачи;
- применять различные способы выделения и упорядочивания слоёв (миров) в зависимости от поставленной цели;
- акцентировать внимание на актуальных мирах, являющихся предметом конкретной работы, отдавая должное значимости других миров;
- обеспечить последовательное осуществление стратегии построения информационной технологии (что достигается введением инварианта), независимо от глубины расслоения отдельных миров.

В частности, применение фрактального подхода для разработки инструментальных средств и языка ситуационного управления рассмотрено в [10].

## 5.2 Фрактальный подход к созданию ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике

В Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН под руководством автора выполнен проект по созданию ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике с использованием фрактального подхода.

Под *ИТ-инфраструктурой* понимается *телекоммуникационная распределённая информационно-вычислительная инфраструктура*, а именно, совокупность технических и программных средств, телекоммуникаций и информационной базы научных исследований, технологий их разработки и использования, стандартов (как внутренних, так и внешних) для разработки информационных и программных продуктов в области исследований в энергетике, обмена ими и их представления на информационный рынок [11].

В составе ИТ-инфраструктуры выделяются: распределённая вычислительная, информационная и телекоммуникационная инфраструктуры (последняя связана с техническими аспектами создания ИТ-инфраструктуры). В последнее время она дополнена интеллектуальной инфраструктурой, включающей базы знаний, онтологии и интеллектуальные системы. Концепция создания ИТ-инфраструктуры методологически обосновывается с помощью ФС-модели, представленной на рисунке 4.

ФС-модель ИТ-инфраструктуры графически представляется в виде совокупности вложенных сферических оболочек (слоёв), определяемой тройкой  $(S, F, G)$ , где  $S$  - множество слоёв,  $F$  - множество отображений,  $G$  - множество инвариантов. ИТ-инфраструктура  $S$ , согласно фрактальной методологии, расслаивается (стратифицируется) на интеграционную

информационную инфраструктуру ( $S_I$ ), распределённую вычислительную инфраструктуру ( $S_C$ ) и телекоммуникационную инфраструктуру ( $S_T$ ). В свою очередь,  $S_I$  раслаивается на слои данных и метаданных ( $S_{ID}, S_{IM}$ );  $S_C$  - на слои программ и метаописаний программ ( $S_{CP}, S_{CM}$ ). Вводятся отображения слоёв:  $F_C^I : S_I \rightarrow S_C$ ,  $F_T^I : S_I \rightarrow S_T$ ,  $F_T^C : S_C \rightarrow S_T$ . Инвариантами ( $G$ ) являются цели системных исследований в энергетике, которые детализируются для каждого слоя. Для описания метаслоёв разработаны информационные модели, модели данных и онтологии; для реализации средств поддержки отображений – соответствующие Web-сервисы.

