

На правах рукописи



ВОРОНИН Александр Александрович

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГЛОБАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (технические системы)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
«Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
директор НИИ обработки аэрокосмических изображений РГРТУ
Еремеев Виктор Владимирович

Официальные оппоненты: **Бехтин Юрий Станиславович**
доктор технических наук, профессор кафедры
автоматики и информационных технологий в
управлении РГРТУ

Муртазов Андрей Константинович
кандидат технических наук, доцент, директор
астрономической обсерватории Рязанского государственного университета

Ведущая организация: **Научно-исследовательский центр
космической гидрометеорологии «Планета»,
г. Москва**

Защита состоится **26 июня 2013 года в 11 ч** на заседании диссертационного совета Д 212.211.01 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу:

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан 13 мая 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При дистанционном исследовании Земли важная роль отводится системам космической гидрометеорологии. Ориентированные на данную область спутниковые системы отличаются глобальностью наблюдения всей планеты или её значительной части и высокой периодичностью обновления многоспектральной информации. Главными объектами изучения являются облака, снежные и ледовые образования, поверхность океана, атмосферные явления, т.е. те процессы и объекты, которые во многом определяют среду обитания человека.

Всемирная метеорологическая организация явилась инициатором создания глобальной системы наблюдения Земли. Участниками этого планетарного проекта стали США, Россия, страны Евросоюза, Китай, Япония. На геостационарные орбиты, находящиеся в плоскости экватора, каждая из стран регулярно в заданное положение выводит гидрометеорологические спутники на высоту порядка 35 000 км. В этих условиях спутники «зависают» над определенными районами земного шара, где они с периодичностью 15-30 минут осуществляют съемку всего диска Земли в нескольких каналах видимого и теплового диапазонов спектра. Полученные изображения передаются на национальные центры приёма, где выполняется их обработка, а затем результаты обработки передаются на национальный спутник и осуществляется обмен информацией между различными странами. В результате каждые 15-30 минут страны, входящие во Всемирную метеорологическую организацию, получают данные со всей орбитальной группировки метеорологических геостационарных спутников.

Поскольку орбиты геостационарных спутников находятся в плоскости экватора, то недоступными для съемки являются районы полюсов, информация о которых для России очень важна. Поэтому в Федеральной космической программе РФ, помимо разработки геостационарных систем, предусмотрено создание систем с так называемыми высокоэллиптическими орбитами. Задачей последних является съемка приполюсных районов, недоступных для наблюдения с геостационарных спутников. Эти два класса систем принято называть системами глобального наблюдения Земли.

В создании гидрометеорологических систем глобального наблюдения Земли важная роль отводится наземным средствам обработки поступающей от них информации. При этом весь процесс ее обработки принято разделять на две стадии. На первой стадии осуществляется предварительная (часто называемая межотраслевой) обработка. Её задача состоит в геометрической и радиометрической коррекции изображений, их геодезической привязки и преобразовании снимков в общепринятые в мировой практике форматы представления. На второй стадии выполняется тематическая обработка откорректированных снимков в интересах решения той или иной задачи гидрометеорологии: получение карт облачных образований, снежной и ледовой обстановки, температурных изображений поверхности океана, схем зарождения и развития тропических циклонов, карт состояния атмосферы и др.

В диссертации представлены результаты многолетних исследований, выполненных по заказам Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» – головного предприятия Росгидромета в данной области.

Степень разработанности проблемы. В области создания космических гидрометеорологических систем наблюдения Земли на протяжении многих лет успешно работают известные фирмы России – это Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ряд региональных центров Росгидромета); это предприятия Роскосмоса – Корпорация «Российские космические системы» и входящий в нее Научный центр оперативного мониторинга Земли; Корпорация «ВНИИЭМ»; НПО им. С.А. Лавочкина; институт космических исследований РАН и многие другие институты РАН, вузы, предприятия ракетно-космической промышленности.

Одно перечисление известных российских и зарубежных ученых и специалистов, работающих в этой важной сфере человеческой деятельности, заняло бы многие страницы. Поэтому здесь разумно ограничиться лишь ссылкой на два весьма авторитетных периодических издания. Первое – это издание Института космических исследований РАН – материалы (тезисы и статьи) Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Второе – это издание Российской академии наук – журнал «Исследование Земли из космоса». Тематические направления этих изданий охватывают всю проблематику космической гидрометеорологии, исследования окружающей среды, изучения геологии, геофизики, природных ресурсов, атмосферы и ионосферы. Пожалуй, сегодня трудно назвать другие периодические издания, в которых так полно и глубоко освещается рассматриваемая область знаний.

Анализ доступных публикаций дает основание сделать ряд выводов, касающихся выбора в диссертации новых направлений исследований.

Первая группа вопросов связана с построением геометрических моделей для новых типов систем наблюдения Земли с геостационарных и высокоэллиптических орбит. Эти модели должны строго аналитически и адекватно описывать процессы формирования изображений в условиях орбитального движения спутника и служить основой для создания алгоритмов обработки видеоинформации.

Вторая группа вопросов касается создания алгоритмов и технологий высокоточной геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены на основе надежного выделения контурных точек диска Земли, который контрастно отображается на фоне окружающего космоса. Только системы глобального наблюдения Земли предоставляют такую возможность. К сожалению, бортовые навигационные средства не обеспечивают необходимую точность геодезической привязки наблюдаемых объектов, поскольку высота полета спутника превышает 35 000 км и любые неточности в определении его пространственного положения и угловой ориентации приводят к недопустимым ошибкам.

Третье направление исследований связано с решением проблемы полной автоматизации трудоемких процессов тематической обработки гидрометеорологической спутниковой информации. Это направление предполагает, во-первых, выполнить алгоритмизацию процессов предварительной и тематической обработки и, во-вторых, спроектировать на этой основе программно-аппаратные комплексы.

