

*На правах рукописи*

Батюков  
Александр Михайлович

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРЕПАРАТОВ

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете  
на кафедре информатики математико-механического факультета

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
АМПИЛОВА Наталья Борисовна, доцент

Официальные оппоненты: ФЛЕГОНТОВ Александр Владимирович,  
доктор физико-математических наук, профессор, РПГУ им. А. И. Герцена, профессор,  
зав. каф.

СЕНИЧЕНКОВ Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, СПбПУ, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Защита состоится 24 декабря 2015 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.51 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу:

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <http://spbu.ru/science/disser/>

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.ф.-м.н. Демьянович Ю. К.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Вопрос создания компьютерных алгоритмов, способных разделить множество изображений на классы в зависимости от типа иллюстрируемой ими информации (решить задачу классификации), часто возникает при решении задач из совершенно различных прикладных областей знаний, таких как анализ аэрофотографий местности, дефектоскопия материалов по изображениям, исследование фотоснимков областей звездного неба. Необходимость автоматизации в таких задачах обуславливается чрезвычайно большим числом анализируемых изображений, настолько большим, что ручной анализ их занял бы месяцы и годы. Поэтому важными качествами используемых алгоритмов должны быть как высокая точность классификации, так и высокая скорость работы. Кроме того, алгоритмы анализа и классификации изображений всегда проблемно-ориентированы.

Биология и медицина — активно развивающиеся области современной науки, в которых анализ и классификация изображений играют особую роль: фактически это единственный способ наблюдения за той или иной исследуемой в их рамках органической системой, начиная с наблюдаемой в микроскоп клетки и заканчивая изображениями органов и тканей. Точные и быстрые алгоритмы компьютерной классификации изображений по определенным признакам могут сильно облегчить задачу врача или ученого, работающего в указанных областях.

Несмотря на взрывной рост числа новых работ в исследуемой области за последние 15 лет, достаточно очевидно, что объем и разнообразие доступной для анализа информации чрезвычайно велики, и существующие методы не всегда могут дать приемлемый результат.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью использования новых идей и создания на их основе алгоритмов для анализа и классификации биомедицинских изображений, что позволит исследователям получить более полное представление о процессах, происходящих в объектах естественного происхождения.

**Степень разработанности темы исследования.** В последнее время растет число работ, посвященных анализу и классификации биомедицинских

изображений. Наиболее часто используется морфологический анализ, текстурный анализ, фрактальный и мультифрактальный анализ, анализ с помощью нейронных сетей, многомерный анализ изображений, исследования изображений с помощью теории графов и при помощи кластерного анализа. Для повышения точности и скорости классификации применяются методы поля направлений, вейвлет-преобразования, дискриминантный и факторный анализ. Большое число различных применяемых методов обусловлено большой вариативностью исследуемых изображений. Методы классификации изображений применяются для распознавания мочекаменной болезни, заболеваний крови, исследования препаратов тканей различных органов, определения наличия герпеса, определения наличия заболеваний нервной системы и сердечных заболеваний. Для решения перечисленных задач анализируются снимки внутренних органов и тканей, образцы кристаллизированных (дегидратированных) капель биологических жидкостей, снимки микрообъектов (клетки, нервные окончания), изображения кровеносных сосудов глазного дна, рентгеновские изображения коронарных сосудов. Множество исследуемых данных расширяется еще и за счет того, что снимки объектов естественного происхождения могут отличаться большой вариативностью форм даже в рамках одного класса.

Особое внимание уделяется вопросам исследования цветных изображений и вопросам их предварительной обработки для повышения точности работы классифицирующих алгоритмов. Кроме того, исследуются вопросы оптимизации, распараллеливания и организации вычислений с помощью графических карт с целью повышения быстродействия.

**Объектом исследования** являются модели, методы, алгоритмы и программные средства обработки изображений. **Предметом исследования** являются разработка и реализация алгоритмов решения задачи классификации изображений биомедицинских препаратов.

Исследуемое изображение при решении задачи классификации биомедицинских изображений полезно рассматривать как фазовый портрет некоторой сложной динамической системы. Математическое описание такой системы редко бывает возможным, поскольку моделирование процессов, происходящих в живых тканях требует учета огромного числа параметров и связей

между ними. Анализ фазовых портретов позволяет охарактеризовать состояние системы в определенный момент времени, а также промоделировать развитие процесса, например, достижения системой некоторого стационарного состояния.

