

## ВЕБ-СИСТЕМЫ ПО ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫМ МОДЕЛЯМ И МЕТОДАМ В ПРОГРАММИРОВАНИИ

В. Н. Касьянов<sup>1</sup> [0000-0002-4899-9429], Е. В. Касьянова<sup>2</sup> [0000-0002-3412-0997]

<sup>1, 2</sup>Институт систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>kvn@iis.nsk.su, <sup>2</sup>kev@iis.nsk.su

### **Аннотация**

Теория графов из академической дисциплины все более превращается в средство, владение которым становится решающим для успешного применения компьютеров во многих прикладных областях. Несмотря на наличие обширной специальной литературы по решению задач на графах, широкое применение в практике программирования полученных математических результатов затруднено в силу отсутствия систематического их описания, ориентированного на программистов. Поэтому значительный класс практических задач, по существу сводящихся к простому выбору подходящего способа решения и построению конкретных формулировок абстрактных алгоритмов, для многих программистов все еще остается полем для интеллектуальной деятельности по «переоткрытию» известных методов. Статья посвящена разрабатываемому в Институте систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН цифровому вики-словарю WikiGRAPP по теории графов и ее применениям в информатике и программировании и цифровой вики-энциклопедии WEGA теоретико-графовых алгоритмов решения задач информатики и программирования.

**Ключевые слова:** теоретико-графовые модели, теоретико-графовые методы, программирование, цифровой вики-словарь, цифровая вики-энциклопедия.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Современное программирование невозможно представить себе без применения теоретико-графовых моделей и методов. Хорошо известно, что многие задачи повышения эффективности и надежности конструирования программ с использованием языков высокого уровня и трансляторов были сформулированы и решены как задачи на графах. К ним в первую очередь относятся задачи, связанные с представлением алгоритмов, программ и систем в виде теоретико-графовых моделей. Роль теоретико-графовых методов в программировании существенно возросла в последние годы в связи с появлением параллельных компьютеров и сетей, а также новых предметных областей, таких как веб-графы, социальные сети, семантический веб, базы знаний, библиографические сети, сети белок-белковых взаимодействий и многие другие.

Началом широкого внедрения методов теории графов в практику научных и технических исследований следует считать 50-е г. XX в. В те годы были опубликованы отчеты американской корпорации RAND по математическим исследованиям в военной области, которые проводились в США во время и после окончания Второй мировой войны. Книги по теории графов К. Бержа [1] и О. Оре [2], вышедшие в начале 1960-х г., уже содержали материалы, относящиеся к приложениям теории графов в исследовании операций, дискретной оптимизации, электротехнике и пр. Затем последовали книги, посвященные алгоритмическим проблемам теории графов и вопросам применения теории графов в отдельных областях знаний, в том числе программировании. Среди них нужно назвать «Введение в теоретическое программирование. Беседы о методе» А. П. Ершова [3], «Применение теории графов в программировании» В. А. Евстигнеева [4], «Оптимизирующие преобразования программ» В. Н. Касьянова [5], «Комбинаторика для программистов» В. Липского [6]. Заметим, что любая из книг, содержащих теоретико-графовые алгоритмы, оставалась либо книгой по теории графов, либо книгой по основной предметной области, использующей теоретико-графовые методы. Это же относится и к фундаментальному труду «Искусство программирования» Д. Кнута [7–9], который посвящен рассмотрению и анализу важнейших алгоритмов, используемых в информатике. В отличие от них книга «Графы в программировании: обработка, визуализация и применение» В. Н. Касьянова и В. А. Евстигнеева объединяет эти два

направления с точки зрения программирования [10]. Она также впервые в отечественной литературе содержит монографическое изложение материала по вопросам визуализации информации на основе графовых моделей.

В последние годы в сети появилось большое количество открытых веб-систем, аккумулирующих знания по различным предметным областям, связанным с теоретико-графовыми моделями и методами. Среди них всем известная WikipediA [11], а также такие более специализированные системы, посвященные отдельным прикладным областям, как MathWorld [12] и AlgoWiki [13].

MathWorld – это наиболее обширный математический ресурс паутины, предоставляемый в качестве бесплатной услуги компанией Wolfram Research, создавшей хорошо известную систему Mathematica. С 1995 г. сайт MathWorld [12] активно развивается и поддерживается. В настоящее время MathWorld – это открытая энциклопедия по математике, которая считается не только самым ярким и самым читаемым интернет-ресурсом по математике, но и одним из самых надежных. Ее статьи широко упоминаются в журналах и книгах. MathWorld продолжает расти и развиваться при поддержке тысяч активных пользователей и в настоящее время содержит более 13900 статей по всем основным разделам математики.

AlgoWiki [13] – это открытая энциклопедия по свойствам алгоритмов и особенностям их реализации на различных программно-аппаратных платформах от мобильных платформ до экзафлопсных суперкомпьютерных систем с возможностью коллективной работы всего мирового вычислительного сообщества. Она разрабатывается как вики-система с 2014 года на базе Научно-исследовательского вычислительного центра Московского государственного университета и в настоящее время содержит более 300 статей, посвященных в основном алгоритмам линейной алгебры.

Широкая применимость графов связана с тем, что они являются естественным средством объяснения сложных ситуаций на интуитивном уровне. Эти преимущества представления сложных структур и процессов графами становятся более ощутимыми при наличии хороших средств их визуализации. Поэтому неслучайно в последнее время в мире растет интерес к методам и системам рисования и визуальной обработки графов и графовых моделей [14, 15]. Многие про-

граммные системы, особенно те, которые используют информационные модели, включают элементы визуальной обработки графовых объектов. Среди них – системы и окружения программирования, инструменты CASE-технологии, системы автоматизации проектирования и многие другие.

Поскольку информация, обрабатываемая на компьютерах, постоянно увеличивается и усложняется, возникает все больше ситуаций, в которых классические графовые модели перестают быть адекватными. Требуются и возникают более мощные графовые формализмы для представления информационных моделей, обладающих иерархической структурой, такие как кластерные графы [16] и составные графы [17], описывающие иерархию для неориентированных и ориентированных графов соответственно. Использование иерархического представления является основой многочисленных методов анализа и синтеза сложных информационных моделей в различных областях применения компьютеров и позволяет поддерживать интерактивную визуализацию сложных информационных моделей большого размера [18, 19].

Теория графов из академической дисциплины все больше превращается в средство, владение которым становится решающим для успешного применения компьютеров во многих прикладных областях.

Поэтому неслучайно, что в Лаборатории конструирования и оптимизации программ Института систем информатики (ИСИ) им. А. П. Ершова СО РАН с момента ее создания в 1990 г. ведутся исследования методов и средств повышения эффективности и надежности конструирования программ и систем на основе теоретико-графовых моделей и методов (см., например, [20–22]).

Одним из важных направлений этих работ является разработка методов и средств поддержки применения теоретико-графовых методов в информатике и программировании.

В рамках этого направления была опубликована серия книг и учебных пособий по теоретико-графовым методам в информатике и программировании [4, 5, 10, 15, 23–26]. Разрабатываются методы и средства для визуализации сложно структурированной информации большого объема на основе предложенного формализма иерархических графов и графовых моделей [27–35]. Ведется работа по созданию цифрового вики-словаря WikiGRAPP [36] по теории графов и его применениям в информатике и программировании и цифровой вики-

энциклопедии WEGA [37] теоретико-графовых алгоритмов решения задач информатики и программирования.