Все эти направления исследований составляют основное содержание диссертации.

Цель диссертации состоит в создании алгоритмов и технологий обработки информации от космических гидрометеорологических систем наблюдения Земли.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие основные задачи:

- проводится анализ принципов построения и функционирования российских и зарубежных систем глобального наблюдения Земли с точки зрения эффективного решения гидрометеорологических задач;
- рассматриваются геометрические модели и алгоритмы для новых типов устройств наблюдения Земли в составе гидрометеорологических систем, функционирующих на геостационарных и высокоэллиптических орбитах;
- разрабатываются алгоритмы высокоточной геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены на основе идентификации контурных точек диска Земли;
- создаются алгоритмы и информационные технологии формирования тематических продуктов в части решения типовых задач космической гидрометеорологии;
- исследуются подходы к построению современных программно-аппаратных комплексов обработки спутниковой гидрометеорологической информации.

Научная новизна диссертации во многом предопределяется тем, что создание гидрометеорологических космических систем глобального наблюдения Земли начато в России всего несколько лет назад. Первый удачный российский геостационарный спутник выведен на орбиту два года назад, в январе 2011 года. Планируется создание целой группировки подобных спутников, объединяются усилия ряда стран, входящих во Всемирную метеорологическую организацию. В этих системах используются принципиально новые средства глобального наблюдения Земли, основанные на двухкоординатном сканировании наблюдаемой сцены и получении разноспектральной информации. Все это требует создания новых моделей, алгоритмов и технологий обработки спутниковой гидрометеорологической информации.

Конкретно на защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- геометрические модели и алгоритмы формирования изображений космическими системами глобального наблюдения Земли с геостационарными и высокоэллиптическими орбитами;

- алгоритмы полиномиального приближения пространственного положения и угловой ориентации спутников, функционирующих на высокоэллиптических орбитах;
- помехозащищенный алгоритм идентификации на снимках граничных точек диска Земли с целью их использования для уточнения геодезических координат объектов наблюдаемой сцены;
- алгоритм и технология комплексной геометрической обработки изображений от систем глобального наблюдения Земли, основанные на аналитическом описании координатных преобразований в процессе сканирования земной поверхности;
- алгоритмы и информационные технологии формирования гидрометеорологических тематических продуктов по данным систем глобального наблюдения Земли.

Практическая ценность работы состоит в том, что на базе разработанных моделей, алгоритмов и информационных технологий созданы программно-аппаратные комплексы первичной и тематической обработки гидрометеорологической спутниковой информации – комплексы PlanetaMeteo, PlanetaGS и КП НИ. Эти комплексы находят эффективное применение в Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» для формирования гидрометеорологических продуктов по данным от космических систем Terra, Aqua, NOAA, Meteosat, «Электро-Л» и др.

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена в Рязанском государственном радиотехническом университете в рамках ОКР 12-08, ОКР 10-07 с НПО им. С.А. Лавочкина; ОКР 23-06 с Корпорацией «Российские космические системы»; ОКР 25-12, ОКР 43-11 с НИЦ «Планета».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 5 международных и 11 всероссийских научно-технических конференциях: международных конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (Рязань, 2001, 2002, 2005, 2008), «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 2003); всероссийских конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (Рязань, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007), «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2003, 2005 – 2 доклада, 2006).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ: 10 статей (3 статьи в изданиях по списку ВАК), 16 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст работы содержит 143 с., 53 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 15 с. и включает 138 наименований. В приложении приведены документы о практическом использовании результатов диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 выполнен анализ методов и средств мониторинга природной среды по данным космической съемки, изучены принципы построения космических систем глобального наблюдения Земли, рассмотрены базовые информационные технологии получения гидрометеорологических продуктов. Выполнен анализ состояния дел с развитием наземных средств обработки гидрометеорологической информации, определены основные направления по созданию высокоэффективных средств обработки информации с гидрометеорологических спутников.

В ходе выполненного анализа определены два класса гидрометеорологических систем глобального наблюдения Земли – геостационарные системы и системы с высокоэллиптическими орбитами. Показано, что в силу существенных различий в принципах их функционирования каждый из классов этих систем требует аналитического описания процессов получения изображений.

Так, геостационарные системы наблюдают одну и ту же часть земного диска, они практически неподвижны по отношению к планете. Для съемки земной поверхности в таких системах используются двухкоординатные устройства сканирования сцены. В результате сканирования неподвижного диска Земли формируются обычно три изображения в видимом диапазоне и 7 и более изображений в тепловом диапазоне спектра. Необходимо передать эти изображения на Землю, выполнить в течение 1-2 минут их коррекцию, результат обработки передать на спутник для ретрансляции на другие национальные центры. Характерной особенностью геостационарных систем является то, что они формируют снимки одной и той же поверхности Земли. Поэтому могут быть эффективно использованы методы геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены по контуру диска Земли и электронным картам береговых линий. Однако геостационарные системы не могут выполнить съемку приполюсных районов, в этом состоит их функциональная ограниченность.

Системы с высокоэллиптическими орбитами нацелены на съемку приполюсных районов, пролетая над ними на высоте около 40 000 км. В процессе съемки существенно изменяются параметры орбиты, скорость спутника и его угловая ориентация. Эти сложные процессы должны быть строго аналитически описаны с целью последующей коррекции изображений.