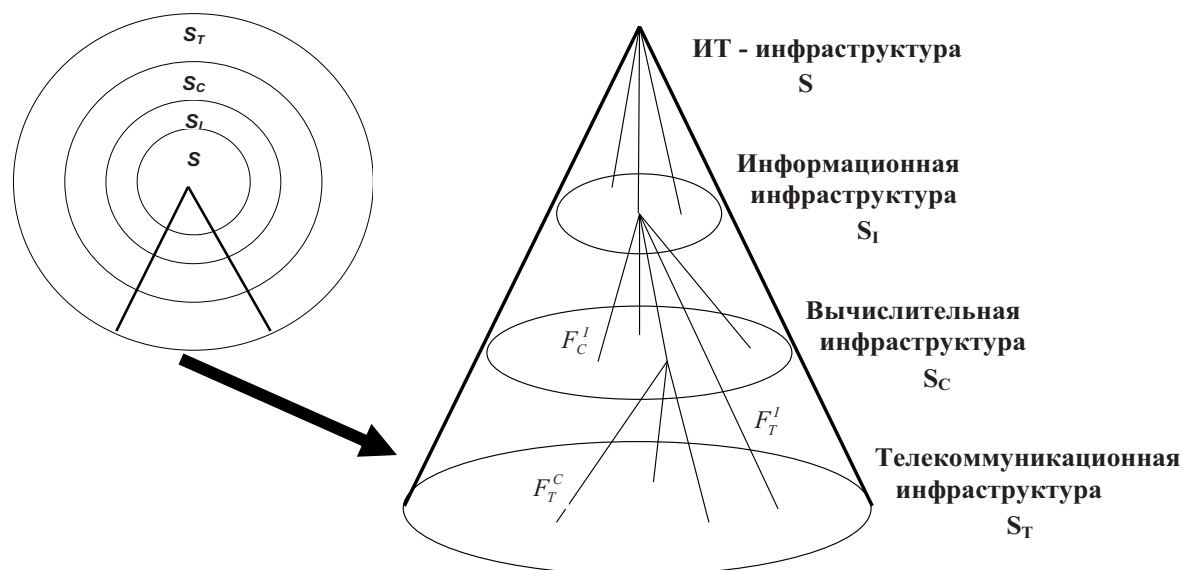


Рисунок 4 - Фрактальная стратифицированная модель ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике

### 5.3 Применение фрактального подхода при построении информационных систем и систем поддержки принятия решений

Фрактальный подход был применён при разработке ряда информационных систем, например, информационной системы для социологических исследований [12], в которой выделялись слои социологии, математической статистики и программной реализации. ФС-модель была успешно использована при разработке информационных структур, предназначенных для хранения закономерностей и объектов, описывающих группы анкет, отображенных по каким-либо признакам.

При разработке информационной системы мониторинга углеводородного сырья в ФС-модели выделялись четыре основных информационных подпространства (слоя): описание ПрО, метаслой (хранилище метаданных или Репозитарий), информационный слой (база данных) и пользовательский (интерфейс). Одна из работ связана с применением фрактального подхода для обоснования и поддержки принятия решений [13].

Для работы с информационным пространством данных и знаний создаётся единая информационная среда  $I_E$ , которая объединяет описание данных и знаний  $\{D\}$  и инструментальных средств работы с ними  $\{T\}$ :  $I_E = \{D\} \cup \{T\}$ .

Информационное пространство данных и знаний для принятия решений можно представить как:

$$D = \{D_C, D_B, D_V, D_G, D_R\},$$

где  $D_C$  – слой исходных данных и знаний,  $D_B$  – слой данных и знаний для обоснования решений,  $D_V$  – слой геоданных для визуализации решений,  $D_G$  – слой данных и знаний для выработки решений,  $D_R$  – слой данных и знаний для реализации решений (рисунок 5).

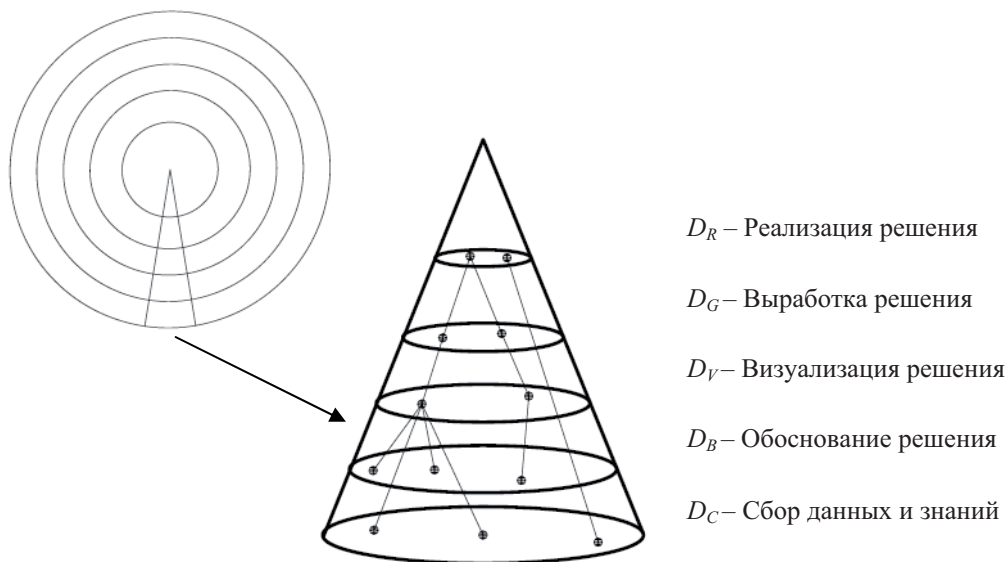


Рисунок 5 - Слои информационного пространства, выделяемые при поддержке принятия решений

Согласно концепции ФС-модели, можно построить отображения из любого слоя в каждый.