Создаваемым цифровым вики-системам WikiGRAPP и WEGA поддержки применения теоретико-графовых методов в информатике и программировании, а также поддерживающим их системам визуализации атрибутированных иерархических графов и посвящена настоящая статья.

### **ЦИФРОВОЙ ВИКИ-СЛОВАРЬ WIKIGRAPP ПО ТЕОРИИ ГРАФОВ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯМ В ИНФОРМАТИКЕ И ПРОГРАММИРОВАНИИ**

В связи с активным развитием теоретико-графовых методов решения задач на компьютере, а также с их постоянным расширением на новые предметные области проблема терминологии является одной из основных проблем в применении теоретико-графовых методов в программировании и информатике.

Расширяемый цифровой вики-словарь по графам в информатике и программировании WikiGRAPP (см. рис. 1), создаваемый в ИСИ СО РАН, призван если не решить проблему терминологии, то значительно ее облегчить. Для его создания было использовано написанное на препроцессоре гипертекста (PHP) свободно распространяемое программное обеспечение MediaWiki [38], предназначенное для поддержки гипертекстовой среды «вики» (wiki) – такого веб-сайта, структуру и содержимое которого пользователи могут сообща изменять с помощью инструментов, предоставляемых самим сайтом.

В основу вики-словаря WikiGRAPP были положены две книги [23, 24].

Первая книга – это словарь [23], опубликованный в 1999 г. в издательстве «Наука», предварительная версия которого была издана в 1995–1996 гг. тремя выпусками в Новосибирском государственном университете. Это был первый словарь по теории графов в информатике и программировании, и он вызвал большой интерес читателей.

Вторая книга [24] – это исправленная и расширенная английская версия словаря 1999 г., опубликованная в Сибирском научном издательстве в 2009 г, которая включила в себя дополнительно более 1000 новых терминов из статей, рефераты которых публиковались в РЖ «Математика» в разделе «Теория графов».

В словаре 1999 г. были собраны теоретико-графовые термины из таких известных монографий по теории графов, как книги Ф. Харари, К. Бержа, О. Оре, А. А. Зыкова и др., а также доступных для отечественного читателя книг по информатике и программированию, с указанием источника и вариантов. Кроме описаний собственно теоретико-графовых терминов в словарь были также включены необходимые для их понимания термины из программирования, комбинаторного анализа, прикладной алгебры и исследования операций, что расширяло круг пользователей словаря.

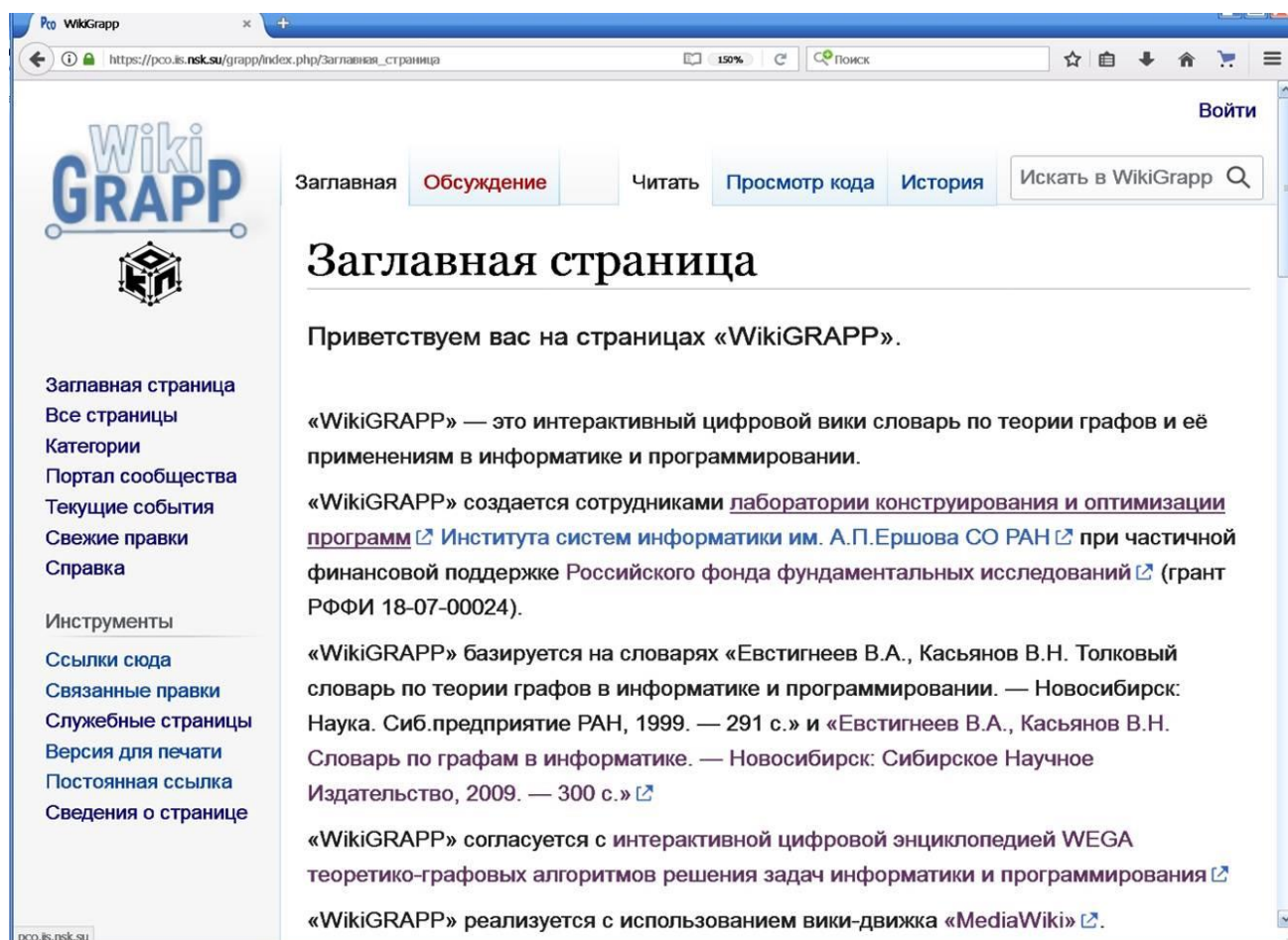


Рис. 1. Заглавная страница вики-словаря WikiGRAPP.

Статьи словаря 1999 г. [23] были снабжены иллюстрациями, перекрестными ссылками и ссылками на доступную литературу. Русские термины в словаре сопровождались их английскими эквивалентами, что позволяло использовать книгу как русско-английский словарь, а прилагаемый к статьям словаря краткий англо-русский словарь был призван помочь при чтении англоязычной литерату-

ры. Последнее, на взгляд авторов, может препятствовать размножению вариантов русских эквивалентов английских терминов, используемых в литературе.

Приведенные выше свойства словаря 1999 г. не только сохранились в создаваемом цифровом словаре WikiGRAPP (см. рис. 2), но и усилились за счет использования в цифровом словаре гипертекстовых ссылок и категорий, присущих вики-системам, а также за счет включения в него всех статей на английском языке из словаря 2009 г. [24].



Рис. 2. Страница вики-словаря WikiGRAPP о базисных нумерациях

При отборе терминов для словаря 1999 г. авторы поступали следующим образом. В качестве основного было выбрано множество понятий, представленных в известной монографии [39], как издания по теории графов, наиболее полного и доступного отечественному читателю. Затем оно было пополнено терминами из других отечественных и переводных книг по теории графов, а также из

монографий по информатике и программированию, существенно использующих методы теории графов, таких, например, как [3–5].

