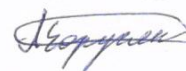


На правах рукописи



Борусьяк Александр Владимирович

**Обработка больших объемов графической информации методом
статистического кодирования и контекстного моделирования**

05.01.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2017

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Васин Юрий Григорьевич

Официальные оппоненты:

Роженцов Алексей Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет», заведующий кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем;

Немирко Анатолий Павлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры биотехнических систем

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Защита состоится «27» февраля 2018 г. в 15 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 999.048.02 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65, аудитория 202 (5 корп.)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте организации www.nngasu.ru.

Автореферат разослан «24» января 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

Н.Д.Жилина

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Актуальность интегрированных решений проблем обработки разнородной тематической графической информации (ГИ) обусловлена возрастающим потоком значительных объемов данных о дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ), поступающих с космических аппаратов (спутников), аэрофотосъемки и других источников, требующих одновременной обработки для решения различных задач. Организация интегрированной инфраструктуры больших объемов пространственно-распределенных данных (ПРД) невозможна без разработки новых эффективных моделей, методов и алгоритмов принятия решений в задачах анализа, хранения и передачи данных, в частности методов адаптивного сжатия.

В настоящее время разработано большое количество универсальных и специализированных алгоритмов сжатия. Значительный вклад в развитие методов адаптивного сжатия внесли работы российских ученых А.С.Лебедева, Н.Н.Красильникова, Ю.М.Штарькова, В.А.Виттиха, Ю.Г.Васина, С.В.Жерздева, В.В.Александрова, В.В.Сергеева и других, а также зарубежных ученых Дж.О.Лимба (J.O.Limb), У.Претта (W.K.Pratt), Р.Грэхема (R.Graham), М.Кунта (M.Kunt), П.Берта (P.Burt), С.М.Кортмена (C.M.Kortman) и других.

Однако при обработке разнородных тематических данных эффективность адаптивного сжатия существенно отличается для разных типов ГИ. Приходится использовать для сжатия разные программные комплексы, которые значительно отличаются как по алгоритмам, так и по интерфейсам. На изучение и сопровождение каждой программы требуются определенные материальные ресурсы. Это приводит к необходимости создания единого программного комплекса, который включал бы в себя все необходимые средства для эффективного сжатия изображений различных типов, обладая при этом единым интерфейсом для всех выполняемых задач.

В связи с вышеуказанной актуальной задачей является разработка методов, алгоритмов и программного обеспечения (ПО) адаптивного сжатия на единой методологической основе большеформатных растровых изображений широкого спектра, разнородной информации о пространственно-распределенных объектах, графической и текстовой информации.

Объектом исследования являются модели и методы адаптивного сжатия широкого спектра большеформатных растровых изображений графической и текстовой информации.

Предметом исследования являются графические модели описания и структуры представления контекстных моделей разных порядков, алгоритмы адаптивного сжатия большеформатных изображений на базе методов контекстного моделирования и статистического кодирования, способы уменьшения емкостной и вычислительной сложности разработанных алгоритмов

Цель исследования – разработка и развитие моделей описания, алгоритмов и интегрированного программного обеспечения для адаптивного сжатия широкого спектра разнообразных растровых изображений на основе методов контекстного моделирования и статистического кодирования.

Для достижения поставленной цели требуется проведение анализа существующих методов и алгоритмов адаптивного сжатия растровых изображений, а также прикладных задач и методов их реализации и решение следующих задач:

1. Разработка и исследование методов и алгоритмов адаптивного сжатия без потерь (*lossless*) широкого спектра растровых бинарных, полутоновых, индексированных, полноцветных и текстовых изображений.

2. Разработка графических моделей описания и структур представления для хранения, эффективного поиска и обработки контекстных моделей разного порядка.

3. Разработка и создание универсального интегрированного ПО, реализующего разработанные алгоритмы, структуры и методы адаптивного сжатия.

4. Экспериментальные исследования разработанных методов и алгоритмов с целью анализа эффективности разработанных методов и алгоритмов адаптивного сжатия большеформатных растровых изображений.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм сжатия без потерь бинарных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста определенной формы, а также разработанным методом ухода на контексты меньших порядков (КМ_{еП}), модифицированным методом наследования информации (НИ), способами вычисления контекста максимального порядка (КМП) и КМ_{еП}, а также высоким коэффициентом сжатия (К_{сж}).

2. Разработан алгоритм сжатия без потерь индексированных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста из индексированных пикселей, использованием специальных структур для хранения контекстных моделей (КМ) и ключа КМ с возможностью адаптации

параметров алгоритма под количество реально использованных цветов, способами вычисления КМП и КМеП.

3. Разработан алгоритм сжатия без потерь полноцветных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста с учетом взаимосвязей между пикселями разных цветовых каналов, а также разработанным методом ухода на КМеП, способами вычисления КМП и КМеП.

4. Разработаны графические модели описания и структуры представления множества различных двумерных контекстных моделей (ДКМ) разных порядков для организации их эффективного хранения, поиска и обработки. А также представлены способы их формирования, позволяющие учитывать взаимосвязь между отсчетами, включая межканальные корреляционные связи *RGB*, и позволяющие организовать эффективную обработку формируемых ДКМ.

5. Получены результаты экспериментальных исследований разработанных методов и алгоритмов, подтвердившие их эффективность.

Методы исследования. В работе используются методы дискретной математики, теории графов, теории вероятностей и статистического анализа, теории информации, математической логики, теории цифровой обработки сигналов и изображений, математического моделирования.

Практическая значимость. В основу диссертационной работы положены результаты, полученные автором в ходе научно-исследовательских работ, проводимых по плану госзадания Минобрнауки № 2084 в НИИПМК ННГУ и центре информатики и интеллектуальных информационных технологий ИИТММ ННГУ, а также в рамках ОКР «Модернизация» с ООО «Транзас». Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №. 13-07-00521-А, №. 13-07-12211, № 16-07-01214, №11-07-12049 ОФИ-М, №13-07-97036), а также при финансовой поддержке РНФ проект №16-11-00068.

