

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ ЭНЦИКЛОПЕДИИ ALGOWIKI

А. С. Антонов¹

AlgoWiki — это открытая энциклопедия свойств алгоритмов и их реализаций на различных программно-аппаратных платформах. Ее можно использовать для достижения различных целей, например для поиска оптимального алгоритма решения некоторой задачи, анализа информационной структуры приложения или для сравнения эффективности различных реализаций какого-либо алгоритма. В настоящей статье описаны появляющиеся новые возможности энциклопедии AlgoWiki, направленные на создание связанного представления различных алгоритмических подходов решения одной и той же задачи. На это нацелено описание предметной области в виде цепочек “задача–метод–алгоритм–реализация”, дополненное возможностями формирования рейтингов на базе любых алгоритмов энциклопедии, а также механизмом “архитектурных срезов”.

Ключевые слова: энциклопедия AlgoWiki, информационная структура, задача, метод, алгоритм, реализация, параллелизм, рейтинг, архитектурный срез.

1. Введение. Потребность в параллельных вычислениях постоянно возрастает во всех областях науки и техники. Технологии, развивавшиеся изначально для суперкомпьютеров, становятся актуальными для всех остальных вычислительных устройств, вплоть до мобильных. В этой связи возникает потребность изучения параллельной структуры ранее разработанных алгоритмов, включая и те, которые изначально разрабатывались как последовательные.

В настоящее время описание различных алгоритмов можно найти в обширном множестве книг, систем, интернет-ресурсов и других источников [1–7]. Где-то акцент делается на четкой математической постановке, где-то показывается возможная программная реализация или исследуется последовательная сложность. Однако главная особенность современных компьютерных платформ — это высокая степень параллелизма и специальная структура памяти. Именно это и должно рассматриваться в первую очередь, если мы говорим об эффективной реализации алгоритмов на различных программно-аппаратных платформах, от мобильных до суперкомпьютерных.

Идея глубокого априорного анализа свойств алгоритмов и их реализаций легла в основу проекта AlgoWiki. Основная задача проекта — составить такое описание фундаментальных свойств алгоритмов, которое даст полное понимание как их теоретического потенциала, так и особенностей их реализации на различных классах параллельных вычислительных систем.

Цель энциклопедии AlgoWiki — дать исчерпывающее описание алгоритма, которое поможет оценить его потенциал применительно к конкретной параллельной вычислительной платформе. Кроме классических свойств алгоритмов, например последовательной сложности, в AlgoWiki представлен и целый набор дополнительных сведений, составляющих в совокупности полную картину об алгоритме: параллельная сложность, параллельная структура, детерминированность, оценки локальности данных, эффективности и масштабируемости, коммуникационный профиль конкретных реализаций и многие другие.

Раздел 2 настоящей статьи посвящен немного более подробному описанию проекта открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki. В разделе 3 описывается концепция связанного представления различных алгоритмических подходов, реализуемая на основе цепочек “задача–метод–алгоритм–реализация”. Раздел 4 посвящен новой функциональности, появляющейся в проекте AlgoWiki на базе связанного представления, а именно построению системы рейтингов, а также механизму “архитектурных срезов”.

2. Проект открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki. Проект создания открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki [8] продолжается в МГУ имени М. В. Ломоносова с 2014 г. За это время к проекту удалось привлечь внимание вычислительного сообщества [9, 12]. Любые вычислительные алгоритмы описываются в энциклопедии AlgoWiki по единой универсальной схеме, причем особый акцент в описаниях делается на свойствах, связанных с параллелизмом. Описание состоит из

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, Ленинские горы, 119991, Москва; вед. науч. сотр., e-mail: asa@parallel.ru

двух основных частей, в первой из которых описываются машинно-независимые свойства алгоритмов, а во второй — свойства их реализаций [10].

Проект реализован на основе тех же wiki-технологий, что и широко известный проект Wikipedia [17], реализация основана на движке MediaWiki [18]. Имеющиеся в энциклопедии описания алгоритмов доступны для всех, и, вместе с этим, любой специалист может дополнить AlgoWiki, отразив свои знания в виде описаний новых алгоритмов или уточнения существующих. Важно отметить, что проект предполагает механизм научного рецензирования — любые правки становятся видны только после утверждения редакторами.

Реализуемая в рамках данного проекта открытая энциклопедия свойств алгоритмов AlgoWiki не имеет прямых аналогов. Ни один из существующих проектов не описывает всех необходимых свойств алгоритмов и их реализаций для различных целевых архитектур по единой заранее определенной схеме.