Чтобы как-то уменьшить разрыв между включенной в словарь терминологией вышедших в свет монографий и терминологией, еще не использующейся в монографиях, словарь был расширен за счет тех терминов, которые встречаются в докладах на ежегодной конференции “Graph Theory Concepts in Computer Science” и книгах серии “Graph Theory Notes of New York”.

В дальнейшем отмеченное отставание было еще более сокращено в английской версии словаря [24] благодаря включению в него более 1000 новых терминов из докладов конференций и журнальных статей, опубликованных в журналах, ведущих по данной тематике (“Discrete Mathematics”, “Journal of Graph Theory” и др.), рефераты которых публиковались в РЖ «Математика» в разделе «Теория графов». При этом при включении в словарь того или иного термина из статьи или доклада в соответствующей статье словаря делалась лишь общая ссылка на название журнала или конференции с данной публикацией.

Начальная версия цифрового вики-словаря WikiGRAPP, покрывающая печатные издания [23, 24], прошла государственную регистрацию в 2013 г. [40], и до настоящего времени разработчиками словаря ведется постоянная работа по его пополнению и совершенствованию.

### **ЦИФРОВАЯ ВИКИ-ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WEGA ТЕОРЕТИКО-ГРАФОВЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНФОРМАТИКИ И ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

С использованием MediaWiki [38] в ИСИ СО РАН создается еще и другая вики-система WEGA (см. рис. 3), также ориентированная на поддержку применения графов в программировании, – расширяемая интерактивная цифровая энциклопедия теоретико-графовых алгоритмов решения задач информатики и программирования [37].

В отличие от монографий Д. Кнута [7–9], содержащих низкоуровневое (в терминах машины MIX) описание алгоритмов, цифровая энциклопедия WEGA, равно как и книга [8], на которой она базируется, ориентируется на абстрактную модель современных компьютеров (равнодоступная адресная машина – RAM) и высокоуровневое описание алгоритмов в терминах специального языка высокого уровня (ВУ-язык).



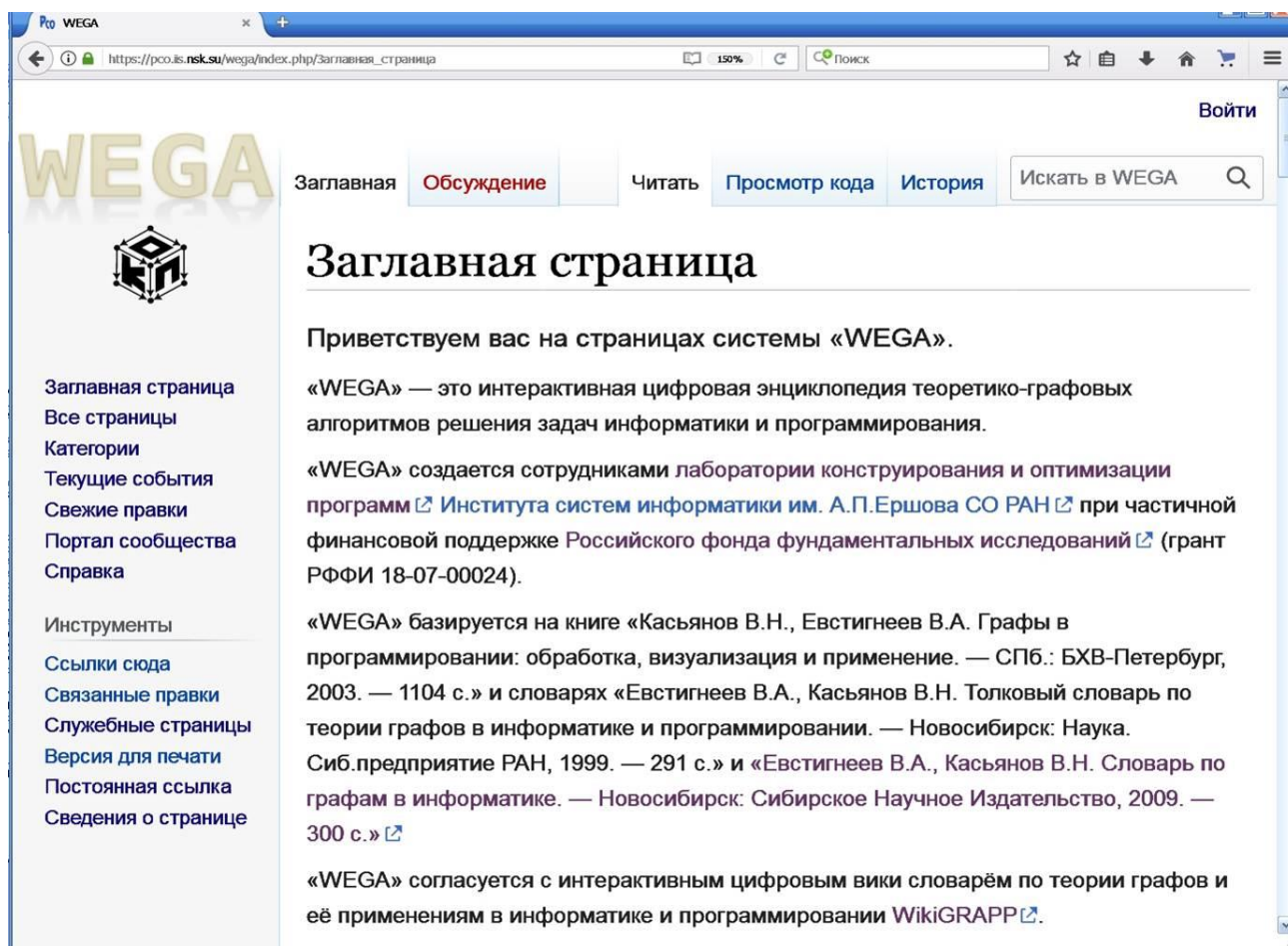


Рис. 3. Заглавная страница вики-энциклопедии WEGA

По существу, ВУ-язык является псевдоязыком (лексиконом) программирования и содержит в качестве базовых традиционные конструкции языков программирования, для каждой из которых фиксируется класс ее допустимых реализаций на РАМ. Предполагается также, что ВУ-язык наряду с базовыми конструкциями позволяет использовать любые необходимые конструкции, если очевидны или заранее зафиксированы оценки их сложности, а также те реализации этих конструкций на РАМ, которые допускают такие оценки. В частности, наряду с типами простых и составных данных, обычными для современных языков, ВУ-язык допускает использование более сложных структур данных, как, например, деревья и графы (см. рис. 4).

Такой подход позволяет формулировать алгоритмы в естественной форме, допускающей прямой анализ их корректности и сложности, а также простой пе-

ренос сформулированных алгоритмов на реальные языки программирования и компьютеры с сохранением полученных оценок сложности.