Разработано интегрированное ПО, реализующее разработанные модели и алгоритмы адаптивного сжатия. Особенности ПО: мультиплатформенность, возможность распараллеливания, единый интерфейс, сжатие файла в блочном режиме, единый формат выходного архивного файла для изображений различной цветности. Проведены исследования по оптимизации временной и емкостной сложности алгоритмического обеспечения.

Результаты диссертационной работы внедрены в ЦКП 280 главного управления океанографии и навигации Министерства обороны РФ в составе программно-аппаратного комплекса «Векторизация ПГС» при создании мировой коллекции электронных планшетов гидрографической съемки морского дна, внедрены в центре информатики и интеллектуальных

информационных технологий ИИТММ ННГУ им. Н.И. Лобачевского при обработке большеформатных навигационных документов (топографические и морские навигационные карты, поэтажные планы зданий и сооружений) в системе ГИС «Терра», в учебном процессе института информационных технологий, математики и механики ННГУ им. Лобачевского.

Апробация полученных результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках следующих конференций: на 8-м Открытом российско-немецком семинаре «Распознавание образов и понимание изображений» (Россия, г. Нижний Новгород, 2011 г.); на 9-м Открытом российско-немецком семинаре «Распознавание образов и понимание изображений» (Германия, г. Кобленц, 2014 г.); на 11 международной конференции «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии» (Россия, Самара, 2013); на Международной Конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (Россия, Самара, 2015); на 26-ой Международной конференции и школе-семинаре по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению, системам визуализации и виртуального окружения Графикон 2016 (Россия, Нижний Новгород, 2016).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм сжатия бинарных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования.

2. Алгоритм сжатия индексированных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования.

3. Алгоритм сжатия полноцветных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования.

4. Графические модели описания и структуры представления двумерных контекстных моделей разных порядков, а также способы их формирования, позволяющие учитывать взаимосвязь между отсчетами и межканальные корреляционные связи *RGB*, а также позволяющие организовывать эффективное хранение, поиск и обработку формируемых ДКМ.

5. Анализ результатов экспериментальных исследований разработанных методов.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 8 научных работах, 3 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получено 2 свидетельства о регистрации электронного ресурса на разработанное программное обеспечение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем текста диссертации – 115 страниц, включая 23 рисунка и 20 таблицы, библиографический список из 116 наименований, приложение.

Основное содержание работы

Во введении дается обоснование актуальности темы исследования, анализируется степень разработанности проблемы, определяются объект и предмет исследования, ставятся цель и задачи, формулируются результаты, выносимые на защиту, обосновываются новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор основных направлений научных исследований в данной предметной области. Представлен обзор основных методов используемых для сжатия различных типов данных. Рассмотрены основные подходы и алгоритмы сжатия растровых изображений. Сделан вывод о необходимости развития методов и алгоритмов адаптивного сжатия *lossless* (без потерь) широкого спектра растровых изображений на основе развития идеи контекстного моделирования и статистического кодирования.

Во второй главе приведено подробное описание развитого общего алгоритма *lossless* эффективного сжатия растровых изображений на основе единого методологического подхода на базе идей контекстного моделирования и статистического кодирования.

Представим исходную растровую графическую информацию в виде трехмерной матрицы A , где каждый элемент $a_{i,j}^q \in A; 0 \leq i < m; 0 \leq j < n$ соответствует минимальному неделимому кодируемому элементу растрового изображения (пиксель), где i - номер строки, j - номер столбца, m - размер матрицы по горизонтали (ширина матрицы), n - размер матрицы по вертикали (высота матрицы), q - номер цветового канала, может опускаться, когда изображение содержит только один канал. Значения элемента $a_{i,j}^q$ определяются как $a_{i,j}^q \in \{\alpha_{i,j}^0, \alpha_{i,j}^1, \alpha_{i,j}^2, \dots, \alpha_{i,j}^v, \dots, \alpha_{i,j}^{g-1}\}$, где $\alpha_{i,j}^{q,v}$ - значение градации пикселя $a_{i,j}^q$, g - количество возможных градаций пикселя $a_{i,j}^q$ (g соответствует количеству возможных значений минимального элемента изображения). Под контекстом $C(R)$ порядка R понимается определенный набор из уже закодированных пикселей, которые предшествуют текущему кодируемому пикселю, где порядок R является величиной контекста. В данной

работе предложен двумерный контекст, состоящий из набора в R значений наиболее близких по манхэттенской метрике уже закодированных пикселей $C(R)$. Взаимосвязь между пикселями в алгоритме учитывается как по горизонтали, так и по вертикали, что позволяет добиться значительного выигрыша в Ксж.

Под контекстным моделированием понимается оценка вероятности $P(\alpha_{i_0, j_0}^v / C(R))$ появления значения α_{i_0, j_0}^v пикселя a_{i_0, j_0}^q , а также вероятности $P(esc / C(R))$ появления символа ухода в зависимости от предшествующего ему контекста $C(R)$, где R порядок контекста.

Попытка оценки значения пикселя начинается с $KM(N)$. В случае нулевого счетчика встречаемости текущего значения пикселя в KM текущего порядка осуществляется переход к KM меньшего порядка за счет использования механизма уходов. Механизм уходов предполагает введение вспомогательного символа ухода (*esc*), который используется для передачи декодеру указаний кодера. *esc* является квазисимволом и не принадлежит к алфавиту сжимаемой последовательности. Каждому встречаемому контексту соответствует контекстная модель (KM) – статистическая модель появления всех возможных элементов кодируемых данных после этого контекста. KM включает значения счетчиков встречаемости $f(\alpha_{i_0, j_0}^v / C(R))$ для всех возможных значений пикселя, соответствующих данной KM , сумму $f(C(R))$ значений всех счетчиков встречаемости всех возможных значений пикселя, значение счетчика символа ухода, ссылку на KM -предок и переменную-флаг о необходимости применения процедуры наследования информации. Значение счетчика $f(\alpha_{i_0, j_0}^v / C(R))$ – значение счетчика встречаемости значения α_{i_0, j_0}^v пикселя a_{i_0, j_0}^q , соответствует количеству появлений данного значения пикселя после контекста, соответствующего данной KM $C(R)$. Значение счетчика символа ухода $f(esc / C(R))$ определяется по специальной формуле.