К настоящему времени в проекте представлено целое множество алгоритмов из самых разных областей: линейная алгебра, графовые алгоритмы, алгоритмы сортировки, алгоритмы моделирования квантовых систем и многие другие. Проект постоянно расширяется, охватывая все новые и новые области, включая описания новых алгоритмов. Ученый занимается каким-либо алгоритмом, он формирует новую статью в AlgoWiki, содержащую как описание теоретического потенциала данного алгоритма, так и анализ нюансов его реализации на различных компьютерах.

Логическим развитием проекта AlgoWiki является расширение анализа конкретных алгоритмов [11] экспертной оценкой качества возможных подходов к решению отдельных прикладных задач. Для решения каждой задачи можно использовать, как правило, несколько различных алгоритмических подходов или методов. Каждый метод обладает своими особенностями, и те алгоритмы, которые хорошо подходят для одного класса компьютеров, далеко не всегда подходят для другого. В проекте AlgoWiki появляются новые измерения, позволяющие перейти с уровня анализа отдельных алгоритмов к анализу различных алгоритмических подходов решения задач.

3. Цепочки “задача–метод–алгоритм–реализация”. За базовую единицу описания в открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki принято описание алгоритма. Для стандартизованного описания важных свойств различных вычислительных алгоритмов в проекте AlgoWiki была предложена единая универсальная структура. В энциклопедии AlgoWiki описания алгоритмов являются центральным звеном в цепочке, связывающей решаемые прикладные научные проблемы с результатами вычислительных экспериментов на суперкомпьютерах.

На начальном этапе развития энциклопедия AlgoWiki представляла собой перечень описанных алгоритмов. По мере развития проекта накопилось достаточно большое количество описанных алгоритмов [11] и появилась необходимость это множество упорядочить. Алгоритмы стали разноситься по тематическим категориям, со временем из этого стала появляться некая классификация алгоритмов. Однако вычислительные алгоритмы нужны не сами по себе, а для решения задач, возникающих в различных областях науки и техники. Поэтому в энциклопедию AlgoWiki стали добавляться и описания практических решаемых задач. Причем описанные задачи могут быть разного уровня — от конкретной решаемой практической проблемы (например, модель общей циркуляции атмосферы) до задач в математической постановке (решение эллиптических дифференциальных уравнений).

Многие практические задачи можно решать, применяя различные методы — так возникает еще одно базовое понятие, промежуточное между понятиями задачи и алгоритма. Потенциально задача может быть решена разными методами (скажем, эллиптические уравнения можно решать прямым методом, основанным на преобразовании Фурье, или итерационными методами). Каждый из методов обладает своими свойствами, и в определенных условиях может быть выгоднее использовать один из них. Такие условия может определять целевая программно-аппаратная среда (например, в случае решения эллиптических уравнений на параллельных компьютерах с распределенной памятью лучше использовать итерационные методы). Кроме того, некоторые методы могут предусматривать последовательность применения нескольких других методов, что определяет возможность наличия в энциклопедии AlgoWiki нескольких уровней метода.

С другой стороны, любой алгоритм предполагает наличие различных его реализаций как применительно к одной вычислительной платформе, так и при использовании различных платформ. Например, для трехмерного быстрого преобразования Фурье известны параллельные реализации FFTW [19] (с использованием технологий MPI+OpenMP), MKL FFT [20] (MPI), AccFFT [21] (MPI, CUDA) и др. В рамках описания алгоритма в энциклопедии AlgoWiki предусмотрено описание свойств каждой из возможных реализаций с представлением полученных результатов запуска на различных программно-аппаратных платформах.

Таким образом, в рамках открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki формируется цепочка понятий “задача–метод–алгоритм–реализация”, которая является основой для описания любой предметной области и реализует концепцию связанного представления различных алгоритмических подходов решения одной и той же задачи (часть классификации алгоритмов с соответствующей разметкой цепочек показана на рис. 1). По существу, в проекте AlgoWiki появляются новые измерения, позволяющие перейти с уровня анализа отдельных алгоритмов к анализу различных алгоритмических методов решения задач. Вычисление определенного интеграла, нахождение собственных векторов матриц, поиск минимального остовного дерева графа — для каждой задачи можно предложить множество алгоритмов их решения, и каждый алгоритм обладает своими свойствами, которые могут стать решающими для получения эффективной реализации на конкретной вычислительной системе.