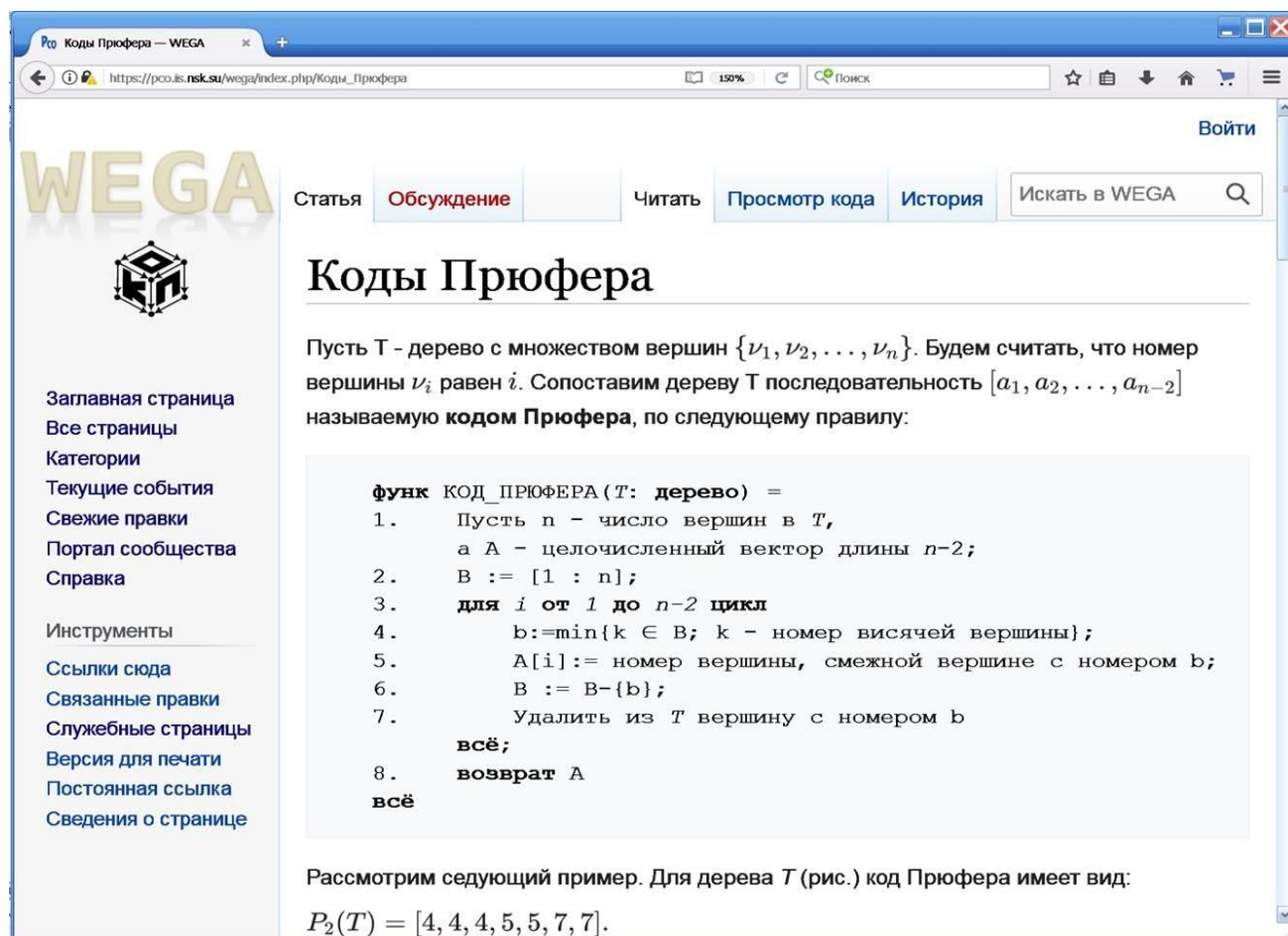


Рис. 4. Страница энциклопедии WEGA о кодах Прюфера

Начальная версия вики-энциклопедии WEGA прошла государственную регистрацию в 2013 г. [41]. Но разработчики энциклопедии до сих пор ведут постоянную работу по ее пополнению и совершенствованию. И хотя энциклопедия WEGA согласуется со словарем WikiGRAPP, обе системы являются полностью независимыми и содержат гиперссылки друг на друга только в заглавных страницах. В отличие от энциклопедии, которая ориентируется главным образом на системных и прикладных программистов, словарь предназначен для всех тех, кто использует теоретико-графовые методы при решении своих задач. Поэтому у словаря значительно более широкий круг пользователей и существенно большая посещаемость, чем у энциклопедии. С этим связано, в частности, то, что, как правило, при запросах по графовой тематике многие браузеры выдают в первую

очередь ссылку на словарь, а не на энциклопедию, а также то, что статьи словаря как по размеру, так и по структуре существенно уступают статьям энциклопедии.

### **СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ГРАФОВ И ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

Системы визуализации графов, создаваемые в ИСИ СО РАН, ориентированы на визуализацию атрибутированных иерархических графов – иерархических графовых моделей, в которых семантика выражена с помощью системы атрибутов, сопоставленных элементам иерархических графов [27].

Иерархический граф [27] состоит из основного графа произвольного вида и корневого дерева вложенности некоторого такого выделенного подмножества его фрагментов (частей основного графа), что сам основной граф входит в подмножество и соответствует корню дерева, а фрагменты, соответствующие листьям дерева, образуют некоторое разбиение основного графа на попарно непересекающиеся части. Важный частный случай иерархических графов образуют так называемые простые иерархические графы, в которых все выделенные фрагменты являются подграфами основного графа, порожденными соответствующими подмножествами своих вершин. В частности, подкласс простых иерархических графов, использующих в качестве основных только неориентированные графы, включает все кластерные графы.

Система HIGRES [32, 33], созданная в ИСИ СО РАН, – это первый отечественный универсальный визуализатор и редактор графовых моделей.

Система HIGRES ориентирована на многооконную работу с изображениями на плоскости простых атрибутированных иерархических графов небольшого размера (рис. 5). Каждому выделенному фрагменту в изображении атрибутированного иерархического графа соответствует некоторый прямоугольник плоскости, внутри которого располагаются изображения всех составляющих его элементов и их атрибутов. Кроме того, для каждого выделенного фрагмента можно открыть отдельное окно, в котором видны только атрибутированные элементы данного фрагмента. При этом каждый фрагмент при его изображении в любом окне можно объявить закрытым, тогда изображаются только его контуры, либо открытым, тогда помимо контура фрагмента изображаются и составляющие его

элементы и их атрибуты. Для изображения контуров фрагментов в системе используется прием создания эффекта тени. Закрытые фрагменты выглядят слегка выступающими вверх: как будто они закрыты крышками, открытые же слегка утоплены вниз.