Для каждого контекста, встречаемого при кодировании, создается ключ контекстной модели – уникальный идентификатор контекстной модели, соответствующий определенному контексту.

Общий алгоритм кодирования представлен на блок-схеме (рис. 1). Блок-схема алгоритма кодирования текущего пикселя отражена на рисунке 2.

В результате исследования было показано, что в случае, если значение текущего пикселя встречается после данного контекста первый раз, то более эффективно уйти на контекст в 2-3 раза меньший, чем текущий.

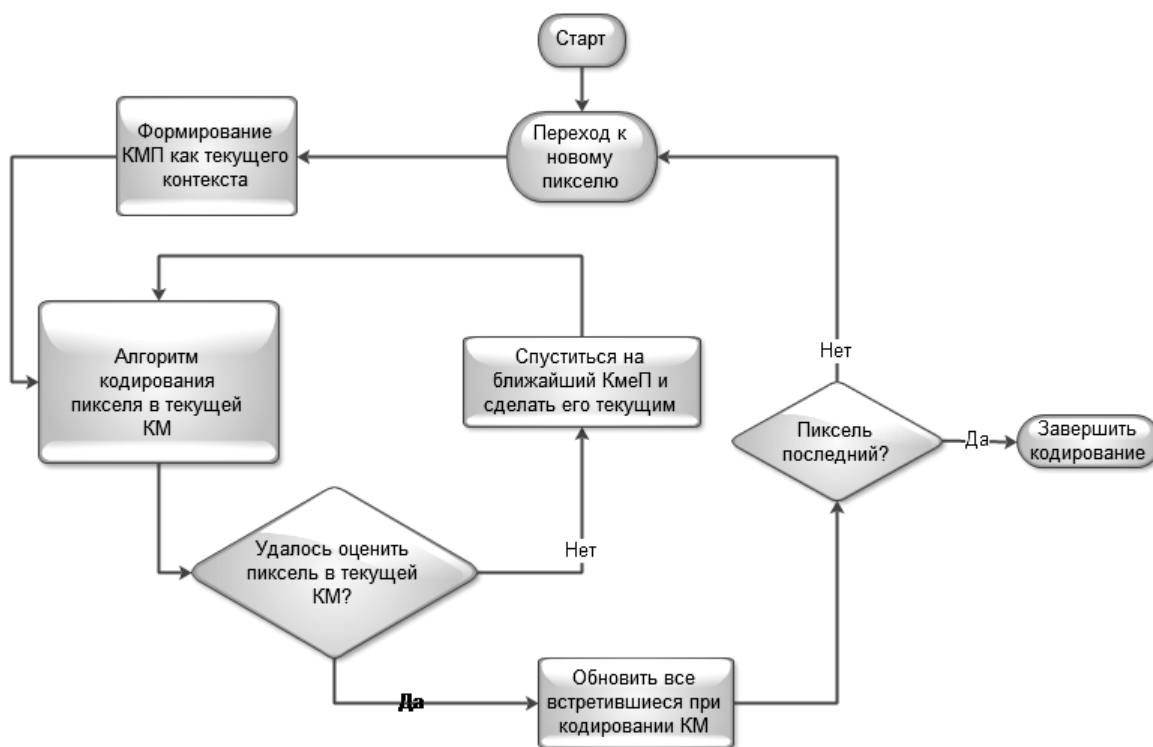


Рис. 1. Блок-схема общего алгоритма кодирования

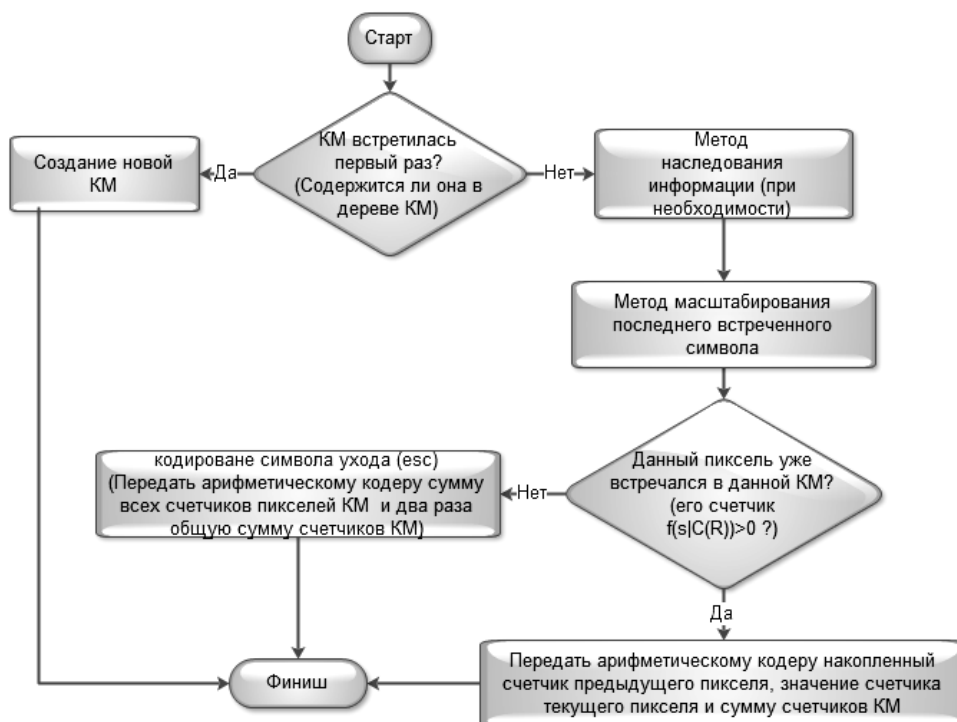


Рис. 2. Блок-схема алгоритма кодирования значения текущего пикселя

Развит способ масштабирования последнего встреченного символа (МПВС), который основывается на предположении, что если в последний раз после текущего контекста был встречен некий элемент данных, то вероятность того, что текущий элемент окажется таким же вырастает. В результате можно умножить значение счетчика встречаемости последнего встретившегося элемента данных на некий коэффициент ca .