Выполнен анализ основных элементов информационных технологий получения тематических продуктов по данным от гидрометеорологических систем наблюдения Земли: карт облачности, нефанализа, ледовой обстановки, границ снега, температуры морской поверхности, интенсивности и направления ветров, анализа движения тропических циклонов, индекса растительности, паводковой обстановки, пожарной обстановки и др. На сегодняшний день эти трудоемкие процессы слабо автоматизированы. Большая доля работ приходится на операторов-гидрометеорологов. В результате среднее время формирования типового продукта составляет 2 часа и более. В связи с этим исследованы вопросы построения автоматизированных и полностью автоматических технологий получения гидрометеорологических продуктов стандартных уровней об-

работки, которые общеприняты в международной практике (уровни 1.0, 1.5, 2.0).

В целом по результатам анализа, выполненного в первой главе, определены два главных направления исследований по созданию высокоэффективных средств межотраслевой и тематической обработки гидрометеорологической спутниковой информации.

В рамках первого направления обоснована необходимость создания новых моделей, алгоритмов и информационных технологий общецелевой (предварительной) обработки изображений. Это обусловлено тем, что на системы глобального наблюдения Земли в последние годы устанавливаются принципиально новые конструкции устройств сканирования Земли, а сами системы функционируют на специфичных геостационарных и высокоэллиптических орбитах.

В рамках второго направления обоснована целесообразность создания алгоритмов и программных комплексов, призванных существенно повысить уровень автоматизации трудоемких процессов получения гидрометеорологических продуктов.

В главе 2 выполнена разработка алгоритмов и технологий предварительной обработки данных от гидрометеорологических космических систем наблюдения Земли: спроектированы геометрические модели формирования и обработки изображений, выполнено аналитическое описание процесса движения спутника по высокоэллиптическим орбитам, проведен анализ требований к точности измерений координат и углов ориентации спутника, разработаны алгоритмы и информационная технология геодезической привязки объектов наблюдаемой сцены на основе выделения и анализа границ диска Земли.

Получены геометрические модели формирования изображений космическими геостационарными системами и системами с высокоэллиптическими орбитами. С использованием типовой структуры сканирующего устройства с двухкоординатной разверткой (рис. 1) получены координатные соответствия между одноименными точками снимка и поверхности Земли.

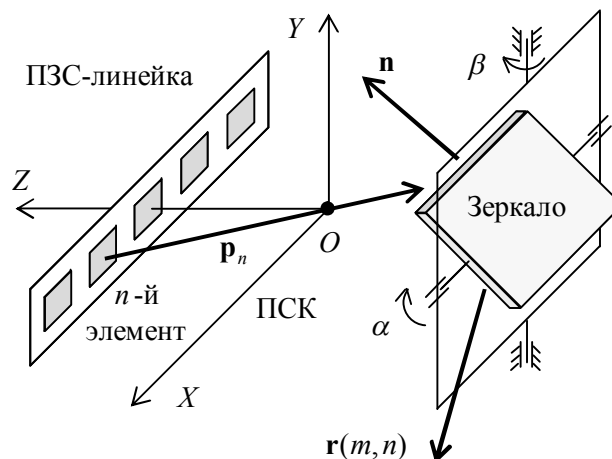


Рис.1. Геометрия сканирования датчика

Искомый направляющий вектор $\mathbf{r}$ визирующего луча определяется из уравнения:

$$\mathbf{r} = \mathbf{p} - 2(\mathbf{p} \mathbf{n}) \mathbf{n},$$

где $\mathbf{n} = (\cos \alpha_m, -\sin \beta_m \sin \alpha_m, \cos \beta_m \sin \alpha_m)^T$ - единичный вектор нормали к плоскости приборной системы координат (ПСК), $\mathbf{p}_n = -(x_n, y_n, z_n)^T$ - направляющий вектор луча, падающего на зеркало; (m, n) - номера элемента в строке и в столбце формируемого изображения. На рис. 1 представлена одна из ПЗС-линеек, установленная в фокальной плоскости датчика.

После этого для точки (m, n) определяются координаты направляющего луча в визирной системе координат (ВСК) $\mathbf{r}_e$, а затем в абсолютной инерциальной гринвичской системе координат (ИГСК) $\mathbf{r}_a$:

$$\mathbf{r}_e = \mathbf{M}_y \mathbf{r}, \quad \mathbf{r}_a = \mathbf{M}_o(t) \mathbf{r}_e,$$

где $\mathbf{M}_y$ - матрица установочных углов датчика, описывающая ориентацию ПСК по отношению к ВСК; $\mathbf{M}_o(t)$ - матрица ориентации ВСК относительно ИГСК на момент времени формирования точки изображения (m, n) $t = t_0 + \Delta_t m$, где t_0 и Δ_t - время формирования первой строки и период опроса линейки. Функция времени $\mathbf{M}_o(t)$ строится в результате фильтрации измерений углов ориентации ВСК от бортовых систем космического аппарата (КА). Вращение спутника вокруг оси представляется в виде изменения матрицы $\mathbf{M}_o(t)$.

Для нахождения координат точки на поверхности Земли осуществляется переход к гринвичской системе координат:

$$\mathbf{R}_e = \mathbf{M}_e \mathbf{R}_a(t), \quad \mathbf{r}_e = \mathbf{M}_e \mathbf{r}_a,$$

где $\mathbf{R}_a(t) = (X_a(t), Y_a(t), Z_a(t))^T$ - вектор положения КА как функция времени;

$$\mathbf{M}_e = \begin{pmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \xi = S_0 + \omega_3 (t - t_c), \quad S_0 - \text{звездное время в среднюю}$$

гринвичскую полночь, ω_3 - угловая скорость вращения Земли, t_c - поправка на часовой пояс.