1.2 Разложения матриц

1. **З** Задача разложения матриц
2. **З** Треугольные разложения
 1. **М** Метод Гаусса (нахождение LU-разложения)
 1. **М** LU-разложение методом Гаусса без перестановок
 1. **А** LU-разложение методом Гаусса
 2. **М** Компактная схема метода Гаусса и её модификации
 1. **К** Компактная схема метода Гаусса для плотной матрицы
 2. **М** Компактная схема метода Гаусса для трёхдиагональной матрицы и её модификации
 1. **А** Компактная схема метода Гаусса для трёхдиагональной матрицы, последовательный вариант
 2. **А** Алгоритм сдваивания Стоуна для LU-разложения трёхдиагональной матрицы
 3. **М** Последовательно-параллельный алгоритм для LU-разложения трёхдиагональной матрицы
 2. **М** LU-разложение методом Гаусса с перестановками
 1. **А** LU-разложение методом Гаусса с выбором ведущего элемента по столбцу
 2. **А** LU-разложение методом Гаусса с выбором ведущего элемента по строке
 3. **А** LU-разложение методом Гаусса с выбором ведущего элемента по главной диагонали
 4. **А** LU-разложение методом Гаусса с выбором ведущего элемента по всей матрице
 2. **М** Метод Холецкого (нахождение симметричного треугольного разложения)
 1. **А** Разложение Холецкого (метод квадратного корня)
 3. **И** Известные треугольные разложения для матриц специального вида
 4. **З** Унитарно-треугольные разложения
 1. **З** QR-разложения плотных неособенных матриц
 1. **М** Метод Гивенса (вращений) QR-разложения матрицы
 1. **А** Метод Гивенса (вращений) QR-разложения квадратной матрицы (вещественный точечный вариант)
 2. **М** Метод Хаусхолдера (отражений) QR-разложения матрицы
 1. **А** Метод Хаусхолдера (отражений) QR-разложения квадратной матрицы, вещественный точечный вариант
 3. **М** Метод ортогонализации
 1. **А** Классический метод ортогонализации
 2. **А** Метод ортогонализации с переортогонализацией

Рис. 1. Часть классификации алгоритмов с разметкой цепочек “задача–метод–алгоритм–реализация”

4. Развитие проекта AlgoWiki. Поскольку во второй части описаний алгоритмов в энциклопедии AlgoWiki собираются данные в том числе и о результатах выполнения алгоритмов на различных программно-аппаратных платформах, то естественно возникла идея использовать эти данные для построения различных сравнений. Причем в данном случае возможны как сравнения в рамках традиционных рейтингов вычислительных платформ, аналогичных известным рейтингам суперкомпьютеров (таким как Top500 [22], HPCG [23], Graph500 [24] и др.), так и сравнения различных реализаций, алгоритмов, методов и задач с точки зрения соответствия различным программно-аппаратным платформам [16].

В AlgoWiki существует множество описаний самых разных алгоритмов, для которых приведены результаты прогонов на различных компьютерных платформах. Алгоритмы, лежащие в основе известных тестов Linpack, Graph500 и HPCG, представлены в AlgoWiki наравне с другими описаниями. Давая вычислительному сообществу возможность сохранения результатов прогонов любых алгоритмов, значительно расширяются возможности для сравнения компьютерных платформ. Опираясь на потенциал AlgoWiki, мы переходим от трех описаний, отвечающих тестам Linpack, Graph500 и HPCG, к анализу на основе десятков и сотен самых разных алгоритмов. Среди алгоритмов из AlgoWiki для детального анализа и сравнения можно брать не все, а выбирать только те, которые интересуют в первую очередь. Если нуж-

ный алгоритм в AlgoWiki отсутствует, его можно добавить, стартовав формирование нового, отвечающего ему рейтинга.

В любых звеньях указанной выше цепочки “задача–метод–алгоритм–реализация” можно зафиксировать нужные значения, а остальные можно менять и на этой основе строить новые рейтинги или же находить те комбинации, которые удовлетворяют заданным условиям.

Рис. 2 демонстрирует построение рейтинга для фиксированного уровня задачи, в качестве которой взята задача поиска кратчайшего пути от одной вершины в графе (SSSP). При этом в рейтинг входят различные алгоритмы решения данной задачи (такие как алгоритм Беллмана–Форда или алгоритм дельта-шагания), а также различные реализации данных алгоритмов (например, широко известная реализация из теста Graph500 или собственная реализация, написанная сотрудниками НИВЦ МГУ имени М.В. Ломоносова).