Используется способ исключения, позволяющий при кодировании значения пикселя в КМ порядка $R \leq N$ в случае ухода на КМеп исключить из рассмотрения все значения пикселей, которые содержатся в $КМ(r)$, $0 < r < R$, поскольку ни один из них точно не является значением пикселя $a_{i_0 j_0}^{ch}$.

С целью повышения точности оценок значений счетчиков встречаемости значений пикселей в КМ высоких порядков был развит метод наследования информации (НИ) [1]. Метод НИ заключается в том, что при появлении в дочерней КМ(R) нового значения пикселя $\alpha_{i_0 j_0}^v$, счетчик $f(\alpha_{i_0 j_0}^v | C(R))$ инициализируется некоторой величиной $f^0(\alpha_{i_0 j_0}^v | C(R))$, зависящей от информации о данном значении пикселя в родительской КМ(r).

В качестве статистического кодировщика используется целочисленная реализация арифметического кодера. После непосредственного кодирования значения пикселя осуществляется обновление статистики всех КМ, использованных при его кодировании. Кодирование продолжается до тех пор, пока не будут закодированы все пиксели изображения.

Процесс декодирования симметричен процессу кодирования. При декодировании статистический кодировщик последовательно извлекает из выходного файла закодированные значения накопленных счетчиков встречаемости. Далее в текущей КМ ищется значение пикселя, соответствующее извлеченному значению. В случае, если декодированному значению соответствует символ ухода, происходит уход на контекст меньшего порядка, в противном случае найденный пиксель отмечается на изображении. Далее текущая КМ обновляется в соответствии с обработанным пикселем. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут декодированы все пиксели изображения.

Для хранения КМ в оперативной памяти используется лес деревьев, в котором для каждого уровня КМ используется отдельное дерево. Доступ к каждому дереву в лесе деревьев осуществляется за время $O(1)$ по значению R уровня КМ.

В третьей главе рассматриваются алгоритмы сжатия бинарных, индексированных и полноцветных растровых изображений без потерь основанные на единой методологической основе с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования.

Представлен алгоритм сжатия бинарных изображений *PCTB (Probability Coder To Black-white)*. Помимо двухмерности используемого контекста, разработанный алгоритм отличается способом ухода на контексты меньших

порядков (КМеп), набором методов улучшения степени сжатия, использованием способа масштабирования последнего встреченного символа (МПВС), использованием метода наследования информации (НИ), способами вычисления нового контекста максимального порядка (КМП) и КМеп.

Форма представления графической информации $C(R)$ задается в виде формулы (1).

$$Cont(a_{i_0, j_0}^q) = \begin{cases} i = i_0 - t_k + b_k \\ j = j_0 - k \\ t_k = p - k; \\ k = 0, 1, \dots, p; p = 5; \\ b_0 = 0, 1, 2, \dots, t_0 - 1; b_1 = 0, 1, 2, \dots, 2t_1; b_2 = 0, 1, 2, \dots, 2t_2; b_3 = 0, 1, 2, \dots, 2t_3; b_4 = 0, 1, 2, \dots, 2t_4; b_5 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$i_0 = 0, 1, 2, \dots, m - 1$
 $j_0 = 0, 1, 2, \dots, n - 1$
 $q = 1$

где m, n ширина и высота сжимаемого изображения, i, j – координаты отдельных пикселей контекста, a_{i_0, j_0}^q – текущий кодируемый элемент, p – высота контекста в пикселях, q – номер цветового канала. Форма КМП изображена на рисунке 3. Клетками с цифрами обозначены пиксели, принадлежащие к контексту, клетками серого цвета – необработанные пиксели, белого цвета – обработанные пиксели, знаком вопроса – текущий пиксель a_{i_0, j_0}^q , цифрами - порядок учета пикселей в контексте.

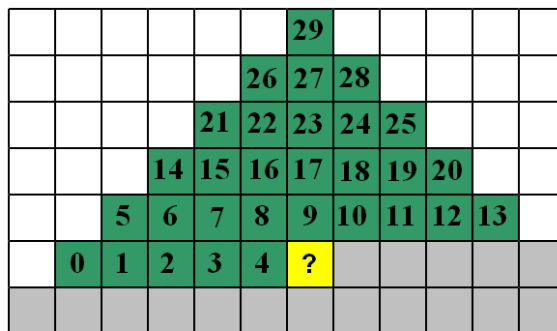


Рис. 3. КМП алгоритма РСТВ

Вычисление КМеп производится из КМП по заранее определенной битовой маске. Маска представляет собой заранее определенный фиксированный список порядковых номеров пикселей КМП.