После этого находятся координаты пересечения луча, проходящего через конец вектора $\mathbf{R}_e$ в направлении $\mathbf{r}_e$, с земным эллипсоидом из уравнения

$$X^2 / a_3^2 + Y^2 / a_3^2 + Z^2 / b_3^2 = 1, \quad (1)$$

где a_3, b_3 - экваториальный радиус и малая полуось земного эллипсоида. Запишем параметрическое относительно l уравнение визирующего луча:

$$\mathbf{P}(l) = \mathbf{R}_e + l \mathbf{r}_e. \quad (2)$$

При подстановке координат (1) в (2) получим квадратное уравнение относительно l . Подставляя его наименьшее положительное решение в (2), определяем координаты точки земной поверхности $\mathbf{P}_3 = (X_3, Y_3, Z_3)^T$.

С использованием прецизионного тест-объекта в виде прямоугольной пластины, содержащей 3600 окружностей, выполнено более 10 экспериментов путем сопоставления этого тест-объекта и его изображения. Установлено, что точность функционирования моделей координатного соответствия составляет не хуже 0,46 пикселя, что вполне достаточно для реализации процессов координатной обработки информации с геостационарных систем.

Изучены особенности съемки Земли с помощью космических аппаратов с высокоэллиптическими орбитами. Получены соотношения в виде степенных рядов, которые с заданной точностью аппроксимируют положение спутника, его угловую ориентацию и угловое изменение орбиты на рабочем участке съемки в приполярной области.

Выполнен анализ требований к необходимой точности измерения положения и угловой ориентации спутника применительно к системам глобального наблюдения Земли. Показано, что существующие средства и методы измерения этих параметров на сегодняшний день не обеспечивают заданную точность. В связи с этим разработаны алгоритм и технология геодезической привязки изображений на основе анализа контурных точек диска Земли. Для решения этой задачи предложен помехозащищенный алгоритм. Он основан на использовании в качестве индикатора границы прямоугольной апертуры, имеющей в направлении движения $2h$, а в поперечном направлении $2a$ элемента (рис. 2). Индикатором границы в центральной точке апертуры служит величина

$$g = \left| \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-h}^0 b_{ij} - \sum_{i=-a}^a \sum_{j=0}^h b_{ij} \right|. \quad (3)$$

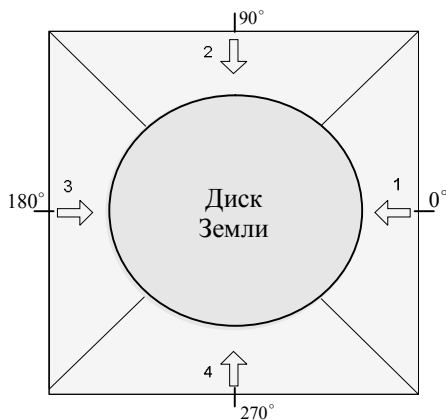


Рис. 2. Направления движения апертуры по изображению

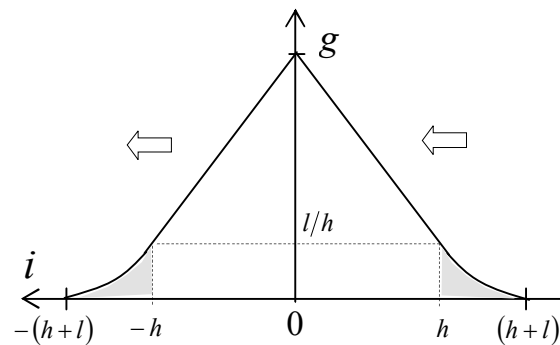


Рис. 3. Поведение индикатора на границе диска

Характер изменения индикатора при пересечении границы представлен на рис. 3. Чем больше a и h , тем больше фильтрующее действие индикатора g по отношению к шуму. В то же время параметр a неограниченно увеличивать

нельзя, так как растет методическая ошибка, обусловленная кривизной диска Земли. Поэтому в работе получены соотношения по обоснованному выбору a и h .

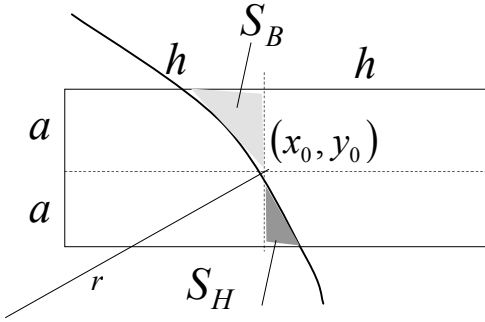


Рис. 4. «Наполнение» апертуры

Мерой ошибки принят интеграл

$$J = \int_{y_0-a}^{y_0+a} (x_0 - \sqrt{r^2 - y^2}) dy = S_B + S_H, \quad (4)$$

$$S_B = \int_{y_0}^{y_0+a} (x_0 - \sqrt{r^2 - y^2}) dy, \quad S_H = \int_{y_0-a}^{y_0} (x_0 - \sqrt{r^2 - y^2}) dy.$$

Физический смысл (4) ясен из рассмотрения рис. 4 и ошибка определяется соотношением между S_B и S_H . Интегрируя (4), получаем

$$J = 2a\gamma r^2 - \frac{r^2}{2} \left[(\xi + a) \sqrt{1 - (\xi + a)^2} - (\xi - a) \sqrt{1 - (\xi - a)^2} \right] - \frac{r^2}{2} [\arcsin(\xi + \alpha) - \arcsin(\xi - \alpha)], \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{a}{r}$, $\xi = \frac{y_0}{r}$, $\gamma = \frac{x_0}{r}$; $\alpha \ll 1$ (т.е. бесконечно мала), $\xi \in [-1, 1]$, $\gamma \in [-1, 1]$.

Заменяя дугу $x = \sqrt{r^2 - y^2}$ параболой $u = x_0 + A_1(y - y_0) + A_2(y - y_0)^2$, проходящей через три точки: $(x_H, y_0 - a)$, (x_0, y_0) и $(x_B, y_0 + a)$, где $x_H = \sqrt{r^2 - (y_0 - a)^2}$, $x_B = \sqrt{r^2 - (y_0 + a)^2}$, из системы $x_B = x_0 + A_1 a + A_2 a^2$, $x_H = x_0 - A_1 a + A_2 a^2$ получаем: $A_1 = (x_B - x_H)/(2a)$, $A_2 = (x_B + x_H - 2x_0)/(2a^2)$.