Цифровые изображения представляются в виде решетки пикселей с заданными параметрами, поэтому их характеристики формулируются в этих терминах. Так характеристики Харалика описывают взаимное расположение пикселей различной интенсивности. Методы фрактального и мультифрактального анализа используют разбиение изображения на ячейки и вычисление их мер с последующим определением размерности (или набора размерностей). С точки зрения динамики фазовый портрет системы характеризует распределение траекторий по фазовому пространству в некоторый момент времени, а распределение меры характеризует частоту попадания траекторий в ячейки разбиения.

Такой подход к анализу изображений позволяет:

- охарактеризовать текущее состояние процесса с помощью вычисления статистических и фрактальных характеристик;
- для широкого класса диффузионных процессов реализовать модель их развития от начального состояния;
- охарактеризовать стационарные состояния процесса с помощью построения стационарного потока на связанном с изображением графе.

**Целью работы** является разработка алгоритмов классификации изображений биомедицинских препаратов, основанных на анализе фазовых портретов динамических систем, и реализация на их основе комплекса программ.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- исследовать влияние выбора цветовых координат в качестве начальных данных для классификации биомедицинских изображений с помощью вычисления статистических признаков Харалика второго порядка;
- разработать модификацию алгоритма построения агрегатов по математической модели DLA (Diffusion Limited Aggregation) с помощью априорной оценки коэффициентов присоединения;
- разработать модификацию алгоритма построения стационарного потока на графе путем построения стационарных потоков на подграфах;

- разработать комплекс программ, реализующих все перечисленные алгоритмы.

**Методология и методы исследования.** Методология работы основана на методах индукции и дедукции, обобщения, математического моделирования, анализа и синтеза теоретического и практического материала. При получении основных результатов работы использовались методы работы с двумерными изображениями, построения математических моделей сложных систем, компьютерного моделирования, математического анализа, теории графов, теории сложности вычислений, а также программирование на языке высокого уровня.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** опирается на проведенные доказательства, рассуждения и эксперименты.

**Научная новизна** диссертации заключается в том, что разработанные в ней алгоритмы классификации изображений биомедицинских препаратов предложены впервые. Использование координат цветовых пространств в качестве исходных данных для классификации с помощью статистических признаков Харалика дает более высокую точность классификации по сравнению с классическим методом. Использование модифицированных алгоритмов построения агрегатов и стационарного потока на графе позволяет значительно уменьшить временную и емкостную сложности вычислений, что позволяет получить сопоставимые с оригинальными алгоритмами результаты до 40 раз быстрее. В диссертации сформулированы и доказаны четыре теоретических утверждения, обосновывающие эффективность разработанных алгоритмов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В рамках диссертационного исследования разработана алгоритмическая основа для комплекса программ анализа и классификации изображений биомедицинских препаратов. Предлагаемые алгоритмы дают большую точность классификации и обладают меньшей вычислительной сложностью, что делает результаты диссертации теоретически значимыми. Практическая значимость результатов диссертации заключается в реализации комплекса программ, позволяющего оценить эффективность разработанных алгоритмов классификации для каждого конкретного случая исследований.

## Положения, выносимые на защиту

1. Предложен метод использования координат цветовых пространств RGB и HSV в качестве входных данных для алгоритмов анализа изображений с помощью статистических характеристик Харалика второго порядка. Полученные наборы характеристик для разных цветовых пространств позволяют выбрать наиболее подходящую пару координата-признак или комбинацию таких пар для эффективной классификации изображений.

2. Разработаны и реализованы алгоритмы эффективного построения агрегатов по модели DLA с помощью априорного анализа коэффициентов выбора как в плоском случае, так и в случае построения агрегатов на произвольной поверхности. Путем вычисления емкостной размерности и дивергенции Кульбака–Лейблера показано, что полученные с помощью модифицированного алгоритма агрегаты качественно близки к агрегатам, построенным по классической модели DLA. Дана теоретическая оценка вычислительной сложности предложенных алгоритмов. Программы для реализации классических алгоритмов запускались на компьютере с процессором Intel CoreDuo T2050 и объемом оперативной памяти 1.5GB. Время вычислений одного агрегата из 10000 частиц для плоского случая составило 37 мин. 43 сек.; время вычислений 10 агрегатов из 1000 частиц на поверхности составило 4 ч. 47 мин. 33 сек. Оптимизированные алгоритмы запускались на той же конфигурации оборудования. При этом время вычислений одного агрегата из 10000 частиц для плоского случая составило 1 мин. 8 сек.; время вычислений 10 агрегатов из 1000 частиц на поверхности составило 31 мин. 58 сек. В результате продемонстрировано уменьшение времени вычислений приблизительно в 40 раз для плоского случая и в 10 раз при моделировании на поверхности по сравнению с классическими алгоритмами.