В нашем случае используются 8 типов отображений:

- $F_B^C : D_C \rightarrow D_B$  - отображение из слоя исходных данных и знаний в слой данных и знаний для обоснования решений;
- $F_V^C : D_C \rightarrow D_V$  - отображение из слоя исходных данных и знаний в слой данных для визуализации;
- $F_G^C : D_C \rightarrow D_G$  - отображение из слоя исходных данных и знаний в слой данных и знаний для выработки решений;
- $F_G^B : D_B \rightarrow D_G$  - отображение из слоя исходных данных и знаний для обоснования решений в слой данных и знаний для выработки решений;
- $F_V^B : D_B \rightarrow D_V$  - отображение из слоя исходных данных и знаний для обоснования решений в слой данных для визуализации;
- $F_G^V : D_V \rightarrow D_G$  - отображение из слоя исходных данных для визуализации в слой данных и знаний для выработки решений;
- $F_R^G : D_G \rightarrow D_R$  - отображение из слоя данных и знаний для выработки решений в слой данных и знаний для реализации решений;
- $F_R^V : D_V \rightarrow D_R$  - отображение из слоя данных для визуализации в слой данных и знаний для реализации решений.

Отображения поддерживаются инструментальными средствами:

$$T = \{T_V, T_{IT}, T_{IE}\},$$

где  $T_V$  – инструментальные средства визуализации (геокомпонент),  $T_{IT}$  – инструментальные средства интеллектуальной ИТ-среды,  $T_{IE}$  – инструментальные средства единой информационной среды (ИТ-инфраструктуры).



В свою очередь, информационное пространство данных и знаний для принятия решений  $D$  может быть расслоено:  $D = \{D_k\} \cup \{Z_k\}$ , где  $D_k$  – слой данных,  $Z_k$  – слой знаний.

#### 5.4 Фрактальный подход к построению онтологического пространства знаний в энергетике

Для поддержки системных исследований в энергетике необходимо создание единого онтологического пространства знаний в области энергетики, что обусловлено следующим.

Системные исследования энергетики предусматривают комплексное рассмотрение исследуемых проблем и интегрируют исследования систем энергетики (электроэнергетических, тепло-, газо-, нефте-, нефтепродуктоснабжения), энергетической безопасности России, региональных проблем энергетики, взаимосвязей энергетики и экономики, перспективных энергетических источников и систем, прикладной математики и информатики [11].

Иными словами, выполняются исследования развития и функционирования как отраслевых систем энергетики (электроэнергетических, газо-, нефте- и нефтепродуктоснабжающих, теплоснабжающих и др.), так и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в целом. Исследования выполняются для России, её регионов и СНГ. Результаты исследований отраслевых систем энергетики зачастую являются исходными данными для исследований ТЭК, а результаты исследований направлений развития ТЭК должны учитываться при исследованиях развития отраслевых систем энергетики. Таким образом, для проведения системных исследований энергетики необходимы координация и согласование исходной и результирующей информации для получения обоснованных выводов и рекомендаций, которые готовятся для внешних организаций, а для этого необходимо создание интегрированной информационной и вычислительной среды исследований, включающей онтологическое пространство знаний.

Необходимость создания единого онтологического пространства знаний в энергетике обусловлена актуальностью проблемы сохранения уникальных знаний учёных старшего поколения, связанной с тем, что в 90-х годах прошлого века произошел отток научных кадров из институтов Академии наук, в связи с чем в ИСЭМ СО РАН, как и во многих других институтах, наблюдается возрастной разрыв (недостаточное количество учёных среднего возраста при наличии большого контингента молодых учёных и аспирантов).

На рисунках 6-8 приведены построенные в SMarTools примеры онтологий, иллюстрирующие применение фрактального подхода при построении онтологического пространства знаний в энергетике.

Метаонтология, в которой определены базовые понятия ТЭК, приведена на рисунке 6. Значок в блоке «Электроэнергетические системы» обозначает возможность перехода на следующий уровень – к метаонтологии электроэнергетических систем (рисунок 7), а из неё – к уровню детальных или комбинированных онтологий. На рисунке 8 приведена одна из детальных онтологий – онтология транспорта электроэнергии, которая, в свою очередь, может рассматриваться как метаонтология или комбинированная онтология, если возникнет необходимость детализации входящих в неё понятий (например, понятия «сетевые компании»).