Performance Data by Problem: Single Source Shortest Path

[Get XLSX file](#)

No	Problem	Algorithm	Implementation	Platform	Result (MTEPS)	CPU cores	Graph Type	Graph Size
1	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for GPU	Lomonosov-2	2129.0		SSCA-2	2^22
2	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Graph500 MPI	Lomonosov	1611.0	8	SSCA-2	2^17
3	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for GPU	Lomonosov	1309.0		SSCA-2	2^20
4	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for GPU	Lomonosov	1300.0		SSCA-2	2^23
5	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	1187.0	14	RMAT	2^24
6	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	1100.0	14	RMAT	2^23
7	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	1075.0	14	RMAT	2^25
8	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	1035.0	14	RMAT	2^21
9	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	960.0	14	RMAT	2^22
10	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	Ligra	Lomonosov-2	874.0	14	RMAT	2^26
11	Single Source Shortest Path	Delta-Stepping	PBGL MPI	Cluster+Angara	809.47998	32	SSCA-2	2^21
12	Single Source Shortest Path	Delta-Stepping	GAP	Lomonosov-2	691.0	14	RMAT	2^22
13	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for GPU	Lomonosov	687.0		RMAT	2^23
14	Single Source Shortest Path	Delta-Stepping	GAP	Lomonosov-2	616.0	14	RMAT	2^21
15	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for CPU	Lomonosov	609.169006	7	SSCA-2	2^19
16	Single Source Shortest Path	Bellman-Ford	RCC for CPU	Lomonosov	580.653015		SSCA-2	2^19

Рис. 2. Рейтинг, построенный для задачи поиска кратчайшего пути от одной вершины в графе (SSSP)

Реализуемая в рамках проекта AlgoWiki разметка алгоритмов согласно их соответствию архитектуре компьютеров станет основой для построения методов сравнения разных алгоритмов между собой, что нужно для перехода от анализа отдельных алгоритмов к анализу алгоритмических методов решения задач. Имея подобную разметку, уже можно сравнивать качество соответствия алгоритмов особенностям архитектуры конкретных компьютеров, понять преимущества каждого подхода по отношению к другим, сравнить теоретический потенциал разных алгоритмических подходов решения одной и той же задачи, а также сделать множество других выводов.

В энциклопедии AlgoWiki ведутся работы по реализации “архитектурных срезов”, которые позволяют выделять из всего множества описаний те подмножества задач, методов, алгоритмов и реализаций, которые в наибольшей степени соответствуют конкретному типу программно-аппаратных платформ. На текущем этапе проекта разметка алгоритмов по степени соответствия тем или иным архитектурам будет проводиться экспертами проекта. В будущем какие-то части этой задачи планируется частично или

полностью автоматизировать. Согласно проставленной разметке, пользователь сможет получать выборки из всего множества страниц энциклопедии AlgoWiki, содержащие описания тех алгоритмов, которые предусматривают эффективную реализацию на определенных типах программно-аппаратных платформ.

5. Заключение. Энциклопедия AlgoWiki — это исключительно масштабный проект, который, несмотря на молодость, не только активно развивается, но уже сейчас имеет целый ряд перспективных направлений.

Развитие проекта создания открытой энциклопедии свойств алгоритмов AlgoWiki продолжается. Кроме пополнения базы описаний ведется работа по доработке реализованного функционала. Материалы энциклопедии могут быть эффективно использованы для сравнительного анализа компьютерных платформ на различных классах приложений. Речь идет о прямом расширении методики, используемой в списке Top500 самых мощных компьютеров мира, которая в настоящее время опирается только на тест Linpack.

В ближайших планах — развитие идеи построения системы рейтингов на основе различных реализаций, алгоритмов, методов и задач, а также реализация “архитектурных срезов” энциклопедии.