3. Разработана и реализована модификация алгоритма Шелейховского–Брэгмана построения стационарного потока на графе путем разбиения изображения на подмножества, построения стационарного потока на каждом из подмножеств и объединения стационарных потоков в один общий поток. Приведена оценка потери точности вычислений на склеиваемых границах областей; оценено ее влияние на значение взвешенной энтропии, выступающее в качестве классифицирующего признака. Показана эффективность модифи-

цированного алгоритма для использования на многоядерных системах. Программа для реализации классического алгоритма запускалась на компьютере с процессором Intel CoreDuo T2050 и объемом оперативной памяти 1.5GB. Время вычислений составило 13 мин. 3 сек. Оптимизированный алгоритм запускался на той же конфигурации оборудования. Время вычислений составило 1 мин. 38 сек. В результате продемонстрировано уменьшение времени вычислений приблизительно в 10 раз.

4. Разработан и реализован комплекс программ для исследования и классификации изображений биомедицинских препаратов, который объединяет в себе методы статистического анализа с помощью вычисления характеристик Харалика второго порядка в координатах цветовых пространств RGB и HSV; методы имитационного моделирования структуры изображения путем построения агрегатов с помощью априорного анализа коэффициентов распределения для модели DLA; методы анализа с помощью построения стационарного потока на связанном с изображением графе.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Конференция “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития”, 2012, Одесса;
2. LXVI и LXVII Международные конференции “Герценовские чтения”. Секция “Актуальные информационные системы и технологии моделирования”, 2013 - 2014, РПГУ им. Герцена, Санкт-Петербург;
3. “Межвузовский конкурс-конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада”, 2013, СПбГПУ, Санкт-Петербург;
4. Восьмая международная конференция “Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики”, 2013, ВГУ, Воронеж;
5. Семинары “Информатика и компьютерные технологии”, доклады “Алгоритм анализа изображений, основанный на построении стационарного потока на графе” и “Разработка и реализация алгоритмов классификации изображений биомедицинских препаратов”, 2014–2015, СПИИРАН, Санкт-Петербург;
6. 9-th International Conference on Communications, Electromagnetics and Medical Applications (CEMA), 2014, Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria.



## Основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Работа изложена на 107 страницах машинописного текста, содержит 17 рисунков, 27 таблиц и список литературы из 102 наименований.

**Введение** содержит обзор современного состояния предметной области, обоснование актуальности диссертационной работы. Во введении сформулированы предмет и цели исследований, аргументирована научная новизна работы, представлены выносимые на защиту положения, приведена оценка их теоретической и практической значимости.

**Первые три главы** содержат описание алгоритмов, разработанных для реализации комплекса программ по исследованию и классификации биомедицинских изображений. **В четвертой главе** приведено описание особенностей реализации разработанного комплекса.

**Первая глава** содержит исследование метода классификации изображений с помощью статистических методов Харалика второго порядка с точки зрения его применимости для классификации изображений биомедицинского характера.

Для вычисления признаков Харалика второго порядка изображение представляется как решетка пикселей заданной интенсивности, по нему строятся четыре матрицы относительных частот расположения пикселей по направлениям 0, 45, 90 и 135 градусов. На основании матриц вычисляются 14 числовых характеристик, набор которых в дальнейшем может быть использован как вектор признаков для классификации изображений.

Рассмотрена применимость вычисления статистических характеристик Харалика второго порядка для задачи классификации изображений растворов серебра различной концентрации. Показано, что для предварительно приведенных к оттенкам серого изображениям растворов серебра ни один из вычисленных признаков не позволяет разделить изображения на группы в соответствии с их действительной классификацией.

Предложен и реализован метод использования координат цветовых пространств RGB и HSV в качестве входных данных для алгоритма классификации. Для исследуемых изображений растворов серебра различной концен-

трации показано, что предложенный автором метод при вычислении для координаты  $N$  признаков “суммарная энтропия” и “обратный момент” позволяет разделить их на группы, соответствующие действительной классификации изображений. Это дает возможность построить классификатор высокой точности, разделяющий изображения в соответствии с их действительными классами.