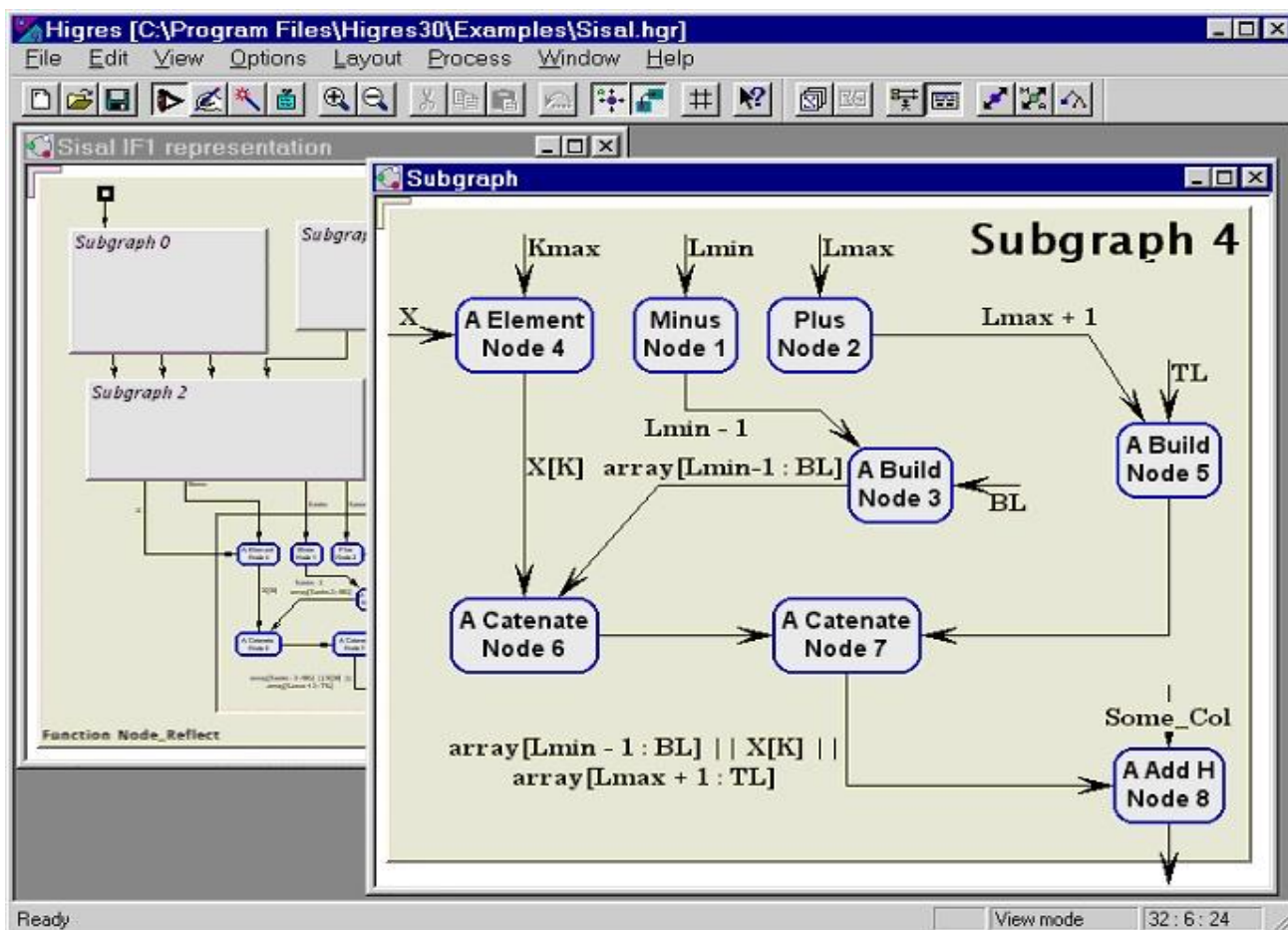


Рис. 5. Система HIGRES: двухоконное изображение простого атрибутированного иерархического графа

Важным отличием системы HIGRES от других универсальных систем визуализации является ее способность сохранять во внутреннем представлении и визуализировать не только сам граф, но и его семантику, представленную в виде системы типов атрибутированных вершин, дуг и фрагментов графа, а также библиотеки алгоритмов обработки, так называемых внешних модулей, причем пользователь системы может легко управлять методами визуализации графовой модели, а также корректировать и доопределять ее семантику. Такой подход обеспечивает, с одной стороны, универсальность системы HIGRES, с другой – возможность ее специализации. Он также позволяет использовать систему как



платформу для работы и анимации алгоритмов работы с иерархическими графами и графовыми моделями. Запустив внешний модуль, пользователь может регулировать параметры обработки графовой модели, прерывать алгоритм на любом шаге, просматривать в любую сторону последовательность изображений промежуточных результатов шагов работы алгоритма как в форме анимации, так и в покадровом режиме (рис. 6).

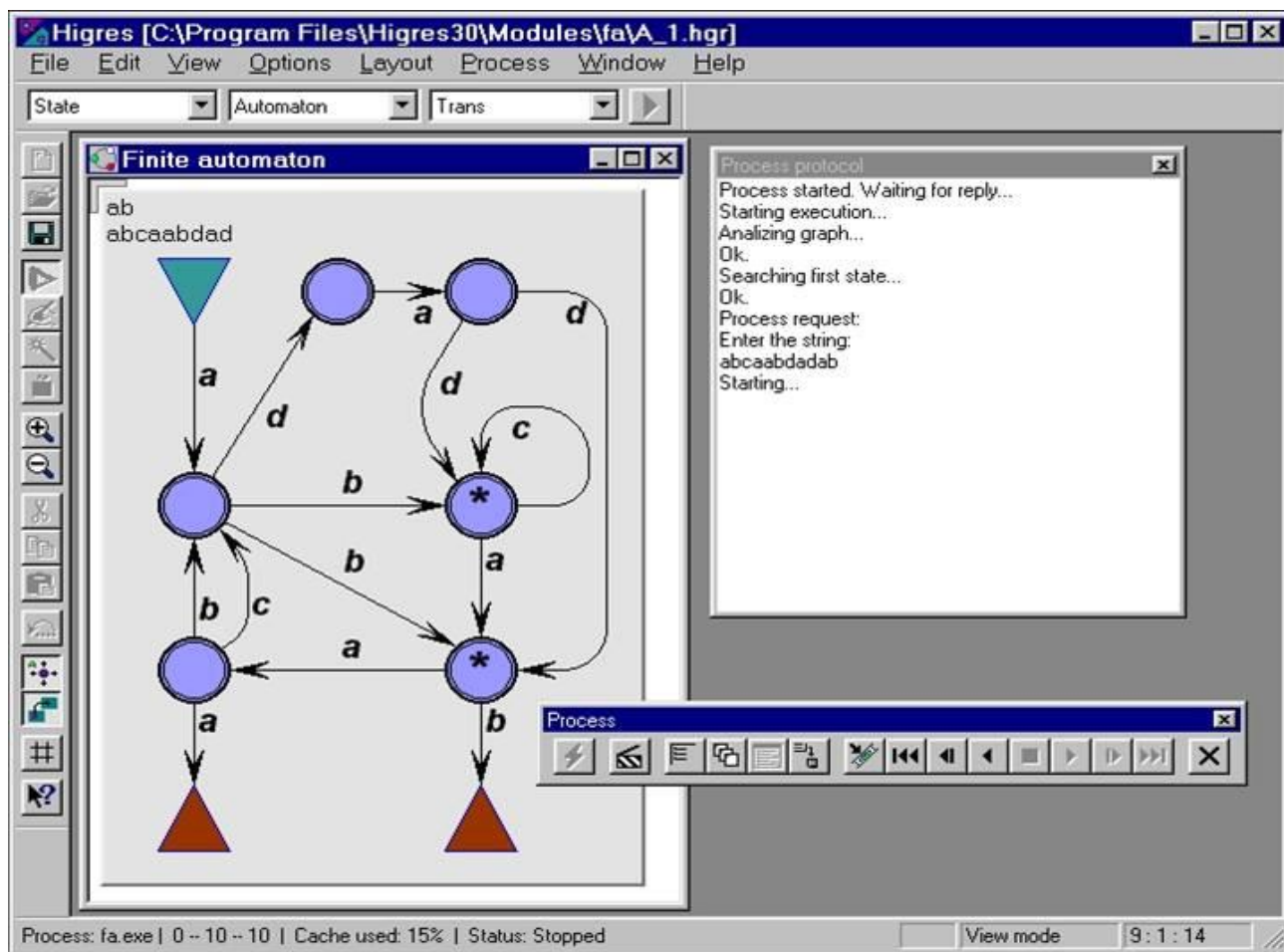


Рис. 6. Система HIGRES: анимация работы конечного автомата

Разработана система визуализации Visual Graph [28], которая работает под управлением ОС Windows, Linux и MacOS, поддерживает обработку произвольных атрибутированных иерархических графов (в том числе составных и кластерных) достаточно большого размера. Она ориентирована на визуализацию структур данных, возникающих в компиляторах, и позволяет одновременно работать с ними как в графовой, так и в текстовой формах. Система Visual Graph предоставляет богатые возможности для навигации по графовой модели и рабо-

ты с атрибутами ее элементов, а также для настройки системы на нужды конкретного пользователя. Система использует для спецификации входного (визуализируемого) графа стандартный язык описания графов GraphML [42] и обеспечивает плавность выполнения основных операций над графами, содержащими до 100000 элементов (вершин и дуг).