На рисунке 4 изображен порядок спуска от КМП к контексту 4-го уровня с

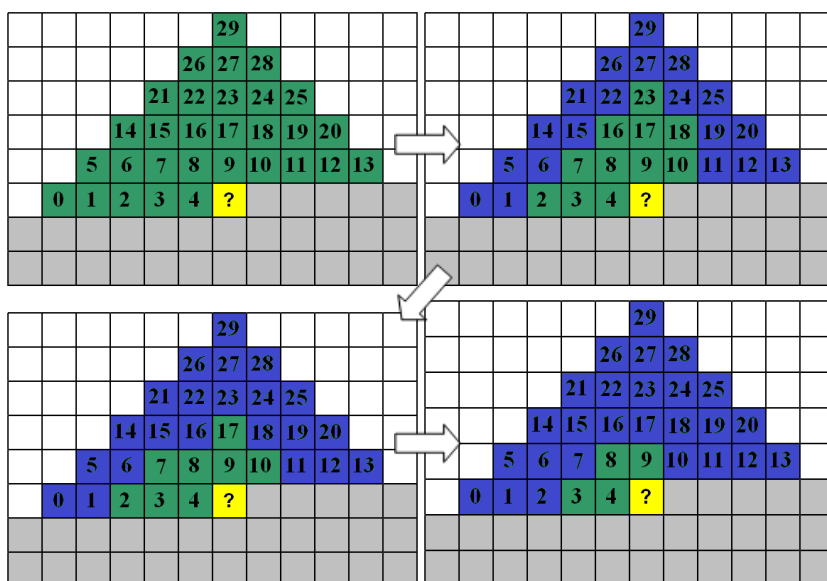


Рис. 4. Порядок спуска к контекстам меньших порядков

наглядным отображением используемых масок. Более светлыми клетками с цифрами обозначены значения пикселей, входящих в контекст текущего порядка, знаком вопроса – кодируемый пиксель, темными клетками с цифрами - пиксели КМП, которые не входят в КМП, серыми клетками без цифр - еще необработанные пиксели, белым - уже обработанные пиксели. Пиксели КМП остаются сгруппированными вокруг текущего пикселя.

Оценка счетчика встречаемости символа ухода в предлагаемом алгоритме вычисляется следующим образом. Изначально счетчик символа ухода равен 2. При каждом новом встречаемом значении пикселя счетчик символа ухода уменьшается на единицу. Для контекста $C(R)$ $f(esc|C(R))$ определяется формулой (2). Данный способ оценки счетчика ухода позволил добиться значительного увеличения $K_{сж}$ и увеличить скорость кодирования.

$$f(esc|C(R)) = \begin{cases} 2; & f(C(R)) = 0 \\ 1; & f(C(R)) \neq 0, f(0|C(R)) = 0 \cup f(1|C(R)) = 0 \\ 0; & f(C(R)) \neq 0, f(0|C(R)) \neq 0, f(1|C(R)) \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Отличие предлагаемой техники МПВС основывается на предположении, что если в данной модели встречалось только одно значение пикселя, то используемый коэффициент должен быть выше, чем когда встретились оба значения пикселя. В результате исследования были подобраны следующие значения коэффициента «ca»: 4 – в случае, когда в модели встретился только одно значение пикселя и 1,375 - в случае, когда встретились оба значения пикселя. Значения коэффициента «ca» вычисляется по формуле 3:

$$ca = \begin{cases} 4, & f(esc|C(R)) > 0 \\ 1,375, & f(esc|C(R)) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Используемый способ исключения отличается тем, что благодаря содержанию в алфавите всего двух возможных значений пикселя, в выходную последовательность при уходе с уже встречавшегося контекста кодируется только информация о необходимости ухода на КМП, после чего кодирование значения текущего пикселя завершается.

Новизна предлагаемого метода заключается во введении специального коэффициента T . Данный коэффициент снижает воздействие метода НИ при обработке изображений с высокой степенью шумов. Пусть в результате серии уходов мы спустились с $KM(R)$ на $KM(R-m)$, где значение a_{i_0, j_0}^q пикселя было успешно оценено. Тогда начальное значение $f^0(\alpha_{i_0, j_0}^v | C(R))$ в $KM(R)$ вычисляется, исходя из формулы 4:

$$f^0(\alpha_{i_0, j_0}^v | C(R)) = \frac{f(\alpha_{i_0, j_0}^v | C(R-m)) * f(C(R))}{f(C(R-m)) + f(C(R)) - 2 + f(esc | C(R)) - f(\alpha_{i_0, j_0}^v | C(R-k)) + \sum_{0 < j < R} f(\alpha_{i_0, j_0}^v | C(j))} * T, \quad (4)$$

где $T = (1 - \min(f(e | C(R-m)) / \max(f(e | C(R-m))))$, $e \in \{0,1\}$

Данный метод позволил увеличить Ксж на 2-5% при незначительных потерях в производительности.

Для проверки эффективности алгоритма были проведены эксперименты на тестовом наборе изображений и проведено сравнение с наиболее распространенными универсальными и специализированными алгоритмами сжатия изображений: *MPD*, *tiff(G4)*, *PNG*, *7z(LZMA)*, *WinRar(rar)*, *PPMc*. Тестовый набор включает в себя 10 изображений различного типа. В таблице 1 приведены результаты экспериментальных апробаций. В столбцах таблицы 1 приведены Ксж (коэффициенты сжатия) для различных алгоритмов, строки соответствуют различным тестовым данным. Из проведенных экспериментов разработанный алгоритм существенно превосходит (до 1.2 – 6.3 раз) в среднем в 2.8 раз другие специализированные и универсальные алгоритмы сжатия без потерь.

Таблица 1. Сравнение с другими алгоритмами по коэффициенту сжатия

№	РСТВ	Алгоритм MPD	WinRar (RAR)	7z (LZMA)	Tiff (G4)	PNG	PPMc
1	112.43	63.88	43.35	50.76	64.21	29.85	34.94
2	114.14	63.65	50.15	59.35	66.57	33.54	31.60
3	78.10	36.65	14.45	30.76	35.56	19.92	16.10
4	58.72	32.51	18.31	20.68	32.97	13.33	14.69
5	65.53	35.29	23.96	29.58	35.26	18.10	17.43
6	188.68	70.68	63.61	87.48	77.10	43.82	35.01
7	17.16	5.34	6.70	7.26	4.69	6.06	5.69
8	60.92	15.68	21.41	25.62	19.11	20.41	9.61
9	5.22	3.66	3.71	3.69	1.66	3.13	3.99
10	62.54	44.19	25.49	33.75	33.11	18.11	18.21

Так как разработанный алгоритм обладает значительной вычислительной сложностью, особое внимание было уделено оптимизации алгоритма с целью увеличения скорости сжатия и уменьшению уровню потребления ОП. Показано, что наибольший прирост производительности дает переход к последовательному расположению пикселей в контексте с использованием предыдущего значения КМП для вычисления нового КМП, а также использованием битовых масок для вычисления КМП. Разработанный алгоритм отличается возможностью отдельной обработки со сжатием белых прямоугольных полей для бинарных изображений. Данный подход позволил значительно увеличить скорость сжатия изображений с белыми полями, а также увеличить Ксж сжатия таких изображений. К каждой КМ добавлена ссылка на

контекстную модель КМ-предок с целью ускорения операции нахождения КМ-предка. Введено ограничение сверху на количество КМ, хранящихся в AVL-дереве.