В результате проведенных в первой главе исследований можно утверждать, что выбор координаты для представления исходных изображений в различных цветовых пространствах, таких как RGB или HSV, может значительно влиять на результаты классификации.

**Вторая глава** посвящена исследованию использования диффузионной модели DLA (Diffusion Limited Aggregation) для описания изображений сложных процессов в системах различной природы, в том числе биологических.

Модель DLA описывает рост группы частиц, называемой агрегатом, при броуновском блуждании этих частиц по линиям координатной сетки. Предполагается, что частицы присоединяются к агрегату последовательно.

В главе приведено описание классической модели DLA, а также описание реализованных автором для ее компьютерного моделирования алгоритмов.

Автором предложен метод априорной оценки коэффициентов выбора для построения агрегата, аналогичного по своим характеристикам агрегату, построенному по классической модели DLA. При бросании частицы на координатную сетку вычисляются коэффициенты выбора для каждой из граничных точек агрегата. Показано, что эти оценки зависят только от суммы по координатным расстояниям между бросаемой частицей и граничной точкой агрегата по абсциссе ( $a$ ) и ординате ( $b$ ) и могут быть вычислены по формуле

$$P(a, b) = \frac{1}{4^{a+b}}. \quad (1)$$

После вычисления коэффициентов выбора для каждой из граничных точек агрегата строится функция распределения случайной величины присоединения частицы к граничным точкам агрегата, из области значений которой случайным образом выбирается значение. Преобраз этого значения и определяет, к какой точке агрегата присоединится частица.

Описаны особенности реализации предлагаемого алгоритма для построе-

ния компьютерной модели агрегата.

Полученные оценки алгоритмической сложности предлагаемого алгоритма сформулированы в виде следующего доказанного утверждения.

**Утверждение 1.** Пусть число ячеек в рассматриваемой области  $M$ , а число бросаемых частиц  $T$ . Тогда вычислительная сложность этапа подсчета предлагаемого алгоритма равна  $O(M)$ , а вычислительная сложность этапа бросания частиц равна  $O(T^2)$ . Размер используемой памяти пропорционален  $O(M)$  на этапе подсчета и является константой на этапе бросания частиц.

Показано, что предлагаемый автором алгоритм позволяет уменьшить время построения агрегатов из 10000 частиц в 40 раз по сравнению с классической версией алгоритма.

Сравнение емкостных размерностей агрегатов, построенных двумя способами, и вычисление дивергенции Кульбака–Лейблера между определяющими изображения агрегатов вероятностными мерами позволяют утверждать, что построенный в результате предложенного автором алгоритма агрегат по своим структурным особенностям близок к агрегату сопоставимой мощности, построенному по классическому алгоритму.

Приведено описание модели DLA для построения агрегатов на нерегулярной триангуляционной сетке, приближающей произвольную поверхность. Аналогично плоскому случаю, частицы блуждают по треугольникам триангуляции и присоединяются к агрегату последовательно. Основным отличием модели от плоского случая является неравновероятность перехода между треугольниками, зависящая от соотношения сторон. Приведено описание реализованных автором алгоритмов для компьютерного моделирования процесса DLA на триангуляционной сетке.

Автором предложена адаптация метода априорной оценки коэффициентов выбора для применения его к моделированию процесса DLA на триангуляционной сетке. Для этого введено понятие матрицы коэффициентов выбора и представлен эффективный алгоритм ее вычисления с помощью построения последовательности матриц  $G_k$ , каждая из которых содержит значения всех коэффициентов выбора для путей длины  $k$ . С помощью матрицы  $G$ ,

являющейся частичной суммой матриц  $G_k$  для некоторого  $N$ , определяются коэффициенты выбора для всех треугольников, входящих в границу агрегата. Их них аналогично плоскому случаю выбирается тот, к которому будет присоединена частица.

Описаны особенности реализации алгоритма для построения компьютерной модели агрегата на поверхности.

Полученные оценки вычислительной сложности сформулированы в виде следующего доказанного утверждения.