Для наполнения онтологического пространства знаний разработан ряд онтологий, описанных, например, в [14-16], выполнен онтологический инжиниринг проблемы ситуационного управления в энергетике [17].

### Заключение

В статье рассмотрен фрактальный подход к структурированию знаний. Предложена фрактальная стратифицированная модель информационного пространства, приведено её

формализованное описание, рассмотрен один из подходов к определению фрактальной размерности.

Приведены примеры применения фрактального подхода для построения информационных технологий, при разработке ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике, при построении информационных систем и систем поддержки принятия решений; при построении онтологического пространства знаний в энергетике.

Следует заметить, что научные направления, связанные с использованием фракталов, продолжают активно развиваться [18-20].

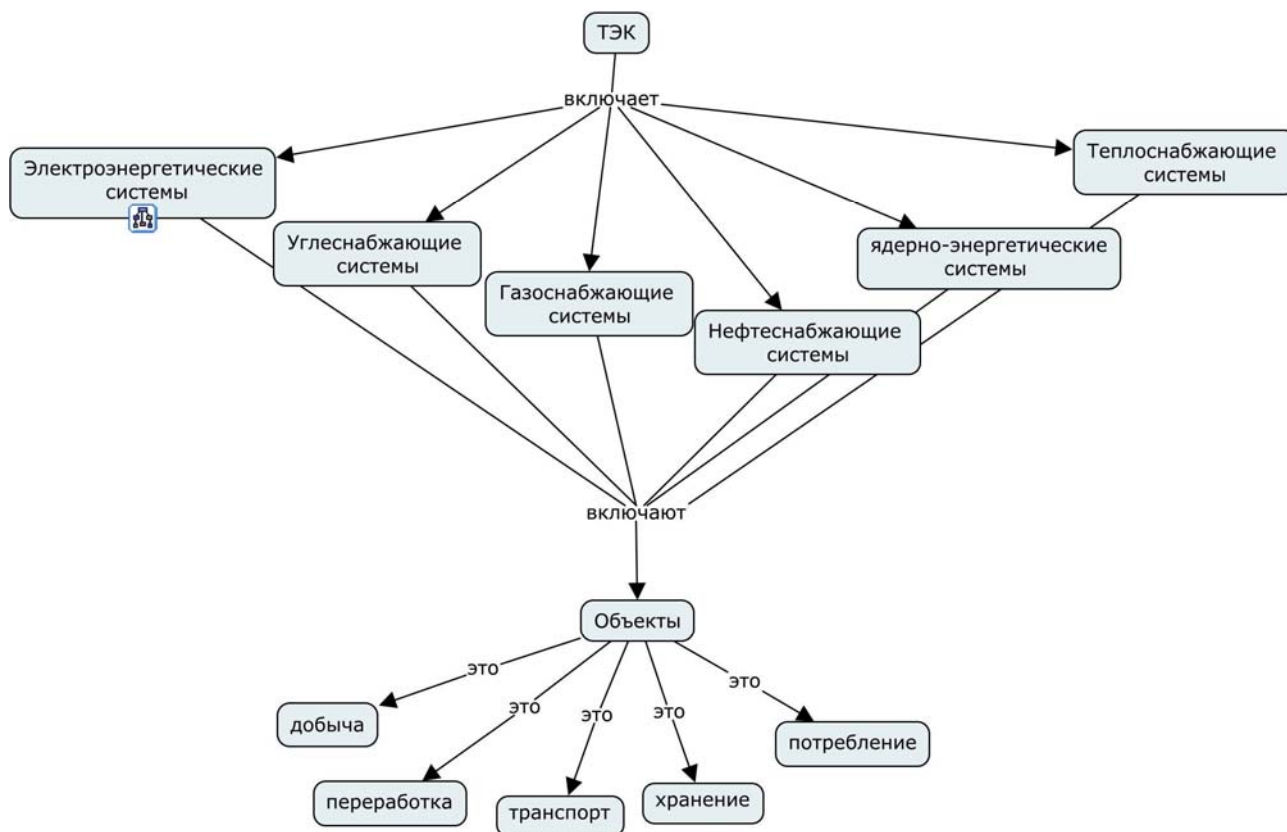


Рисунок 6 - Метаонтология топливно-энергетического комплекса



Рисунок 7 - Метаонтология электроэнергетических систем

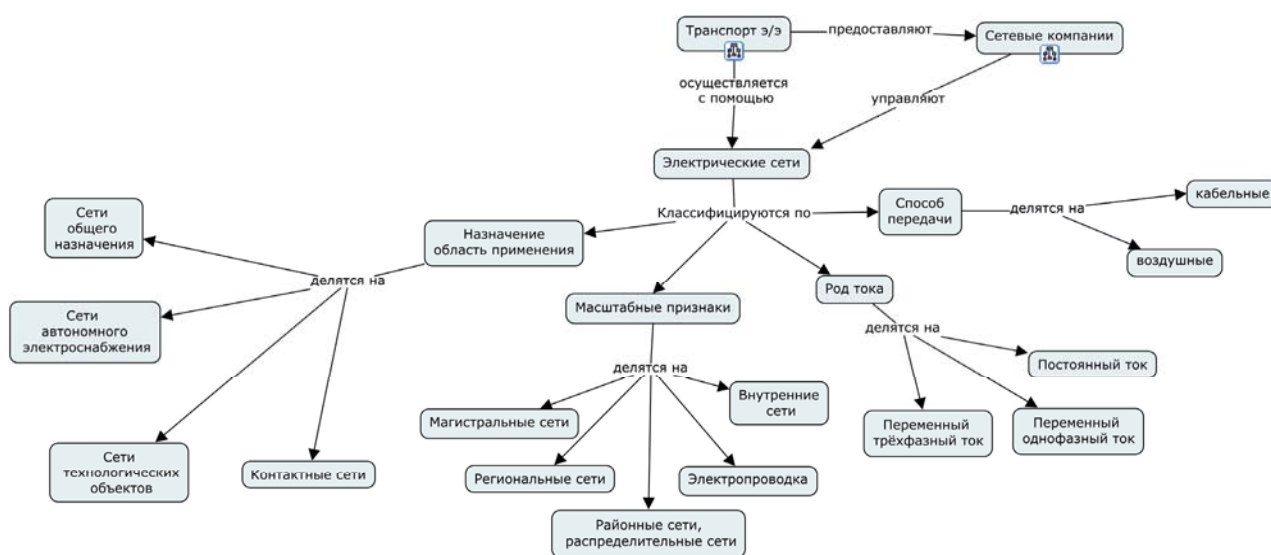


Рисунок 8 - Онтология транспорта электроэнергии

## Благодарности

Автор благодарит сотрудников лаборатории Информационных технологий ИСЭМ СО РАН, совместная работа с которыми и обсуждение научных проблем способствовали формулировке результатов, представленных в статье. Кроме того, автор выражает благодарность энтузиасту «фрактальных вычислений» Балханову В.К. за предложенный подход к определению фрактальной размерности ФС-модели.