Рассмотренные выше подходы позволили существенно в 1,5-2 раз уменьшить время необходимое на кодирование/декодирование. Результаты экспериментальных апробаций приведены в таблице 2.

Для сжатия индексированных астровых изображений (ИРИ) общий алгоритм был адаптирован для работы с 8-битными пикселями. Размер КМП был установлен равным 8. С помощью алгоритма формирования КМП, описанного ранее, была сгенерирована форма и подобран размер КМП, изображенные на рисунке 5.

Обозначения идентичны обозначениям, используемым в изображении КМП для алгоритма *PCTB*. Предлагаемый алгоритм для сжатия индексированных изображений назван *IPC (Indexed Probability Coder)*.

В случае, если используемых цветов в индексированном изображении будет меньше 256, в каждой КМ будет до 254 неиспользуемых счетчиков встречаемости. В виду этого алгоритм использует специально разработанные структуры для хранения КМ и ключа КМ с возможностью адаптации параметров алгоритма под количество реально используемых цветов.

Для оценки счетчика встречаемости символа ухода за основу взят метод оценки счетчика символа ухода C [73]. Пусть количество счетчиков с ненулевыми значениями в текущей КМ равно M , тогда $f(esc/C(R))$ будет оценен как M , а значение счетчика символа ухода будет оцениваться значением $f(esc | C(R)) = \frac{M}{f(C(R)) + M}$. Когда величина счетчика символа ухода достигает

размера, равного значению СТ различных возможных значений пикселя изображения (различных возможных значений компоненты цвета пикселя в случае полноцветных изображений), счетчик $f(esc/C(R))$ зануляется. Уход при

Таблица 2. Сравнение быстродействия программы до и после оптимизации

№	Время (сек)	
	До улучшений	После улучшений
1	2,156	0,984
2	7,859	5,468
3	10,25	4,297
4	932,32	712,634
5	433,996	180,706

					4				
			7	3	1	5			
		6	2	0	?				

Рис. 5. КМП для алгоритма *IPC*

встрече нового значения пикселя в контексте осуществляется не на ближайший КМеп, а на контекст в 2-3 раза меньший, чем текущий. При вычислении КМеп все значения пикселей вычисляемого контекста делятся на два для экономии ОП, увеличения скорости сжатия и увеличения Ксж за счет объединения статистики у ближайших контекстов. Экспериментальная апробация подтвердила высокую эффективность такого подхода.

Для увеличения коэффициента сжатия использован способ МПВС с коэффициентом 4. Применяется способ исключения.

Проведены исследования по ускорению работы алгоритма. Пиксели в КМП упорядочены по степени близости к текущему обрабатываемому пикселю. Разработанная специальная структура хранения ключа контекста представляет собой массив байт и длину контекста, где каждый байт соответствует 1 значению пикселя контекста. При выполнении любой операции с ключом контекста учитывается только количество значений пикселей, равное длине контекста, что позволяет преобразовать текущий ключ контекста в ключ КМеп за время $O(1)$.

Для проверки эффективности алгоритма были проведены эксперименты на тестовом наборах изображений и проведено сравнение с наиболее распространенными универсальными и специализированными алгоритмами сжатия изображений: *JpegLS*, *PNG*, *7z*, *rar*, *PPM*. Первые пять изображений тестового набора включают в себя пять индексированных 256-цветных изображений различного типа. Вторые пять тестовых изображений являются копией первых пяти изображений с редуцированным до 8 количеством цветов. Подробно данный расширенный набор изображений описан в разделе 5.8.

Результаты экспериментальных апробаций приведены в таблице 3, где столбцы соответствуют Ксж для различных алгоритмов, строки соответствуют различным тестовым данным. Из проведенных экспериментов было выявлено, что разработанный алгоритм существенно превосходит по Ксж (в среднем от 1,15 до 2,13 раз) другие специализированные и универсальные алгоритмы сжатия без потерь.

Таблица 3. Сравнение алгоритма IPC с другими алгоритмами по Ксж

№	IPC	PNG	Jpeg-ls	WinRar	7z (LZMA)	PPMc
1	11,09	6,34	5,74	7,22	8,50	6,98
2	20,39	10,86	9,24	14,69	14,38	8,91
3	8,80	6,73	4,29	7,17	6,65	5,98
4	4,20	2,93	2,30	3,65	3,45	3,58
5	5,46	4,72	3,36	4,78	4,47	4,65
6	13,31	10,01	9,07	9,34	11,63	7,53
7	1,62	2,01	1,83	1,58	1,59	1,62
8	4,84	3,50	3,06	4,17	4,16	4,13

9	1,23	1,51	1,36	1,21	1,34	1,23
10	3,17	2,62	2,57	2,96	2,78	3,04

Для работы с полноцветными растровыми изображениями был разработан алгоритм *FPC (Fullcolor Probability Coder)*. Для полноцветных изображений $CT=256$. Были проведены исследования различных изображений на предмет взаимосвязи значений цветовых компонент различных цветовых каналов. В результате исследования выяснилось, что существует большая вероятность, что если разница между двумя значениями двух значений пикселей одного цветового канала равна определенному числу *Delta*, тогда и разница между двумя значениями двух других цветовых каналов будет равна или близка к *Delta*. В предлагаемом алгоритме сжатие каждого пикселя производится поканально. Сначала сжимается значение цветовой компоненты, отвечающей за красный цвет, затем происходит кодирование значения цветовой компоненты зеленого цвета и далее кодируется значение компоненты синего цвета. Для каждого канала используются отдельные контекстные модели. Алгоритм формирования КМП для полноцветных изображений отличается использованием нормированного значения формуле $m_{i_0, j_0}^q = (g + (\alpha_{i_0, j_0}^v - \alpha_{i_0-1, j_0}^v)) \% g$, где m_{i_0, j_0}^q – новое нормированное значение разницы между текущим α_{i_0, j_0}^v и предыдущим α_{i_0-1, j_0}^v значениями текущей цветовой компоненты, $g=256$ – количество градаций элемента α_{i_0, j_0}^v , $\%$ – операция взятия остатка от деления по модулю. При этом разница m_{i_0, j_0}^q используется только в качестве значения текущего кодируемого элемента, для элементов контекста используются исходные значения цветовых компонент.

