

На правах рукописи

ЗУЕВ ПЕТР ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ
КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

25.00.35 - геоинформатика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2005

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК)

Научный руководитель: академик РАН,
профессор Бондур В.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Чибуничев А.Г.
кандидат биологических наук
Мордвинцев И.Н.

Ведущая организация:

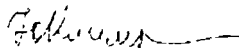
Всероссийский научно-исследовательский институт
Гражданской Обороны и Чрезвычайных Ситуаций

Защита состоится "2" июня 2005 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., д. 4, ауд. 321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Автореферат разослан "30" апреля 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Климков Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Активное развитие космических методов и средств дистанционного зондирования требует создания проблемно-ориентированных программных комплексов обработки больших объемов поступающих данных. При этом зачастую основная ценность космической информации, поступающей при мониторинге окружающей среды, заключается в возможности ее оперативного анализа

В настоящее время существует множество космических платформ, которые постоянно поставляют на Землю информацию в масштабе времени, близком к темпу ее поступления. Для решения ряда задач мониторинга Земли нет необходимости специально заказывать съемку определенной территории в конкретный период времени. Достаточно иметь приемное оборудование и набор программных средств для обработки поступающих данных. При соответствующем покрытии приемными станциями исследуемой территории появляется возможность осуществлять оперативный мониторинг, как в региональном, так и глобальном масштабах. Дистанционные наблюдения с космических средств за метеорологической и ледовой обстановкой, опасными природными и техногенными процессами позволяют охватить территории большой площади и требуют оперативной обработки больших объемов поступающих данных. К примеру, в случае проведения оперативного мониторинга пожаров с использованием данных с космических аппаратов серий NOAA, EOS и «Метеор» поток изображений, поступающих на одну наземную станцию приема, достигает 25 изображений в сутки (совокупный объем данных порядка 4.5 Гбайт). Для решения такой задачи для всей территории Российской Федерации требуется организация оперативного приема и обработки информации в 5-ти пунктах, то есть суммарный объем информации возрастает до 22.5 Гбайт в сутки.

В настоящее время существует ряд известных программных систем (ERDAS IMAGING, RSI ENVI, ER Mapper), реализующих методы и алгоритмы обработки космических изображений. Опыт работы с оперативными данными спутников «Метеор-3М», «Ресурс-01», NOAA, EOS (Terra, Aqua) и других свидетельствует о том, что с использованием существующих программных пакетов требуется достаточно длительное время для обработки и анализа всего потока получаемой информации. Несмотря на высокую эффективность современных средств дистанционного зондирования Земли, все преимущества космических систем мониторинга могут стать бесполезными, если информация о чрезвычайных ситуациях будет предоставляться со значительной временной задержкой. Недостаточно оценивать последствия катастроф, необходимо иметь возможность раннего оповещения о них для устранения или минимизации ущерба.

Анализ современных методов и программных средств обработки космической информации показывает, что реализованный в них инструментарий направлен, в основном, на работу с отдельными

изображениями или их фрагментами и не приспособлен к обработке большого потока данных, поступающих с систем оперативного мониторинга.

Таким образом, при создании средств автоматизированной обработки потоков космических изображений приходится разрабатывать специальные подходы, новые алгоритмы и программные модули, а также расширять функциональные возможности существующих программных систем. В этом случае основную роль начинают играть не возможности, потенциально предоставляемые существующими пакетами обработки, а новые методы и программные средства, обеспечивающие возможность оперативного анализа данных для решения задач оперативного космического мониторинга окружающей среды.

В связи с этим, выбранное направление исследования, связанное с созданием систем обработки потоков космических изображений, требующее выполнения оригинальных разработок, является актуальным.

Цель работы заключается в разработке новых методов, алгоритмов, программных комплексов тематической обработки и технологий межпрограммного взаимодействия для автоматизации процесса анализа потоков космических изображений, поступающих при проведении оперативного мониторинга окружающей среды.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- создание на основе существующего комплекса Shell-STAT нового программного пакета анализа потоков космических изображений Aspect-STAT;
- разработка алгоритмов и программ для автоматизации процесса обработки изображений при мониторинге прибрежных акваторий;
- разработка алгоритмов и программ для автоматизации геодинамического анализа сейсмоопасных территорий;
- создание на основе существующих алгоритмов программы автоматизированной обработки потоков космических изображений для оперативного мониторинга пожаров на территории России;
- разработка технологии и программной подсистемы взаимодействия модулей автоматической обработки потоков данных при мониторинге окружающей среды.