Результаты, изложенные в статье, получены при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-07-00474 и № 16-07-00569, а также гранта Программы Президиума РАН №229 (2015-2017).

## Список источников

- [1] Массель, Л.В. Фрактальная модель структурирования знаний / Л.В. Массель // Сб. науч. трудов Национальной конференции с международным участием "Искусственный интеллект-94". Т. 1 - Рыбинск, 1994. - С. 46-49.
- [2] Массель, Л.В. Фрактальный подход к построению информационных технологий / В кн.: Криворучкий Л.Д., Массель Л.В. Информационная технология исследований развития энергетики. - Новосибирск: «Наука», Изд. фирма РАН, 1995. - С. 40-67.
- [3] Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. - М.: Мир, 1991. - 176 с.
- [4] Фракталы в физике / Труды IV Международного симпозиума по фракталам в физике. - М.: Мир, 1988. - 682 с.
- [5] Урицкий, В.М., Музалевская, Н.И. Фрактальные структуры и процессы в биологии / В.М. Урицкий, Н.И. Музалевская // В сб. трудов «Биомедицинская информатика и эниология (проблемы, результаты, перспективы)» / Под ред. Р.И. Полонникова, К.Г. Короткова - Санкт-Петербург: "Ольга", 1995. - С. 84-129.
- [6] Пайтген, Х.-О. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Х.-О. Пайтген, П.Х. Рихтер. - М.: Мир, 1993. - 176 с.
- [7] Fractals: Non-integral Dimensions and Applications / Under the direction of G. Cherbit. - New York, John Wiley & Sons, 1991. - 249 p.
- [8] Новик, И.Б. Введение в информационный мир / И.Б. Новик, А.Ш. Абдуллаев. - М.: Наука, 1991.- 228 с.
- [9] Гаврилова, Т.А. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем / Т.А. Гаврилова, К.Р. Червинская. - М.: Радио и связь, 1992. - 200 с.