Во многих приложениях объекты, моделируемые вершинами графа, являются сложными и могут содержать по несколько разных логических частей (так называемых портов [42]), через которые эти объекты находятся во взаимосвязи, моделируемой дугами и/или ребрами, и которые при изображении графа могут или должны представляться разными точками (или разными непересекающимися частями) изображений вершин, в которых соответствующие вершины соединяются с инцидентными им ребрами или дугами.

Разработан формализм атрибутированных иерархических графов с портами и предложены способы изображения таких графов на плоскости, ориентированные на визуализацию графовых представлений транслируемых программ [31]. Важно, что предложенный подход позволяет строить наглядные иерархические изображения объектов, в которых элементы, моделируемые вершинами, связаны между собой отношениями как объекты целиком, так и через разные свои логические части. Например, он позволяет строить классическое изображение операторной схемы над распределенной памятью (Р-схемы) [10, 43], в котором вершины (операторы) изображаются прямоугольниками, а операнды вершины (оператора) – кругами или выступами у этого прямоугольника (сверху прямоугольника располагаются входы, а снизу – выходы), и в котором помимо дуг информационного графа, соединяющего операнды вершин, есть дуги управляющего графа, соединяющие вершины.

На основе предложенной атрибутированной иерархической графовой модели с портами разработаны новые методы и эффективные алгоритмы анализа и визуализации сложно организованной информации большого объема. С их использованием были существенно расширены возможности системы Visual Graph по визуальному представлению и анализу структурной информации, возникающей при работе компиляторов.

Выполнен цикл работ по созданию на основе системы Visual Graph начальной версии веб-сервиса визуализации атрибутированных иерархических графов

с портами (Visual Graph Web Service) для последующей его интеграции со словарем WikiGrapp и энциклопедией WEGA с целью расширения последних возможностями создания и поддержки интерактивных иллюстраций.

На наш взгляд, возможность визуализировать графовую модель, а также наблюдать за процессами ее функционирования и работы алгоритма на этой модели через динамику ее изменений позволит программисту быстрее и глубже понять на конкретных примерах смысл модели и алгоритма, представленных в словаре WikiGrapp или энциклопедии WEGA. В этом плане динамическую визуализацию функционирования графовой модели и работы графового алгоритма нельзя заменить никакими текстовыми описаниями и пояснениями. При этом, на наш взгляд, возможность пользователя управлять не только процессом просмотра анимации (например, останавливать ее, изменять скорость показа, просматривать процесс анимации как вперед, так и назад), но и процессом самой динамической визуализации (например, изменять входную графовую модель, ее промежуточный вид, а также множество демонстрируемых событий и их визуальные представления) в большинстве случаев может существенно упростить пользователю словаря WikiGrapp и энциклопедии WEGA задачу понимания описанных в них графовых моделей и алгоритмов, а также оценку их применимости для решения конкретных задач, стоящих перед пользователем.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Цифровой словарь WikiGRAPP [36] и цифровая энциклопедия WEGA [37], рассмотренные выше, находятся в открытом доступе в Интернете начиная с 1999 г. Все это время они вместе с книгами и учебными пособиями [4, 5, 10, 15, 23–26], опубликованными разработчиками систем, успешно применяются в учебном процессе Новосибирского государственного университета, в частности в рамках годового спецкурса «Графы в программировании». Но редактировать статьи словаря и энциклопедии до сих пор могут только сотрудники Лаборатории, названной выше, причем далеко не все: среди тех, кто это может делать, есть и такие, которым разрешено изменять содержимое только одной из этих систем. Поэтому в статье говорилось о создании авторских пилотных версий вики-словаря и вики-энциклопедии, перевод которых в вики-системы «общего

пользования» хотя возможен и планируется, но потребует решения непростых вопросов организации модерации.

Основная идея, на которую опирается создание словаря WikiGRAPP и энциклопедии WEGA, состоит в том, что основные свойства самих теоретико-графовых моделей и алгоритмов никак не зависят от вычислительных систем и языков программирования, которые используются в настоящее время и которые планируются использовать в будущем. С этой точки зрения абстрактное описание свойств моделей и алгоритмов имеет очень высокую самостоятельную ценность.

Начальные версии словаря WikiGRAPP и энциклопедии WEGA прошли государственную регистрацию в 2013 г. [40, 41], и до настоящего времени разработчики систем продолжают их совершенствовать и пополнять, добавляя примерно по шесть новых терминов в месяц. Поэтому как весь словарь или всю энциклопедию целиком, так и каждую отдельную статью словаря или энциклопедии можно отнести к так называемым живым публикациям [44]. В 2024 г. системы (словарь и энциклопедия) суммарно подвергались в среднем трем изменениям в день, и к настоящему времени каждая из систем стала содержать порядка 5 тыс. статей.

Создан программный комплекс Wiki2TeX [45], поддерживающий работу со словарем и энциклопедией. Он позволяет строить набор TeX-документов, образующих офлайн-версию базы данных вики, построенной с помощью MediaWiki, а также выполнять и обратную операцию – преобразовывать TeX-документы в статьи MediaWiki и добавлять их к заданной вики.

В начале 2025 г. вышел «Англо-русский словарь по графам для программиста» [26], который отражает текущее состояние словаря WikiGRAPP и энциклопедии WEGA и дополнительно охватывает более 1000 новых терминов по сравнению с соответствующей частью словаря [25], подготовленного на базе этих систем в 2011 г. Готовится к изданию также «Русско-английский словарь по графам для программиста».

На основе развития методов и систем визуализации сложно структурированной информации с использованием атрибутированных иерархических графовых моделей с портами [27–35] начаты работы по расширению словаря



WikiGRAPP и энциклопедии WEGA возможностями создания и поддержки интерактивных иллюстраций.

### **Благодарности**

Авторы благодарны всем коллегам, которые принимали участие в работах, рассмотренных в статье.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Берж К.* Теория графов и ее применения. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 319 с.
2. *Оре О.* Графы и их применение. М.: Мир, 1965. 174 с.
3. *Ершов А.П.* Введение в теоретическое программирование (беседы о методе). Новосибирск: Наука, 1977.
4. *Евстигнеев В.А.* Применение теории графов в программировании. М.: Наука, 1985. 352 с.
5. *Касьянов В.Н.* Оптимизирующие преобразования программ. М: Наука, 1988. 336 с.
6. *Липский В.* Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1988.
7. *Кнут Д.* Искусство программирования для ЭВМ. М.: Мир, 1976. Т. 1. 735 с.
8. *Кнут Д.* Искусство программирования для ЭВМ. М.: Мир, 1977. Т. 2. 724 с.
9. *Кнут Д.* Искусство программирования для ЭВМ. М.: Мир, 1978. Т. 3. 844 с.
10. *Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А.* Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 1104 с.
11. Wikipedia. URL: <https://www.wikipedia.org>
12. MathWorld. URL: <http://mathworld.wolfram.com/>
13. AlgoWiki. URL: <http://algowiki-project.org>
14. *Di Battista G., Eades P., Tamassia R., Tollis I.G.* Graph drawing: algorithms for visualization of graphs. Prentice Hall, 1999. 397 p.
15. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Визуализация графов и графовых моделей. Новосибирск: Сибирское Научное Издательство, 2010. 123 с.