Методы исследований, применяемые в настоящей работе, основаны на современных методах дистанционного зондирования различных объектов и явлений окружающей среды, методах цифровой обработки космических изображений, на использовании теории вероятности и методов математической статистики, принципах создания открытых систем, методов алгоритмизации задач и оптимизации процессов вычислений, на результатах научных исследований отечественных и зарубежных ученых (В.Г. Бондура. А.Т Зверева. В.Б.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый подход к реализации метода дистанционной пространственно - частотной спектрометрии морских акваторий, заключающийся в автоматизации процесса обработки больших потоков изображений высокого разрешения, с применением метода скользящего окна с предустановленными параметрами гамма - контрастирования и различными видами фильтрации, позволивший сократить время обработки данных в 10-100 раз в зависимости от решаемой задачи.
- разработана методика автоматизированного линеamentного анализа космических изображений, основанная на применении процедур сканирования бинарного изображения линеamentов плавающим окном переменного размера и применении преобразования Радона, обеспечивающая оперативный геодинамический анализ сейсмоопасных территорий при мониторинге предвестников землетрясений:
- создана технология автоматизированной параллельной обработки космических изображений, поступающих с различных космических аппаратов на территориально разнесенные станции приема, основанная на использовании алгоритмов ESA и Enhanced MODIS Fire Detection Algorithm , позволившая решить задачу оперативного мониторинга лесных пожаров, угрожающих магистральным линиям электропередач на территории России;
- разработана программная система взаимодействия средств приема и программных модулей автоматизированной обработки потоков космических изображений, обеспечивающая возможность организации оперативного мониторинга окружающей среды с использованием различных космических аппаратов.

Практическая значимость работы. Разработки широко использовались в рабочем процессе ЦПАМ «Аэрокосмос» при реализации международных проектов по дистанционному мониторингу антропогенных воздействий на прибрежные акватории, мониторинге предвестников землетрясений дистанционными методами, при оперативном космическом мониторинге лесных пожаров, угрожающих линиям электропередач (ЛЭП) на территории Российской Федерации. Результаты работы использовались при разработке методических указаний по выполнению лабораторных работ по курсу «Основы аэрокосмического мониторинга окружающей среды» в учебном процессе Московского государственного университета геодезии и картографии.

Обоснованность и достоверность результатов работы обусловлена высоким соответствием данных, полученных с

использованием предложенных методов, алгоритмов и созданных программных средств автоматизированной обработки потоков космических данных, с данными, полученными с помощью существующих программных пакетов обработки, а также с информацией, полученной при подспутниковых измерениях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 58 -ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК (Москва, 2003); конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 225-летию МИИГАиК (Москва, 2004): международной конференции «Экология Сибири и Дальнего Востока» (Томск, 2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 2 - в центральных журналах.

Личный вклад автора заключается в разработке методов, алгоритмов и программ автоматизированной обработки больших потоков космической информации. На основе выполненных разработок был создан программный комплекс обработки космических изображений Aspect, модернизирован комплекс статистической обработки STAT и созданы комплексы программ автоматического оперативного анализа космической информации, предназначенные для мониторинга пожароопасной обстановки и предвестников землетрясений.

На защиту выносятся:

1. Методика автоматизированного вычисления полей пространственных спектров морского волнения и расчета статистических признаков спектров по космическим изображениям высокого разрешения, позволяющая ускорить в 10-100 раз, в зависимости от решаемой задачи, обработку данных при мониторинге прибрежных акваторий с использованием методологии дистанционной пространственно-частотной спектрометрии;
2. Метод оперативной автоматизированной обработки космических изображений морских акваторий высокого разрешения, обеспечивающий определение скорости и направления приповерхностного ветра по спектрам поверхностного волнения с высоким пространственным разрешением (до $100 \times 100 \text{ м}^2$);
3. Методика автоматизированного геодинамического анализа, основанная на расчете роз-диаграмм, плотности и градиентов плотности линейментов космических изображений при произвольном пороге, которая обеспечивает возможность оперативного мониторинга сейсмоопасных территорий, необходимого для прогноза землетрясений.
4. Технология автоматизированной параллельной обработки потоков данных с сенсоров AVHRR и MODIS, основанная на

алгоритмах ESA и Enhanced MODIS Fire Detection Algorithm, обеспечивающая оперативное обнаружение лесных пожаров и позволяющая осуществлять оперативный космический мониторинг пожаров на всей территории России с временным разрешением ~1 час.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 172 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа иллюстрирована 50 рисунками и 3 таблицами. Библиографический указатель включает 119 источников, из них 83 отечественных и 36 иностранных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы выбор темы, ее актуальность, сформулированы цели и методы исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ существующих программных средств обработки данных дистанционного зондирования Земли и средств разработки программных приложений. Подробно рассмотрены функциональные возможности таких известных пакетов, как ERDAS IMAGING, RSI ENVI, ER Mapper, ScanMagick и Image Processor. Произведено сравнение эффективности наиболее известных существующих программных пакетов обработки космической информации при решении задач дистанционного зондирования Земли и обоснован выбор средств обработки, реализующих предложенные в работе технологии анализа потоков данных.

Рассмотрены и проанализированы современные средства создания программных приложений. Проведен анализ современных компиляторов языков C, Pascal, Fortran с точки зрения оптимизации программного кода. Рассмотрены возможности пакета научных и инженерных вычислений MATLAB в задачах создания программ потоковой обработки космических изображений.