**Утверждение 2.** Пусть число треугольников в рассматриваемой триангуляции равно  $M$ , максимальная из рассматриваемых длин путей равна  $N$ , а число бросаемых частиц равно  $T$ . Тогда вычислительная сложность алгоритма построения матрицы  $G$  равна  $O(NM^2)$ , а вычислительная сложность этапа бросания частиц, как и в плоском случае, пропорциональна  $T^2$ . При этом размер используемой памяти на этапе построения матрицы  $G$  пропорционален  $M^2$ , а на этапе бросания частиц, как и в плоском случае, константен.

Показано, что предлагаемый автором алгоритм работает в 10-15 раз быстрее классического при построении последовательности из 10 агрегатов на поверхностях

$$\frac{x^2}{4} + \frac{y^2}{4} - z^2 = 1 \quad (2)$$

и

$$\frac{x^2}{4} + y^2 = 2z, \quad (3)$$

что позволяет эффективно решать задачу исследования динамики сложных систем.

**Третья глава** содержит описание способа классификации биомедицинских изображений с помощью их представления в виде ориентированного графа и построения стационарного потока на нем.

Описан способ интерпретации изображения в качестве ориентированного графа, при котором каждому пикселю изображения ставится в соответствие вершина графа. Вершины, соответствующие соседним в изображении пикселям, соединяются парой разнонаправленных дуг. Каждой дуге ставится в соответствие вес, равный значению интенсивности пикселя, соответствующего

вершине начала дуги, деленному на число исходящих из нее дуг. Полученный таким образом поток  $p_{ij}$  описывает начальное состояние некоторого процесса с помощью марковской цепи на нем.

Описан алгоритм построения стационарного потока  $u_{ij}$  на этом графе. Поток называется стационарным, если для соответствующей ему марковской цепи для каждой вершины сумма весов на входящих в нее ребрах равна сумме весов на исходящих. Для построения стационарного потока используется алгоритм балансировки Шеллейховского–Брэгмана. Вершины графа перебираются последовательно в порядке приоритетной очереди, приоритетом в которой является дисбаланс вершины  $q(n) = |\mu_{\text{out}}(n) - \mu_{\text{in}}(n)|$ , где  $\mu_{\text{out}}(n)$  — сумма мер исходящих из вершины дуг, а  $\mu_{\text{in}}(n)$  — сумма мер входящих. На каждом шаге для вершины  $n$  с максимальным приоритетом вычисляется коэффициент

$$\gamma = \sqrt{\frac{\mu_{\text{out}}(n)}{\mu_{\text{in}}(n)}}. \quad (4)$$

Меры всех дуг, исходящих из  $n$ , делятся на  $\gamma$ , меры всех дуг, входящих в  $n$ , умножаются на  $\gamma$ . После этого производится нормировка потока и пересчет значений в вершинах. Критерием остановки алгоритма является то, что дисбаланс всех вершин становится меньше некоторого заданного  $\varepsilon$ . При условии  $\varepsilon = 0$  мы получили бы стационарный поток, но вычисления ведутся с некоторой точностью  $\varepsilon > 0$ , поэтому в результате получится некоторое  $\varepsilon$ -приближенное решение. Соответствующий этому решению поток называют  $\varepsilon$ -стационарным. Описана реализация алгоритмов построения  $\varepsilon$ -стационарного потока.

Автором предложена модификация классического алгоритма построения  $\varepsilon$ -стационарного потока на графе для решения задачи анализа изображений путем разбиения изображения на пересекающиеся части, построения  $\varepsilon$ -стационарного потока на каждой из них и объединения полученных потоков в один общий.

Автором доказано следующее утверждение.

**Утверждение 3.** В результате вычислений по модифицированному алгоритму при объединении  $\varepsilon$ -стационарных распределений на частях на всем графе получается не более чем  $4\varepsilon$ -стационарное распределение.

Сравнительная оценка вычислительной сложности алгоритмов сформулирована в виде следующего доказанного утверждения.

**Утверждение 4.** При разбиении изображения на  $K$  частей сложность вычислений для модифицированного алгоритма меньше, чем сложность вычислений для базового в  $K$  раз.

Показано, что модифицированный алгоритм адаптирован для исполнения на компьютере с несколькими вычислительными ядрами.

Проведено исследование границ применимости модифицированного метода для классификации изображений тканей печени. В качестве классифицирующего значения взято вычисленное по построенному стационарному потоку  $u_{ij}$  значение взвешенной энтропии  $v$ , определяемое как

$$v = - \sum_{ij} u_{ij} \ln \left( \frac{p_{ij}}{u_{ij}} \right). \quad (5)$$

Показано, что для конкретной выборки изображений патологий тканей печени при  $K = 4$  точность классификации падает незначительно при общем повышении скорости работы в 10 раз. При этом при  $K = 16$  точность вычислений падает значительно, на 20%.