16. *Feng Q., Cohen R.F., Eades P.* Planarity for clustered graphs // *Lecture Notes in Computer Science*. 1995. Vol. 979. P. 213–226.
17. *Sugiyama K., Misue K.* Visualization of structural information: automatic drawing of compound digraphs // *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*. 1991. Vol. 21. No. 4. P. 876–892.
18. *Herman I, Melançon G., Marshall M.S.* Graph visualization and navigation in information visualization: a survey // *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*. 2000. Vol. 6. P. 24-43.
19. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Визуализация информации на основе графовых моделей // *Научная визуализация*. 2014. Том. 6. № 1. С. 31–50.
20. *Касьянов В.Н.* Применение графов в программировании // *Программирование*. 2001. № 3. С. 51–70.
21. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Теоретико-графовые методы и системы программирования // *Проблемы информатики*. 2016. № 1. С. 26–38.
22. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Методы и технологии конструирования эффективных и надежных программ и программных систем на основе графовых моделей и семантических преобразований // *Системная информатика*. 2021. № 19. С. 1–14.
23. *Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н.* Толковый словарь по теории графов в информатике и программировании. Новосибирск: Наука, 1999. 291 с.
24. *Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н.* Словарь по графам в информатике. Новосибирск: Сибирское Научное Издательство, 2009. 300 с.
25. *Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н.* Русско-английский и англо-русский словарь по графам в информатике. Новосибирск: Сибирское Научное Издательство, 2011. 216 с.
26. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Англо-русский словарь по графам для программиста. Новосибирск: СО РАН, 2025. 160 с.
27. *Касьянов В.Н.* Иерархические графы и графовые модели: вопросы визуальной обработки // *Проблемы систем информатики и программирования*. Новосибирск: ИСИ СО РАН, 1999. С. 7–32.
28. *Касьянов В.Н., Золотухин Т.А.* Программная система для визуализации сложных больших данных на основе графовых моделей (Visual Graph). Свиде-

тельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612824 от 03.03.2017.

29. *Касьянов В.Н., Касьянова Е.В.* Визуализация информации на основе графовых моделей. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2014. 149 с.

30. *Касьянов В.Н., Золотухин Т.А., Гордеев Д.С.* Методы и алгоритмы визуализации графовых представлений функциональных программ // Программирование. 2019. № 4. С. 19–27.

31. *Касьянов В.Н.* Методы и средства визуализации информации на основе атрибутированных иерархических графов с портами // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Том 24. № 1. С. 8–17.

32. *Lisitsyn I.A., Kasyanov V.N.* HIGRES – visualization system for clustered graphs and graph algorithms // Lecture Notes in Computer Science. 1999. Vol. 1731. P. 82–89.

33. *Kasyanov V.N., Lisitsyn I.A.* Hierarchical graph models and visual processing // Proc. of Intern. Conf. on Software: Theory and Practice (ICS-2000). 16th World Computer Congress IFIP. Beijing: PHEI, 2000. P. 179–182.

34. *Kasyanov V.N., Kasyanova E.V.* Information visualization based on graph models // Enterprise Information Systems. 2013. Vol. 7, No. 2. P. 187–197.

35. *Kasyanov V.N., Zolotuhin T.A.* A system for visualization of big attributed hierarchical graphs // International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC). 2018. Vol.10. No. 2. P. 55–67.

36. WikiGRAPP. URL: <https://pco.iis.nsk.su/grapp/>

37. WEGA. URL: <https://pco.iis.nsk.su/wega/>

38. MediaWiki. URL: <http://www.mediawiki.org/wiki/MediaWiki/ru/>

39. *Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И.* Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990. 384 с.

40. *Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А., Касьянова Е.В.* Электронный словарь WikiGRAPP по теории графов и ее применениям в информатике и программировании. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620433 от 25.03.2013.

41. *Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А., Касьянова Е.В.* Электронная энциклопедия WEGA теоретико-графовых алгоритмов решения задач информатики и

программирования. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620463 от 01.04.2013.

42. Brandes U., Marshall M.S., and North S.C. Graph data format workshop report // Lecture Notes in Computer Science. 2001. Vol. 1984. P. 410–418.

43. Ershov A.P. Theory of program schemata // Information Processing 71: Proc. IFIP Congr. 71, Lubiana, 1971. Amsterdam: North Holland, 1972. P. 28–45.

44. Горбунов-Посадов М.М. Жизнь как форма существования научной публикации // Научный сервис в сети Интернет: труды XXVI Всероссийской научной конференции (23–25 сентября 2024 г., онлайн). М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2024. С. 50–56.

45. Касьянов В.Н., Касьянова Е.В., Малышев А.А. Программный комплекс Wiki2Tex. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616426 от 01.04.2016.

---

## **WEB-SYSTEMS ON GRAPH-THEORETIC MODELS AND METHODS IN PROGRAMMING**

**V. N. Kasyanov**<sup>1</sup> [0000-0002-4899-9429], **E. V. Kasyanova**<sup>2</sup> [0000-0002-3412-0997]

<sup>1, 2</sup>A. P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup>kvn@iis.nsk.su, <sup>2</sup>kev@iis.nsk.su

### ***Abstract***

Graph theory is increasingly turning from an academic discipline into a tool, mastery of which is becoming decisive for the successful use of computers in many applied areas. Despite the existence of extensive specialized literature on solving problems on graphs, the widespread use of the obtained mathematical results in programming practice is difficult due to the lack of a systematic description of them oriented towards programmers. Therefore, a significant class of practical problems, essentially reduced to a simple choice of a suitable solution method and to the construction of specific formulations of abstract algorithms, for many programmers still remains a field for intellectual activity in the “rediscovery” of known methods. The paper is devoted to the digital wiki dictionary WikiGRAPP on graph theory and its applications in computer science and programming and the digital wiki encyclopedia

---

WEGA of graph-theoretical algorithms for solving computer science and programming problems, being developed at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS.

**Keywords:** *graph-theoretic models, graph-theoretic methods, programming, digital wiki dictionary, digital wiki encyclopedia.*

## REFERENCES

1. *Berge K.* Teoriya grafov i eyo primeneniya. M.: Izd-vo inostr. lit., 1962. 319 p.
2. *Ore O.* Grafy i ih primeneniye. M.: Mir, 1965. 174 p.
3. *Ershov A.P.* Vvedenie v teoreticheskoe programmirovaniye (besedy o metode). Novosibirsk: Nauka, 1977. 288 p.
4. *Evstigneev V.A.* Primeneniye teorii grafov v programmirovanii. M.: Nauka 1985. 352 p.
5. *Kasyanov V.N.* Optimiziruyushchie preobrazovaniya programm. M: Nauka, 1988. 336 p.
6. *Lipskiy V.* Kombinatorika dlya programmistov. Moscow: Mir, 1988. 213 p.
7. *Knuth D.* Iskusstvo programmirovaniya dlya EHVM. Moscow: Mir, 1976. Vol. 1. 735 p.
8. *Knuth D.* Iskusstvo programmirovaniya dlya EHVM. Moscow: Mir, 1977. Vol. 2. 724 p.
9. *Knuth D.* Iskusstvo programmirovaniya dlya EHVM. Moscow: Mir, 1978. Vol. 3. 844 p.
10. *Kasyanov V.N., Evstigneev V.A.* Grafy v programmirovanii: obrabotka, vizualizatsiya i primeneniye. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2003. 1104 p.
11. Wikipedia. URL: <https://www.wikipedia.org>
12. MathWorld. URL: <http://mathworld.wolfram.com/>
13. AlgoWiki. URL: <http://algowiki-project.or>
14. *Di Battista G., Eades P., Tamassia R., Tollis I.G.* Graph drawing: algorithms for visualization of graphs. Prentice Hall, 1999. 397 p.
15. *Kasyanov V.N., Kasyanova E.V.* Vizualizatsiya grafov i grafovykh modelej. Novosibirsk: Sibirskoe Nauchnoe Izdatel'stvo, 2010. 123 p.
16. *Feng Q., Cohen R.F., Eades P.* Planarity for clustered graphs // Lecture Notes in Computer Science. 1995. Vol. 979. P. 213–226.