Важное направление — это использование информации о структуре алгоритмов из AlgoWiki в учебном процессе. Мало знать математическое описание алгоритма, необходимо понимать структуру и особенности всех основных этапов, от формулировки алгоритма до его исполнения. Эти знания необходимы в суперкомпьютерном мире, где все должно быть сделано в полном соответствии с идеями суперкомпьютерного кодизайна, когда структура всех этапов решения задачи должна быть согласована. Однако сейчас все это нужно и в обычном компьютерном мире, где и смартфоны, и планшеты стали параллельными. Все проблемы параллельных вычислений стали актуальными для любых платформ, от сверхмощных суперкомпьютеров до мобильных компьютерных устройств, что и предопределило появление проекта AlgoWiki.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант 19–07–01030). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-образовательный Интернет-ресурс НИВЦ МГУ по численному анализу (<http://num-anal.srcc.msu.ru/>).
2. *Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.* Numerical recipes in C. New York: Cambridge University Press, 1992.
3. *Barrett R., Berry M., Chan T.F., Demmel J., Donato J., Dongarra J., Eijkhout V., Pozo R., Romine C., van der Vorst H.* Templates for the solution of linear systems: building blocks for iterative methods. Philadelphia: SIAM Press, 1994.
4. Wikipedia. List of algorithms (https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_algorithms).
5. Enabling AI in every application (<http://algorithmia.com/>).
6. ALGLIB (<http://www.alglib.net/>).
7. A Library of Parallel Algorithms (<http://www.cs.cmu.edu/~scandal/nesl/algorithms.html>).
8. Открытая энциклопедия свойств алгоритмов (<https://algowiki-project.org>).
9. *Voevodin V.V., Antonov A.S., Dongarra J.* AlgoWiki: an open encyclopedia of parallel algorithmic features // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2015. **2**, N 1. 4–18.
10. *Antonov A., Voevodin V.V., Voevodin V.L., Teplov A.* A study of the dynamic characteristics of software implementation as an essential part for a universal description of algorithm properties // 24th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2016. 359–363.
11. *Antonov A.S., Frolov A.V., Kobayashi H., Konshin I.N., Teplov A.M., Voevodin V.V., Voevodin V.L.* Parallel processing model for Cholesky decomposition algorithm in AlgoWiki project // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2016. **3**, N 3. 61–70.
12. *Voevodin V.L., Antonov A., Dongarra J.* Why is it hard to describe properties of algorithms? // Procedia Computer Science. 2016. **101**. 4–7.
13. *Antonov A.S., Volkov N.I.* An AlgoView web-visualization system for the AlgoWiki project // Communications in Computer and Information Science. Vol. 753. Cham: Springer, 2017. 3–13.
14. *Antonov A., Frolov A., Konshin I., Voevodin V.L.* Hierarchical domain representation in the AlgoWiki encyclopedia: from problems to implementations // Communications in Computer and Information Science. Vol. 910. Cham: Springer, 2018. 3–15.
15. *Popov A., Nikitenko D., Antonov A., Voevodin V.L.* Formal model of problems, methods, algorithms and implementations in the advancing AlgoWiki open encyclopedia // CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2281. 1–11.
16. *Antonov A., Dongarra J., Voevodin V.L.* AlgoWiki project as an extension of the Top500 methodology // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2018. **5**, N 1. 4–10.
17. Wikipedia (<https://www.wikipedia.org/>).
18. MediaWiki (<https://www.mediawiki.org/>).

19. FFTW Home Page (<http://www.fftw.org>).
20. The Intel MKL Cluster FFT (<https://software.intel.com/node/521992>).
21. AccFFT. A New Parallel FFT Library (<http://accfft.org>).
22. Top500 Supercomputer Sites (<https://www.top500.org>).
23. High Performance Conjugate Gradients (HPCG) Benchmark (<http://www.hpcg-benchmark.org/>).
24. Graph 500 (<https://graph500.org>).
25. Воеводин Вл., Жуматий С., Соболев С., Антонов А., Брызгалов П., Никитенко Д., Стефанов К., Воеводин Вад. Практика суперкомпьютера “Ломоносов” // Открытые системы. 2012. № 7. 36–39.

Поступила в редакцию
30.04.2019

Representation of Algorithmic Approaches in the AlgoWiki Electronic Encyclopedia

A. S. Antonov¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center; Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; Ph.D., Leading Scientist, e-mail: asa@parallel.ru*

Received April 30, 2019

Abstract: AlgoWiki is an open encyclopedia of algorithms' properties and features of their implementations on different hardware and software platforms. It can be used to achieve various aims, for example, to search for the optimal algorithm to solve a certain problem, to analyze the information structure of an application or to compare the efficiency of different implementations of an algorithm. This paper describes the emerging new features of the AlgoWiki encyclopedia aimed at creating a joint presentation of various algorithmic approaches to solve the same problem. This is the aim of the subject area description in the form of chains “problem–method–algorithm–implementation” supplemented by the possibility of generating ratings based on any algorithms of the encyclopedia as well as a mechanism of “architectural profiles”.