При этом $q = 1$ соответствует *Red(R)*, $q = 2$ соответствует *Green(G)*, $q = 3$ соответствует *Blue(B)*. Особенностью алгоритма является использование в качестве значений пикселей контекста для всех цветовых компонент значений всех трех цветовых компонент. Данный подход позволяет более эффективно использовать свойство взаимосвязи между цветовыми каналами. Были проведены экспериментальные апробации по сравнению сжатия с учетом взаимосвязи между каналами и без. Результаты данных экспериментальных апробаций показали преимущество в среднем до 10% предлагаемого подхода по сравнению с отдельным сжатием цветовых каналов изображения.

КМП алгоритма *FPC* представлен на рисунке 6, цифры соответствуют порядковым номерам пикселей в КМП, буквы соответствуют цветовым каналам, остальные обозначения идентичны обозначениям для КМП алгоритмов *PCTB* и *IPC*.

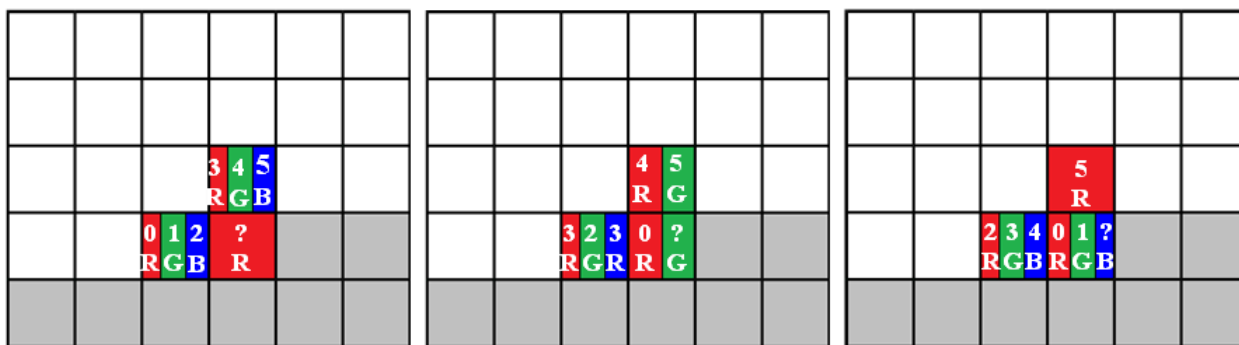


Рис. 6. КМП алгоритма FPC

Произведенные экспериментальные апробации, подтверждающие эффективность предлагаемого подхода, отображены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение алгоритма FPC с другими алгоритмами по степени сжатия

	FPC	PNG	JPEG-LS	WinRAR (Rar)	7z (LZMA)	PPM
artificial.bmp	19,19	11,28	12,07	10,64	16,54	3,15
big_tree.bmp	1,74	1,15	1,84	1,57	1,35	1,25
bridge.bmp	1,66	1,14	1,76	1,48	1,34	1,28
30057A.bmp	2,16	1,37	2,21	1,85	1,72	1,51
31015B.bmp	2,06	1,27	2,09	1,69	1,59	1,43
31131B.bmp	2,02	1,23	2,09	1,63	1,54	1,38

Четвертая глава

посвящена описанию созданного программного комплекса, реализующего функции кодирования/декодирования бинарных, индексированных и полноцветных изображений. Приводится описание формата выходного файла, особенности реализации и системные требования программного комплекса.

Структурная схема программного комплекса, состоящая из основных программных классов, изображена на рисунке 7.

Проведены исследования по выявлению зависимости Ксж, времени сжатия и размера

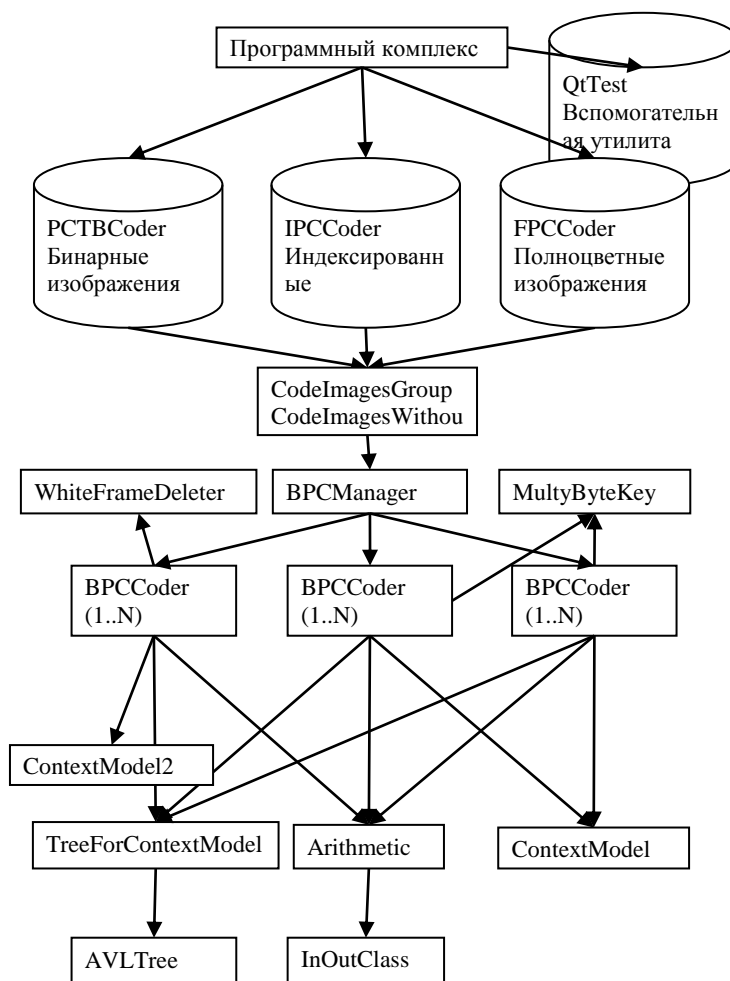


Рис. 7. Структура программного комплекса

потребляемой оперативной памяти от величины КМП. При уменьшении размера КМП до 20 коэффициент сжатия падает в среднем на 4%, при этом наблюдается значительное уменьшение времени (до 2 раз), необходимого для сжатия и уменьшение количества потребляемой ОП (до 6 раз).