17. Sugiyama K., Misue K. Visualization of structural information: automatic drawing of compound digraphs // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 1991. Vol. 21, No. 4. P. 876–892.

18. Herman I, Melançon G., Marshall M.S. Graph visualization and navigation in information visualization: a survey // IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics. 2000. Vol. 6. P. 24–43.

19. Kasyanov V.N., Kasyanova E.V. Information visualization based on graph models // Scientific visualization. 2014. Vol. 6. No. 1. P. 31–50.

20. Kasyanov V.N. Graph applications in programming // Programming and Computer Software. 2001. Vol. 27, No. 3. P. 146–164.

21. Kasyanov V.N., Kasyanova E.V. Graph-theoretical methods and programming systems // Problems of Informatics. 2016. No. 1. P. 26–38.

22. Kasyanov V.N., Kasyanova E.V. Methods and technologies for constructing efficient and reliable programs and software systems based on graph models and semantic transformations // System informatics. 2021. No. 19. P. 1–14.

23. Evstigneev V.A., Kasyanov V.N. Tolkovyj slovar' po teorii grafov v informatike i programmirovanii. Novosibirsk: Nauka, 1999. 291 p.

24. Evstigneev V.A., Kasyanov V.N. Slovar' po grafam v informatike. Novosibirsk: Sibirskoe Nauchnoe Izdatel'stvo, 2009. 300 p.

25. Evstigneev V.A., Kasyanov V.N. Russko-anglijskij i anglo-russkij slovar' po grafam v informatike. Novosibirsk: Sibirskoe Nauchnoe Izdatel'stvo, 2011. 216 p.

26. Kasyanov V.N., Kasyanova E.V. Anglo-russkij slovar' po grafam dlya programmista. Novosibirsk: SO RAN, 2025. 160 p.

27. Kasyanov V.N. Ierarkhicheskie grafy i grafovyje modeli: voprosy vizual'noj obrabotki // Problemy sistem informatiki i programmirovaniya. Novosibirsk: ISI SO RAN, 1999. P. 7–32.

28. Kasyanov V.N., Zolotukhin T.A. Programmnaya sistema dlya vizualizacii slozhnykh bol'shikh dannyx na osnove grafovyykh modelej (Visual Graph). Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM No. 2017612824 ot 03.03.2017.

29. Kasyanov V.N., Kasyanova E.V. Vizualizaciya informacii na osnove grafovyykh modelej. Novosibirsk: Novosib. gos. un-t, 2014. 149 p.

30. *Kasyanov V.N., Zolotuhin T.A., Gordeev D.S.* Visualization methods and algorithms for graph representation of functional programs // *Programming and Computer Software*. 2019. Vol. 45, No. 4. P. 156–162.

31. *Kasyanov V.N.* Methods and tools for information visualization on the basis of attributed hierarchical graphs with ports // *Siberian Aerospace Journal*. 2023. Vol. 24, No. 1. P. 8–17.

32. *Lisitsyn I.A., Kasyanov V.N.* HIGRES — visualization system for clustered graphs and graph algorithms // *Lecture Notes in Computer Science*. 1999. Vol. 1731. P. 82–89.

33. *Kasyanov V.N., Lisitsyn I.A.* Hierarchical graph models and visual processing // *Proc. of Intern. Conf. on Software: Theory and Practice (ICS-2000)*. 16th World Computer Congress IFIP. Beijing: PHEI, 2000. P. 179–182.

34. *Kasyanov V.N., Kasyanova E.V.* Information visualization based on graph models // *Enterprise Information Systems*. 2013. Vol. 7, No. 2. P. 187–197.

35. *Kasyanov V.N., Zolotuhin T.A.* A system for visualization of big attributed hierarchical graphs // *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*. 2018. Vol.10, No. 2. P. 55–67.

36. WikiGRAPP. URL: <https://pco.iis.nsk.su/grapp/>

37. WEGA. URL: <https://pco.iis.nsk.su/wega/>

38. MediaWiki. URL: <http://www.mediawiki.org/wiki/MediaWiki/ru/>

39. *Emelichev V.A., Melnikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I.* *Lekcii po teorii grafov*. M.: Nauka, 1990. 384 p.

40. *Kasyanov V.N., Evstigneev V.A., Kasyanova E.V.* Electronic dictionary WikiGRAPP of graph theory and its applications in computer science and programming. Certificate of state registration of the database No. 2013620433 ot 25.03.2013.

41. *Kasyanov V.N., Evstigneev V.A., Kasyanova E.V.* *Ehlektronnaya ehnciklopediya WEGA teoretiko-grafovykh algoritmov resheniya zadach informatiki i programmirovaniya*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannykh № 2013620463 ot 01.04.2013.

42. *Brandes U., Marshall M.S., and North S.C.* Graph data format workshop report // *Lecture Notes in Computer Science*. 2001. Vol. 1984. P. 410–418.

43. *Ershov A.P.* Theory of program schemata // Information Processing 71. Proc. IFIP Congr. 71. Lubiana. 1971. Amsterdam: North Holland, 1972. P. 28–45.

44. *Gorbunov-Posadov M.M.* Aliveness as a form of existence of scientific publication // Scientific service on the Internet: proceedings of the XXVI All-Russian scientific conference (September 23–25, 2024, online). M.: IPM im. M.V. Keldysh, 2024. P. 50–56.

45. *Kasyanov V.N., Kasyanova E.V., Malyshev A.A.* Programmnyj kompleks Wiki2Tex. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EHVM № 2016616426 ot 01.04.2016

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**КАСЬЯНОВ Виктор Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией конструирования и оптимизации программ, Институт систем информатики имени А. П. Ершова СО РАН, профессор, Новосибирский государственный университет, Новосибирск

**Victor Nikolaevich KASYANOV** – Dr. Sc., Full Professor, Chief Researcher, Head of the Program Construction and Optimization Laboratory, A. P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS, Professor, Novosibirsk State University, Novosibirsk

email: [kvn@iis.nsk.su](mailto:kvn@iis.nsk.su)

ORCID 0000-0002-4899-9429



**КАСЬЯНОВА Елена Викторовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, почетный работник науки и высоких технологий Российской Федерации, старший научный сотрудник, Институт систем информатики имени А. П. Ершова СО РАН, доцент, Новосибирский государственный университет, Новосибирск

**KASYANOVA Elena Viktorovna** – Ph.D., Associate Professor, Honored Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Senior Researcher, A. P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS, Associate Professor, Novosibirsk State University, Novosibirsk

email: [kev@iis.nsk.su](mailto:kev@iis.nsk.su)

ORCID 0000-0002-3412-0997

*Материал поступил в редакцию 10 января 2026 года*

---