Поэтому $J^* = -\frac{\alpha r^2}{3} (2\gamma - \sqrt{1 - (\xi + \alpha)^2} - \sqrt{1 - (\xi - \alpha)^2})$. С учетом малости α :

$$\sqrt{1 - (\xi \pm \alpha)^2} = \gamma \mp \frac{\xi}{\gamma} \alpha - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{\xi^2}{\gamma^3} \right) \cdot \alpha^2 \quad \text{и}$$

$$J^* = \frac{1}{3} \frac{\alpha^3}{\gamma^3} r^2 = \frac{r^2}{3x_0^3} a^3. \quad (6)$$

Сопоставление J и J^* , определяемых формулами (4) и (6), показало, что для широкого диапазона изменения $a \in [50, 500]$ пикселей относительный по-

казатель $\frac{J - J^*}{J} \cdot 100\%$ не превосходит 0,5%, что говорит о высокой точности аппроксимации дуги окружности параболой.

Считая, что положение центральной вертикальной линии апертуры в момент перехода контура равновероятно в интервале $[0,5; 0,5]$, в качестве меры неопределенности (ошибки) может быть принято СКО $\sigma_\delta = 1/\sqrt{12}$. В этом слу-

чае разумно потребовать, чтобы $\frac{r^2 a^3}{3x_0^3} \leq 2a\sigma_\delta$, откуда $a \leq \frac{x_0}{r} \sqrt{\sqrt{3} x_0}$.

При дискретном характере изображения маловероятно попадание центральной линии апертуры на контур, возникает ошибка в определении ее координат. Исследованы несколько процедур уточнения до долей пикселя координат линии контура. Лучшие результаты дал алгоритм, основанный на оценке «центра тяжести»: $x = \left[\sum_{i=m-a}^{m+a} i g_i \right] / \sum_{i=m-a}^{m+a} g_i$. Разработана также процедура отбраковки ложно найденных точек контура. Она основана на свойстве связанности точек и их расположении на дуге окружности в пределах некоторой ограниченной зоны. Показано, что если не выполняются условия $\Delta x_{m-i} < |-i \cdot (m/x_m) - \Delta|$, $i = 1, 2, 3, \dots$, где Δ – некоторая величина, учитывающая дискретный характер измерений, то отсчеты x_m бракуются.

Оценка параметров эллипса выполняется следующим образом. Во-первых, контурные точки переносятся во вспомогательную плоскость: $\tilde{x}^2 + g \tilde{x} \tilde{y} + c \tilde{y}^2 + d \tilde{x} + e \tilde{y} + f = 0$, где g, c, d, e, f – параметры эллипса, которые определяют: его центр $\tilde{x}_u = (eg - 2cd)/(4c - g^2)$, $\tilde{y}_u = (dg - 2e)/(4c - g^2)$; угол поворота полуоси $\varphi = 0.5 \arctg(g/(1 - c))$ и полуоси $a_d = b_d = \sqrt{2(cd^2 + fg^2 + e^2 - edg - 4cf) / [(4c - g^2)(1 + c \pm \sqrt{(1 - c)^2 + g^2})]}$. Затем этот эллипс сопоставляется с идеальным эллипсом с центром $(0, 0)$, $a = a_3 \sqrt{X_c^2 b_3^2 + Y_c^2 b_3^2 + Z_c^2 a_3^2} / c$, $b = \sqrt{X_c^2 b_3^4 + Y_c^2 b_3^4 + Z_c^2 a_3^4} / c$, где (X_c, Y_c, Z_c) – координаты спутника; $c = \sqrt{X_c^2 b_3^2 + Y_c^2 b_3^2 + Z_c^2 a_3^2 - a_3^2 b_3^2}$; a_3, b_3 – экваториальный радиус и малая полуось земного эллипсоида. В результате формируются поправки к элементам геодезической привязки изображений.

Рассмотренный алгоритм сопоставлялся по точности и надежности выделения контурных точек линии с алгоритмом, основанным на анализе гистограммы изображения. Установлено, что число отбракованных точек в предложенном алгоритме уменьшается в 100-150 раз, а точность восстановления координат контура повышается в 2,7 раза.

В главе 3 рассмотрены алгоритмы и технологии информационной поддержки решения задач космической гидрометеорологии. Представлены алгоритмы и технологии получения гидрометеорологических карт по данным от отечественных и зарубежных систем глобального наблюдения Земли.

Выполнена разработка информационной технологии, которая позволяет объединить в единый цикл все этапы создания тематических карт, начиная от предварительной обработки и кончая получением гидрометеорологических продуктов. Эта технология предполагает выполнение следующих этапов. Вначале выполняется объединение сегментов изображений $\mathbf{B} = [b_i(m, n)]$, прошедших

первичную обработку: $b(m, n) = \bigcup_{i=1}^I b_i(m, n)$, $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$.

Далее объединенное изображение $b(m, n)$ виртуально совмещается с растровым изображением электронной карты: $d(m, n) = \rho \cdot b(m, n) + (1 - \rho) \cdot s(m, n)$,

где $\mathbf{D}=[d(m,n)]$ – результирующий растр, $\mathbf{S}=[s(m,n)]$ – растровое изображение электронной карты, $\rho \in [0,1]$ – коэффициент смешивания. Нанесение объектов и их раскраска реализуются с помощью двух матриц: $\mathbf{T}=[t(m,n)]$ определяет яркостную палитру, а $\mathbf{C}=[c(x,y)]$ набор объектов и их расположение. В результате формируется результирующий тематический слой $\mathbf{R}=[r(m,n)]$: $r(m,n) = k \cdot d(m,n) + (1-k) \cdot c(x + \Delta_m, y + \Delta_n)$, где $k \in [0,1]$ – коэффициент, определяющий смесь.