- [10] **Массель, Л.В.**, Методы и средства ситуационного управления в энергетике на основе семантического моделирования / Л.В. Массель, А.Г. Массель // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015): Материалы V международ. науч.-тех. конф. (19-21 февраля 2015 г. Минск, Беларусь) – Минск: БГУИР, 2015. – С. 199-204.
- [11] **Воропай, Н.И.** ИТ-инфраструктура системных исследований в энергетике и предоставление ИТ-услуг / Н.И. Воропай, Л.В. Массель // Известия АН. Энергетика. - 2006. - №3. – С. 86-93.
- [12] **Массель, Л.В.** Разработка информационной системы для социологических исследований с использованием стратифицированной фрактальной модели / Л.В. Массель, И.В. Васильев // Вестник ИрГТУ. – 2004. – №2(18) – С. 98-103.
- [13] **Массель, Л.В.** Моделирование этапов принятия решений на основе сетецентрического подхода / Л.В. Массель, Р.А. Иванов, А.Г. Массель. // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №10(81). – С. 16-21.
- [14] **Ворожцова, Т.Н.** Онтология как основа для разработки интеллектуальной системы обеспечения кибербезопасности. Т.Н. Ворожцова // Онтология проектирования. – 2014. - №4(14). – С. 69-77.
- [15] **Копайгородский, А.Н.** Применение онтологий в семантических информационных системах / А.Н. Копайгородский // Онтология проектирования. – 2014. – №4(14). – С. 78-89.
- [16] **Массель, Л.В.** Применение онтологий в исследованиях и поддержке принятия решений в энергетике / Л.В. Массель., Т.Н. Ворожцова, А.Н. Копайгородский, Н.Н. Макагонова, С.К. Скрипкин // Знания – Онтологии – Теории: Материалы Всероссийской конф. с международным участием (8-10 октября 2013 г., Новосибирск, Россия). Т. 2.– Новосибирск: Институт математики СО РАН, 2013. - С. 29-38.
- [17] **Кроновер, Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах / Р.М. Кроновер. - М.: Постмаркет, 2000.- 352 с.
- [18] **Мандельброт, Б.** Фрактальная геометрия природы = The Fractal Geometry of Nature / Б. Мандельброт. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 656 с.
- [19] **O'Connor, J.J.** A History of Fractal Geometry / J.J. O'Connor, E.F. Robertson // MacTutor History of Mathematics archive. School of Mathematics and Statistics.- University of St Andrews, Scotland, 2009.  
URL: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/HistTopics/fractals.html>. Дата обращения 22.04.2016
- [20] **Falconer, K.** Fractals. A Very Short Introduction / K. Falconer. - Oxford University Press, 2013. - 152 p.
- 

## FRactal Approach to Knowledge Structuring and Examples of Its Application

L.V. Massel'

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia  
[massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

### Abstract

The article describes proposed by author a fractal approach to knowledge structuring, which actively used for developing to the ontological space of knowledge, primarily in the energy field. We introduce the methodological concept of the fractal information space and the concept of fractal stratified (FS) model. It's given mathematical description of the FS-model and one method for determining of the fractal dimension. The examples of the application of fractal approach and FS-model in the work carried out under the guidance of author were considered.

**Key words:** fractal approach, the fractal stratified model, stratum, mapping, invariant, ontological knowledge space

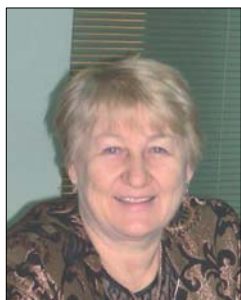
**Citation:** Massel LV. Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application. Ontology of Designing. 2016; v.6, 2(20): 149-161. - DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.

### References

- [1] **Massel' LV.** Fractal model of knowledge structuring [In Russian] / National conference with international participation "AI-94": proceedings. Vol. 1. Rybinsk, 1994: 46-49.
- [2] **Massel' LV.** Fractal approach to the construction of information technologies [In Russian]. Information technology of energy development research. Novosibirsk: "Nauka"; 1995: 40-67.