**Четвертая глава** содержит в себе описание особенностей реализации комплекса программ для анализа биомедицинских изображений с использованием предложенных в главах 1–3 новых алгоритмов.

**Заключение** содержит список основных результатов, полученных в работе.

**В приложении** представлены результаты вычисления статистических характеристик Харалика для полутоновых изображений альбома Бродаца и для изображений растворов серебра различной концентрации по координатно для цветовых палитр RGB и HSV.

## Заключение

В результате диссертационного исследования были выполнены все поставленные задачи и достигнута цель работы. Реализованный комплекс программ

может быть расширен новыми методами и алгоритмами исследования изображений. Все алгоритмы реализованы в виде отдельных библиотек, что позволяет использовать отдельные части комплекса и их произвольные комбинации как составляющие части для дальнейших исследований.

### **Публикация результатов.**

Результаты исследований отражены в работах 1–9. В статьях 1, 6 и 9 соискателю принадлежат формулировки, математические рассуждения, описания и реализации алгоритмов моделирования агрегации, ограниченной диффузией, на прямоугольной решетке и на триангуляционной сетке с помощью вычисления коэффициентов выбора, формулировки и доказательства связанных с этими алгоритмами утверждений, а также проведение и интерпретация результатов численных экспериментов. Соавтору в этих статьях принадлежат общая постановка задачи и методы проверки достоверности полученных результатов. Статьи 1–3 опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий.

#### **Публикации автора по теме диссертации**

##### **I. В журналах, рекомендованных ВАК**

1. Батюков А. М. Модифицированный алгоритм моделирования агрегации, ограниченной диффузией / А. М. Батюков, Н. Б. Ампилова. // Научно-Технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – №3(174). – С. 143-147. – ISSN 1994-2354.

2. Батюков А. М. Об алгоритмах моделирования процессов агрегации, ограниченной диффузией. / А. М. Батюков // Компьютерные инструменты в образовании. – СПб., 2014. – №3. – С. 3-8.

3. Батюков А. М. Анализ цифровых изображений, основанный на построении стационарного потока на графе. / А. М. Батюков // Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 10. Прикладная математика, информатика, процессы управления. – СПб., 2015. – №2. – С. 115-122. – ISSN 1811-9905.

## II. Другие публикации

4. Батюков А. М. Влияние цветовых характеристик изображений на классификацию по Харалику. / А. М. Батюков // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012». – Одесса: Куприенко, 2012. – Выпуск 3. Том 3. – С. 103-107. – ISSN 2224-0187.

5. Батюков А. М. Исследование модели процессов агрегации, ограниченной диффузией. / А. М. Батюков // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения - 2013. Материалы научной конференции, 15-20 апреля 2013г. – СПб.: Изд. РПГУ им. А. И. Герцена, 2013. – С. 233-238. – ISBN 987-5-8064-1812-9.

6. Батюков А. М. Оптимизация моделирования процесса DLA на прямоугольной решетке / А. М. Батюков, Н. Б. Ампилова // Технологии Microsoft в теории и практике программирования (Новые подходы к разработке программного обеспечения на примере технологий Microsoft и EMC): Материалы межвузовского конкурса-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 87-88.

7. Батюков А. М. Об одном методе анализа изображений / А. М. Батюков // Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Герценовские чтения - 2014. Материалы научной конференции, 14-18 апреля 2014г. – СПб.: Изд. РПГУ им. А. И. Герцена, 2014. – С. 206-209. – ISBN 987-5-8064-1960-7.

8. Батюков А. М. Классификация изображений биомедицинских препаратов адаптированным для параллельных вычислений алгоритмом построения стационарного потока. / А. М. Батюков // Сборник трудов Международной конференции “Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики”, – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – С. 39-43. – ISBN 978-5-9221-1608-4.

9. Batyukov A. M. On modelling of diffusion limited aggregation processes on triangulation net. / Batyukov A. M., Ampilova N. B. // Proceedings 9th International Conference on Communication, Electromagnetics and Medical Applications. – Sofia, Bulgaria, 2014. – P. 46-48. – ISSN 1314-2100.