С использованием рассмотренных принципов выполнена разработка алгоритмов и технологий мониторинга снежной и ледовой обстановки, основанных на идее обработки многослойных изображений. Отличительной особенностью этой задачи является то, что при формировании тематического слоя используются не только текущие данные по границам снега, но и архивная информация за прошедшее время. В итоге строится карта, которая отражает динамику движения границ снега и льдов. Формально эта задача представлена вектором шести параметров $\mathbf{R} = (\mathbf{S}, \Psi, \beta, \Lambda, \nu, q)$, где $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_\beta\}$ – множество “полупрозрачных” значений из области определения $s(m,n)$; $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_\nu\}$ – множество значений, для которых не выполняется полупрозрачное наложение. Разумеется, $\Psi \cap \Lambda = \emptyset$; $q \in \{0,1\}$ – степень полупрозрачности. В результате $\mathbf{D} = \rho \cdot \mathbf{R} + (1 - \rho) \cdot \mathbf{S}$.

Выполнен анализ вариантов построения архива снежной и ледовой обстановки с точки зрения эффективности использования для решения рассматриваемой задачи. Первый вариант основан на распределенной структуре организации данных в виде множества $\mathbf{A} = \{\mathbf{T}_{d-1}, \mathbf{T}_{d-2}, \dots, \mathbf{T}_{d-p}\}$, где $\mathbf{T}_{d-p}$ – изображение за дату $(d-p)$. Второй вариант основан на последовательно временной структуре данных в виде множества $\mathbf{A} = \{\mathbf{T}_{\Sigma, d-1}, \mathbf{T}_{\Sigma, d-2}, \dots, \mathbf{T}_{\Sigma, d-x}, \dots, \mathbf{T}_{\Sigma, d-p}\}$, где $\mathbf{T}_{\Sigma, d-x} = \sum_{i=x}^p \alpha_i \mathbf{T}_{d-i}$ – мультивременные данные за p дат, начиная с $(d-x)$; $\alpha_i \in \{0,1\}$ – весовые коэффициенты многослойного изображения. Третий вариант основан на последовательно распределенной структуре данных $\mathbf{A} = \{\mathbf{T}_{d-1}^*, \mathbf{T}_{d-2}^*, \dots, \mathbf{T}_{d-x}^*, \dots, \mathbf{T}_{d-p}^*\}$, где $\mathbf{T}_{d-x}^* = \{\alpha_{d-x} \mathbf{T}_{d-x}, \alpha_{d-x-1} \mathbf{T}_{d-x-1}, \dots, \alpha_{d-p} \mathbf{T}_{d-p}\}$ – изображения за p дат, начиная с $(d-x)$. Анализ этих вариантов показал, что третий вариант построения архива объединяет в себе достоинства первых двух, но требует повышенного объема памяти. Однако с учетом характеристик современных вычислительных средств последнее замечание не является принципиальным.

Выполнена разработка многоцелевой геоинформационной системы формирования тематических продуктов по данным американского спутника NOAA. В рамках этой системы спроектировано единое информационное пространство представления входных, промежуточных и выходных данных, в ре-

зультате чего достигнуты высокая производительность, совместимость по форме выходных информационных продуктов и высокий уровень автоматизации.

В этой системе тематический слой на i -м шаге определяется матрицей $\mathbf{H}_i = [h_i(x, y)]$:

$$h_{i+1}(x, y) = \sum_{x=1}^{X_c} \sum_{y=1}^{X_c} k \cdot \mathbf{C}(x, y) + (1 - k) \cdot h_i(\Delta_x + x - 1, \Delta_y + y - 1),$$

где (Δ_x, Δ_y) - координаты смещения $\mathbf{C}$ относительно начала координат; $k = 0$ при $\mathbf{C}(x, y) = 0$; $k = 1$ при $\mathbf{C}(x, y) \neq 0$. Элементы итогового тематического изображения $\mathbf{P} = [p(x, y)]$ формируются путем логического суммирования элементов $\mathbf{D}$, $\mathbf{S}$ и элементов результирующей тематической матрицы $\mathbf{H}_i$.

Предложены алгоритмы и компьютерные технологии составления гидрометеорологических карт. Основной упор здесь сделан на процесс автоматизации интерпретации спутниковых изображений - это самый трудоемкий и трудноформализуемый этап. Применение для этих целей графического пакета Photoshop крайне затруднительно, поскольку он не дает возможности организовать сквозную технологию, начиная от первичной обработки изображения и заканчивая получением готовой карты. Но главная трудность - это отсутствие библиотек специальных условных обозначений и средств работы с ними. В связи с этим выполнена разработка алгоритмов и компьютерных технологий, нацеленных на парирование этих недостатков.

В главе 4 представлены результаты по практической реализации ряда программно-аппаратных комплексов и технологий обработки гидрометеорологической информации от российских и зарубежных систем глобального наблюдения Земли.

В главе 2 получены строгие аналитические описания процессов формирования и обработки данных от принципиально новых сканирующих устройств с двухкоординатной разверткой, которые устанавливаются на системы глобального наблюдения Земли, функционирующие на геостационарных и высокоэллиптических орбитах. В той же главе разработаны алгоритмы и технологии высокоточной геодезической привязки изображений по контуру диска Земли. В третьей главе созданы алгоритмы и технологии эффективной информационной поддержки решения задач гидрометеорологии. Все это создало научно-технические, методические и производственные предпосылки для проектирования ряда уникальных программно-аппаратных комплексов обработки информации с гидрометеорологических спутников.