Keywords: AlgoWiki encyclopedia, information structure, problem, method, algorithm, implementation, parallelism, rating, architectural profile.

References

1. Moscow University Internet Resource for Numerical Analysis. <http://num-anal.srcc.msu.ru>. Cited June 10, 2019.
2. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C* (Cambridge University Press, New York, 1992).
3. R. Barrett, M. Berry, T. F. Chan, et al., *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods* (SIAM Press, Philadelphia, 1994).
4. Wikipedia. List of algorithms. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_algorithms. Cited June 10, 2019.
5. Enabling AI in every Application. <http://algorithmia.com/>. Cited June 10, 2019.
6. ALGLIB. <http://www.alglib.net>. Cited June 10, 2019.
7. A Library of Parallel Algorithms. <https://www.cs.cmu.edu/~scandal/nesl/algorithms.html>. Cited June 10, 2019.
8. Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features. <https://algowiki-project.org>. Cited June 10, 2019.
9. Vl. V. Voevodin, A. S. Antonov, and J. Dongarra, “AlgoWiki: An Open Encyclopedia of Parallel Algorithmic Features,” *Supercomput. Front. Innov.* **2** (1), 4–18 (2015).
10. A. Antonov, Vad. Voevodin, Vl. Voevodin, and A. Teplov, “A Study of the Dynamic Characteristics of Software Implementation as an Essential Part for a Universal Description of Algorithm Properties,” in *Proc. 24th Euromicro Int. Conf. on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing Proceedings, Heraklion, Greece, February 17–19, 2016* (IEEE Press, Piscataway, 2016), pp. 359–363.
11. A. S. Antonov, A. V. Frolov, H. Kobayashi, et al., “Parallel Processing Model for Cholesky Decomposition Algorithm in AlgoWiki Project,” *Supercomput. Front. Innov.* **3** (3), 61–70.
12. Vl. Voevodin, A. Antonov, and J. Dongarra, “Why is it Hard to Describe Properties of Algorithms?,” *Procedia Comput. Sci.* **101**, 4–7 (2016).

13. A. S. Antonov and N. I. Volkov, “An AlgoView Web-visualization System for the AlgoWiki Project,” in *Communications in Computer and Information Science* (Springer, Cham, 2017), Vol. 753, pp. 3–13.
14. A. Antonov, A. Frolov, I. Konshin, and Vl. Voevodin, “Hierarchical Domain Representation in the AlgoWiki Encyclopedia: From Problems to Implementations,” in *Communications in Computer and Information Science* (Springer, Cham, 2018), Vol. 910, pp. 3–15.
15. A. Popov, D. Nikitenko, A. Antonov, and Vl. Voevodin, “Formal Model of Problems, Methods, Algorithms and Implementations in the Advancing AlgoWiki Open Encyclopedia,” in *Proc. 4th Ural Workshop on Parallel, Distributed, and Cloud Computing for Young Scientists, Yekaterinburg, Russia, November 15, 2018*. CEUR Workshop Proc. Vol. 2281, 1–11 (2018).
16. A. Antonov, J. Dongarra, and Vl. Voevodin, “AlgoWiki Project as an Extension of the Top500 Methodology,” *Supercomput. Front. Innov.* **5** (1), 4–10 (2018).
17. Wikipedia. <https://www.wikipedia.org>. Cited June 10, 2019.
18. MediaWiki. <https://www.mediawiki.org>. Cited June 10, 2019.
19. FFTW Home Page. <http://www.fftw.org>. Cited June 10, 2019.
20. The Intel MKL Cluster FFT. <https://software.intel.com/node/521992>. Cited June 10, 2019.
21. AccFFT. A New Parallel FFT Library. <http://accfft.org>. Cited June 10, 2019.
22. Top500 Supercomputer Sites. <https://www.top500.org>. Cited June 10, 2019.
23. High Performance Conjugate Gradients (HPCG) Benchmark. <http://www.hpcg-benchmark.org>. Cited June 10, 2019.
24. Graph 500. <https://graph500.org>. Cited June 10, 2019.
25. Vl. Voevodin, S. Zhumatii, S. Sobolev, et al., “Practice of Lomonosov Supercomputer,” *Otkrytye Sistemy*, No. 7, 36–39 (2012).