С целью дальнейшего увеличения скорости кодирования/декодирования была реализована возможность кодировать и декодировать растровые изображения, используя распараллеливание процесса обработки на несколько потоков одновременно. Распараллеливание производится путем разбиения изображения на n частей и последующего кодирования (декодирования) каждой части изображения в отдельном потоке.

Реализована возможность сжимать блок файлов, сохраняя статистику при переходе от одного файла к другому. Данный метод позволил увеличить Ксж до 10% в зависимости от сжимаемых данных.

Реализация программного комплекса выполнена в мультиплатформенной среде разработки *Qt*.

Основные результаты и выводы

1. Разработан алгоритм сжатия без потерь бинарных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста определенной формы, а также разработанными методом ухода на КМП, модифицированным методом наследования информации, способами вычисления КМП и КМП.

2. Разработан алгоритм сжатия без потерь индексированных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста из индексированных пикселей, использованием специальных структур для хранения КМ и ключа КМ с возможностью адаптации параметров алгоритма под количество реально использованных цветов, разработанными способами вычисления КМП и КМП.

3. Разработан алгоритм сжатия без потерь полноцветных растровых изображений с использованием контекстного моделирования и статистического кодирования. Алгоритм отличается введением двумерного контекста с учетом взаимосвязей между пикселями разных цветовых каналов. Алгоритм отличается разработанными методом ухода КМП, способами вычисления КМП и КМП.

4. Разработаны графические модели описания и структуры представления ДКМ разных порядков, а также способы их формирования, позволяющие учитывать взаимосвязь между отсчетами, а также межканальные корреляционные связи *RGB*, организовать эффективное хранение, поиск и

обработку формируемых ДКМ. Разработанные модели и структуры позволяют организовывать хранение и обработку ДКМ с высокой скоростью, оптимизируя потребление вычислительных ресурсов и ОП.

5. Разработано интегральное программное обеспечение (ПО) на единой методологической платформе (контекстное моделирование и статистическое кодирование) для адаптивного сжатия без потерь разнородной растровой информации, на базе разработанных методов, структур и алгоритмов. Разработанное ПО позволяет использовать единый интерфейс для сжатия изображений различного типа.

6. На базе разработанного ПО проведены экспериментальные исследования методов и алгоритмов, подтвердивших их эффективность. Преимущество по Ксж составило на бинарных изображениях до 1.2-6.3 раз, в среднем в 2.8 раза, для индексированных изображений составило в среднем в 1.6 раза, для полноцветных изображений в среднем в 1.45 раз по сравнению с другими специализированными и универсальными алгоритмами сжатия.

Публикации по теме диссертационной работы

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Борусяк, А.В. Сжатие бинарных графических изображений с использованием контекстного моделирования / А.В. Борусяк, Ю.Г. Васин, С.В. Жерздев // Pattern recognition and image analysis (advances in mathematical theory and applications). – 2013. - Т. 23, № 2. - С.207-210.

2. Борусяк, А.В. Сжатие индексированных графических изображений с использованием контекстного моделирования/ А.В.Борусяк, Ю.Г. Васин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2014. - № 4-1. - С. 486-492.

3. Борусяк, А.В. Развитие алгоритма адаптивного сжатия индексированных изображений с использованием контекстного моделирования/ А. В. Борусяк, Ю. Г. Васин// Pattern recognition and image analysis (advances in mathematical theory and applications). – 2016. - Т. 26, №1. - С. 4-8.

Статьи в сборниках научных трудов и сборниках конференций:

4. Борусяк, А.В. Сжатие бинарных изображений с использованием контекстного моделирования / А.В. Борусяк, С.В. Жерздев // Распознавание образов и понимание изображений: 8-ой открытый Германо-Русский семинар OGRW-8-2011. – Н. Новгород, 2011. - СС.25-27.

5. Борусяк, А.В. Оптимизация вычислительной сложности адаптивного алгоритма сжатия бинарных растровых изображений/ А.В. Борусяк, Ю.Г.

Васин, С.В. Жерздев // Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии: 11 междунар. конф. – Самара, 2014. – С.170-172.

6. Борусяк, А.В. Алгоритм сжатия индексированных изображений с использованием контекстного моделирования / А.В. Борусяк, Ю.Г. Васин // Тр. 9-ой открытой Германо-Русской конф. по распознаванию образов и пониманию изображений. - 2015. – С.60-62.

7. Борусяк, А.В. Увеличение скорости работы алгоритма адаптивного сжатия бинарных растровых изображений/ А. В. Борусяк// Информационные технологии и Нанотехнологии (ITNT-2015): тр. междунар. конф. – Самара, 2015. - С. 262-267.

8. Борусяк, А.В. Сжатия большеформатных изображений с помощью статистического кодирования с использованием контекстного моделирования/ А.В. Борусяк, Ю.Г. Васин// Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности (SCVRT1516): Тр. Междунар. науч. конф. . – М., 2016. – С. 274-278.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

9. Борусяк, А.В Сжатие бинарных графических изображений на базе статистического кодирования с использованием контекстного моделирования/ А.В. Борусяк // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 20764 от 03.02.2015

10. Борусяк, А.В RCTVCoder/ А.В. Борусяк // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22192 от 20.11.2016