Создано семейство комплексов, спроектированных по общей идеологии и на единой программно-аппаратной платформе. Функционально комплексы включают: систему приема и первичной обработки спутниковых данных, систему тематической обработки, систему архивации данных и обеспечения сетевого доступа к ним, систему управления и контроля за работоспособностью комплексов. На первой стадии комплексы обеспечивают решение в полном объеме задач межотраслевой (предварительной) обработки, а на второй стадии - автоматизацию решения ряда важных задач гидрометеорологии: получение

карт облачных образований, снежной и ледовой обстановки, температурных изображений поверхности океана, схем зарождения и развития тропических циклонов, карт состояния атмосферы, в том числе и их мультिवременной анализ.

До создания этих комплексов формирование тематических продуктов осуществлялось с большой долей ручного труда. Формирование типового тематического продукта занимало порядка 2 часов. Комплексы позволили автоматизировать ряд трудоемких процессов, в результате чего время создания типового тематического продукта составило порядка 15 минут, т.е. производительность труда повысилась в 8 раз. При этом широкий ряд продуктов стал выполняться без участия оператора, т.е. вместо 2 часов на каждый продукт затрачивается практически нулевое время.

В ходе трехлетнего использования геостационарной системы «Электро-Л» эксплуатирующей организацией установлено, что благодаря применению технологии уточнения геодезической привязки по контурным точкам Земли достигнуты точностные характеристики, определенные тактико-техническим заданием на эту систему:

- СКО абсолютной привязки подспутниковой точки составляет 3,7 км (в пересчете на поверхность Земли);
- СКО относительной привязки смежных изображений, сформированных с временным интервалом 15 минут в соседних сеансах связи, составляет 2,3 км;
- СКО геометрического совмещения всех спектральных каналов составляет 2,5 км.

Наиболее совершенными представителями являются комплексы PlanetaMeteo и PlanetaGS, которые нашли эффективное применение в НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» и сегодня широко используются для обработки и использования гидрометеорологической информации от космических систем Terra, Aqua, NOAA, Meteosat, «Электро-Л» в интересах российских потребителей и международного сотрудничества.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ принципов построения и функционирования наиболее передовых российских и зарубежных систем гидрометеорологического назначения. Выделены два класса подобных систем – геостационарные системы и системы с высокоэллиптическими орбитами. Показано, что в силу существенных различий в принципах их функционирования каждый из классов этих систем требует создания аналитических моделей и алгоритмов получения и обработки изображений. Определены главные направления исследований по созданию высокоэффективных средств межотраслевой и тематической обработки гидрометеорологической спутниковой информации.

2. Получены геометрические модели формирования изображений космическими геостационарными системами и системами с высокоэллиптическими орбитами. Эти модели устанавливают соответствие между координатами точек Земли и координатами одноименных точек на снимках. На достаточно большом

статистическом материале установлено, что точность моделей составляет не хуже 0,46 пикселя, что вполне достаточно для реализации процессов координатной обработки информации с геостационарных систем.

3. Изучены особенности съемки Земли с помощью космических аппаратов с высокоэллиптическими орбитами. Получены соотношения в виде степенных рядов, которые с заданной точностью аппроксимируют положение спутника на орбите, его угловую ориентацию и угловое изменение орбиты на рабочем участке съемки. Выполнен анализ требований к необходимой точности измерения параметров положения и угловой ориентации спутника применительно к характеристикам отечественных и зарубежных космических систем глобального наблюдения Земли. Показано, что существующие средства и методы измерения угловой ориентации спутника на сегодняшний день не обеспечивают необходимую точность. Обоснована необходимость создания технологии геодезической привязки изображений на основе анализа контурных точек диска Земли.

4. Предложен и исследован помехозащищенный алгоритм выделения на изображениях граничных точек диска Земли на фоне окружающего космоса. По отношению к известному алгоритму, основанному на анализе гистограммы, число отбракованных точек в предложенном алгоритме уменьшается в 100-150 раз, а точность восстановления координат контура повышается в 2,7 раза.

Разработан алгоритм расчета параметров геодезической привязки изображений на основе анализа границ диска Земли. В ходе трехлетнего функционирования геостационарной системы «Электро-Л» по оценкам эксплуатирующей организации достигнуты точностные характеристики, соответствующие тактико-техническому заданию на эту систему:

- СКО абсолютной привязки подспутниковой точки составляет 3,7 км (в пересчете на поверхность Земли);
- СКО относительной привязки смежных изображений, сформированных с временным интервалом 15 минут в соседних сеансах связи, составляет 2,3 км;
- СКО геометрического совмещения всех спектральных каналов составляет 2,5 км.

5. Разработаны алгоритмы и технологии получения карт облачных образований, мониторинга снежной и ледовой обстановки, формирования тематических продуктов по данным от космических систем глобального наблюдения Земли. Их отличительными особенностями являются объединение в единый технологический процесс процедур первичной и тематической обработки информации, а также их виртуализация. Созданные на этой основе системы построены по открытому принципу и могут быть сориентированы на новые космические аппараты и новые тематические задачи.

6. Предложены алгоритмы и компьютерные технологии автоматизации трудоемких процессов составления гидрометеорологических карт. Их отличительной особенностью является наличие специализированных средств интерактивного анализа спутниковой информации, которые позволяют существенно повысить эффективность работы оператора-метеоролога при создании тематических карт.