- [3] *Feder E.* Fractals [In Russian]. Moscow: “Mir”; 1991.
- [4] Fractals in physics [In Russian]. IV International Symposium on fractals in physics: proceedings. Moscow: “Mir”; 1988.
- [5] *Urlickij VM, Muzalevskaja NI.* Fractal structures and processes in biology [In Russian]. “Biomedical informatics and eniology (problems, results, perspectives)”. Eds.: Polonnikova RI, Korotkova KG. Saint-Petersburg: “Ol'ga”; 1995: 84-129.
- [6] *Pajtgen H-O, Rihter PH.* The beauty of fractals. Images of complex dynamical systems [In Russian]. Moscow: “Mir”; 1993.
- [7] Fractals: Non-integral Dimensions and Applications. Under the direction of G. Cherbit. New York, John Wiley & Sons; 1991.
- [8] *Novik IB., Abdullaev ASH.* Introduction to the world of information [In Russian]. Moscow: “Nauka”; 1991.
- [9] *Gavrilova TA, Chervinskaja KR.* Extraction and structuring of knowledge for expert systems [In Russian]. Moscow: “Radio i svjaz”; 1992.
- [10] *Massel LV, Massel' AG.* Methods and tools for situational management in the energy sector based on semantic modeling [In Russian]. Proc. V International Conference OSTIS. Minsk: BGUIR; 2015: 199-204.
- [11] *Voropaj NI, Massel' LV.* IT-infrastructure of energy system research and the provision of IT-services [In Russian]. Proceedings of the Academy of Sciences – Energetics, 2006; 3: 86-93.
- [12] *Massel' LV, Vasil'ev IV.* The development of an information system for sociological research using stratified fractal model [In Russian]. Bulletin of Irkutsk State Technical University, 2004; 2(18): 98-103.
- [13] *Massel' LV, Ivanov RA, Massel' AG.* Stages modeling of the decision making on the basis of network-centric approach [In Russian]. Bulletin of Irkutsk State Technical University, 2013; 10(81): 16-21.
- [14] *Vorozhova TN.* Ontology as a basis for the development of intelligent cyber security system [In Russian]. Ontology of designing, 2014; 4(14): 69-77.
- [15] *Kopajgorodskij AN.* The use of ontologies in the semantic information systems [In Russian]. Ontology of designing, 2014; 4(14): 78-89.
- [16] *Massel' LV, Vorozhova TN, Kopajgorodskij AN, Makagonova N.N, Skripkin SK.* The use of ontologies in the research and decision making support in the energy sector [In Russian]. Proc. 4rd All-Russian Conf. “Knowledge – Ontologies – Theories” (Novosibirsk, Russia, October 8-10, 2013). Vol. 2 – Novosibirsk: Sobolev Institute SB RAS; 2013: 29-38.
- [17] *Kronover RM.* Fractals and chaos in dynamic systems [In Russian]. Moscow: Postmarket 2000.
- [18] *Mandel'brot B.* The Fractal Geometry of Nature [In Russian]. Moscow: Institute of Computer Science, 2002.
- [19] *O'Connor JJ, Robertson FF.* A History of Fractal Geometry. MacTutor History of Mathematics archive. School of Mathematics and Statistics, University of St Andrews, Scotland; 2009. Source: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/HistTopics/fractals.html>.
- [20] *Falconer K.* Fractals. A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2013.

## Сведения об авторах



**Массель Людмила Васильевна**, 1949 г. рождения. Окончила Томский политехнический институт, факультет автоматики и вычислительной техники по специальности «Прикладная математика» (1971). Доктор технических наук (1995). Главный научный сотрудник, зав. лабораторией информационных технологий Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, профессор кафедры «Автоматизированные системы» Института кибернетики Иркутского национального технического университета. В списке научных трудов более 200 статей в области семантического моделирования, проектирования информационных систем и технологий, разработки систем интеллектуальной поддержки принятия решений в области энергетики.

**Liudmila Vasilievna Massel** (b. 1949) graduated from the Tomsk Polytechnic Institute, Faculty of Automation and Computer Engineering in the specialty “Applied Mathematics” in 1971, Doctor of Technical Sciences (1995). Chief Researcher, Head of Information Technologies Laboratory in Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Professor of Automated Systems Department of the Cybernetic Institute in the Irkutsk National Research Technical University. The list of scientific works includes more than 200 articles in the field of semantic modeling, design of information systems and technologies, and the development of intelligent decision support systems in the field of energy solutions.