7. Разработаны принципы построения и функционирования комплексов тематической обработки информации от гидрометеорологических систем глобального наблюдения Земли: комплексы PlanetaMeteo и PlanetaGS. Функциональное наполнение этих комплексов построено на основе моделей и алгоритмов, разработанных в главе 2, а принципы построения – на основе базовых структурных решений, предложенных в главе 3. Эти комплексы позволили многократно сократить долю ручного труда. Если до их создания формирование типового продукта занимало порядка 2 часов, то с использованием комплексов – 15 минут, т.е. производительность труда повысилась в 8 раз. При этом широкий круг продуктов стал выполняться полностью без участия оператора, т.е. вместо 2 часов на каждый продукт стало затрачиваться практически нулевое время.

8. Комплексы PlanetaMeteo, PlanetaGS, КП НИ нашли эффективное применение в НИЦ космической гидрометеорологии «Планета» и сегодня широко используются в обработке гидрометеорологической информации в интересах российских потребителей и международного сотрудничества.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Воронин А.А., Кузнецов А.Е. Автоматизированная технология получения карт облачных и снежных образований. РГРТУ, Рязань, 2001. 15 с. Деп. в ВИМИ. Исходящий № ДО-8894 от 17.08.2001.

2. Воронин А.А., Кареев А.В. Автоматизированная технология получения карт ледовой обстановки по данным космической съемки // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2001. С. 215.

3. Воронин А.А., Федоткин Д.И. Интерактивные средства формирования тематических карт по спутниковым изображениям // Тез. докл. 6-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2001. С. 107.

4. Воронин А.А., Кареев А.В., Кузнецов А.Е. Геоинформационная система получения тематических карт по данным спутников NOAA // Новые информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2002. С. 22-30.

5. Воронин А.А. Интерактивные средства формирования карт эволюции границ снежных образований по спутниковым изображениям // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2002. С. 50.

6. Воронин А.А. Инструментальные средства интерактивного дешифрирования границ снега и облачных образований по спутниковым изображениям // Тез. докл. 7-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2002. С. 134.

7. Воронин А.А., Иоффе Г.М., Кровотынцев В.А. Инструментальные средства для дешифрирования по космическим снимкам облачной и ледовой обстановки // Тез. докл. всерос. конф. «Современные проблемы дистанционно-

го зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2003.

8. Воронин А.А., Елфаков Д.В., Кареев А.В. Технология интерпретации тепловых изображений // Тез. докл. 4-й междунар. науч.-техн. конф. «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». Рязань, 2003. С. 307–308.

9. Воронин А.А. Выделение линий равных температур по аэроснимку, полученному в инфракрасном спектральном диапазоне // Тез. докл. 8-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2003. С. 184.

10. Воронин А.А., Кузнецов А.Е. Технология создания тематических карт границ снежного покрова // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2004. С. 30-37.

11. Воронин А.А. Технология оценки баллов облачности по изображениям от геостационарных спутников // Тез. докл. 9-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2004. С. 175.

12. Воронин А.А., Кузнецов А.Е. Базовые технологии анализа и обработки информации датчика МСУ-МР КА «Метеор-М» // Тез. докл. всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2005.

13. Асмус В.В., Воронин А.А., Еремеев В.В. и др. Разработка автоматизированного комплекса приема, обработки и архивации данных геостационарных спутников в НИЦ «Планета» // Тез. докл. всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2005.

14. Воронин А.А., Кузнецов А.Е., Побаруев В.И. Технология построения анимационных изображений по мультивременным снимкам от геостационарных ИСЗ // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2005. С. 219.

15. Воронин А.А. Технология мультивременного анализа движения тропических циклонов по данным космической съемки // Тез. докл. 10-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2005. С. 118.

16. Асмус В.В., Воронин А.А., Еремеев В.В. и др. Разработка автоматизированного комплекса приема, обработки и архивации данных геостационарных спутников в НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Выпуск 3. Т.1. М.: Институт космических исследований РАН, 2006. С. 156–162.

17. Воронин А.А., Иоффе Г.М., Кузнецов А.Е., Милехин О.Е. Программное обеспечение рабочего места анализа движения тропических циклонов по данным космической съемки // Тез. докл. всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Институт космических исследований РАН, 2006.

18. Воронин А.А. Технология формирования многослойных карт границ снега на основе данных ИСЗ NOAA // Тез. докл. 11-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2006. С. 162.

19. Воронин А.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. и др. Программный комплекс тематической обработки информации от гидрометеорологических геостационарных КА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. науч. статей. Выпуск 4. Т.1. М.: Институт космических исследований РАН, 2007. С. 216–221.

20. Воронин А.А. Инструментальные средства анализа движения тропических циклонов по данным космической съемки // Тез. докл. 12-й всерос. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань: РГРТУ, 2007. С. 311.

21. Воронин А.А. Программный комплекс автоматической обработки данных от геостационарных спутников // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань: РГРТУ, 2008. Т.2. С. 108.

22. Бурцев М.А., Воронин А.А., Еремеев В.В. и др. Комплекс оперативной обработки гидрометеорологической спутниковой информации // Исследование Земли из космоса. 2009. №1. С. 16-23 (**издание по списку ВАК**).

23. Воронин А.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е. и др. Компьютерные технологии формирования гидрометеорологических карт по спутниковым изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2009. №4. С. 24-35 (**издание по списку ВАК**).

24. Воронин А.А., Егошкин Н.А., Еремеев В.В. и др. Геометрическая обработка данных от космических систем глобального наблюдения Земли // Вестник РГРТУ. Рязань, 2009. № 1. С. 12–17 (**издание по списку ВАК**).

25. Ветров А.А., Воронин А.А. Алгоритм построения карт движения тропических циклонов // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2010. С. 46-49.

26. Воронин А.А., Еремеев В.В., Шокол А.С. Помехозащищенный алгоритм выделения изображения диска Земли с целью оценки его геометрических параметров // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2012. С. 43-49.

Воронин Александр Александрович

**АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
ОТ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГЛОБАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бумага офисная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.