Показано, что существующие программные пакеты не приспособлены для решения задач обработки потоков космической информации, поступающей при оперативном мониторинге окружающей среды. Это обусловлено как сложностью проектирования дополнительных модулей к этим программам, так и стоимостью таких реализаций. Зачастую решить многие задачи оказывается эффективнее не с использованием готовых средств обработки космических изображений, а с помощью новых программных пакетов, наиболее отвечающих поставленным задачам оперативного космического мониторинга.

Преимущество такого подхода заключается как в экономической выгоде использования новых разработок, так и в возможности полного контроля процесса обработки и анализа, так как в этом случае код программы является полностью открытым для разработчика. Это позволяет оперативно дополнять созданные пакеты обработки потоков поступающих изображений дополнительными алгоритмами и модулями, необходимыми для решения широкого спектра конкретных задач космического мониторинга окружающей среды.

Во второй главе рассмотрены предложенные методики автоматизации обработки потоков космической информации.

Разработана методика автоматизированного построения полей спектров морского волнения по фрагментам космических изображений высокого пространственного разрешения и расчета информативных признаков этих спектров, которая основана на методологии дистанционной пространственно-частотной спектрометрии (ДПЧС), развитой академиком РАН В.Г. Бондуrom. При обработке серий космических изображений для решения задач мониторинга морей и океанов с применением методологии ДПЧС количество анализируемых фрагментов достигает сотен, а иногда, даже тысяч. При использовании существующих программных пакетов (к примеру, ERDAS Imaging, RSI ENVI) этап предварительной обработки такого количества фрагментов изображений может занять от нескольких часов до нескольких дней. Для автоматизации данного процесса была разработана методика оперативного пофрагментного анализа, суть которой заключается в построении поля пространственных спектров серий изображений методом скользящего окна с автоматическим гамма - контрастированием результатов обработки. Для этого процесс построения разбивается на отдельные этапы:

- настройка параметров фильтрации на примере одного фрагмента (установка параметра кривизны кривой гамма контрастирования);
- формирование из исходных изображений фрагментов заданного размера;
- расчет спектров мощности по сформированным фрагментам методом БПФ;
- автоматическое определение начальных точек кривой гамма-контрастирования по гистограмме значений спектра мощности;
- фильтрация полученных спектров мощности с установленными параметрами кривой гамма-контрастирования;
- переход к следующему изображению.

В этом случае оператор вручную строит единственный спектр в одном фрагменте и подбирает под него настраиваемые параметры фильтрации. Затем с использованием процедуры сканирования изображения скользящим окном, по параметрам фильтрации, введенным

оператором, в автоматическом режиме осуществляется построение поля пространственных спектров для всего набора фрагментов изображения. Если раньше оператор вручную вырезал из исходного изображения фрагмент, осуществлял процедуру БПФ, затем фильтровал полученный спектр мощности, и данный набор операций повторялся для всей площади исследуемого изображения, то с использованием предложенной методики оператор участвует только на начальном этапе построения поля спектров (обработка первого фрагмента и подбор параметров гамма - контрастирования). Это позволяет сократить время, необходимое для формирования поля пространственных спектров, в 10 - 100 раз (зависит от размеров исходного изображения и размеров фрагментов при решении различных задач).

Для полученных полей спектров происходит расчет их информативных признаков и классификация фрагментов. Информативные признаки позволяют определить многие значимые параметры морской среды: длину, период, высоту и энергию волн, структуру пенных образований, скорость и направление приповерхностного ветра.

Для оперативного дистанционного определения характеристик приповерхностного ветра разработана методика, основанная на методе определения скорости и направления ветра по координатам спектрального максимума ветрового волнения в спектре [Бондур В.Г., 2004]. Если на морской поверхности присутствует одна система волн, то направление ее распространения, как правило, совпадает с направлением ветра. Методика оценки скорости ветра связана с определением волнового числа максимума спектральной плотности k_{\max} для ветровых волн, получаемого по пространственным спектрам изображений. В этом случае зависимость скорости приповерхностного ветра и волнового числа максимума спектральной плотности определяется выражением [Бондур В.Г., 2004]:

$$W_e = \sqrt{(0,86g/k_{\max})} \text{ (м/с)}, \quad (1)$$

где: g- ускорение свободного падения.

Значение волнового числа максимума спектральной плотности k_{\max} определяется по формуле

$$k_{\max} = 2\pi \frac{1}{pm} \sqrt{\left(x_{k_{\max}} - \frac{m}{2}\right)^2 + \left(y_{k_{\max}} - \frac{m}{2}\right)^2}, \quad (2)$$

где: m- размер матрицы спектра по горизонтали (pix);

p- пространственное разрешение сенсора КА(м);

$(X_{k_{\max}}, Y_{k_{\max}})$ - координаты волнового числа максимума спектральной плотности в матрице спектра.

Направление приповерхностного ветра определяется по формуле:

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{x_{k \max}}{\sqrt{\left(x_{k \max} - \frac{m}{2}\right)^2 + \left(y_{k \max} - \frac{m}{2}\right)^2}} \right), \quad (3)$$

где: m - размер матрицы спектра по горизонтали (pix);

$(X_{k \max}, Y_{k \max})$ - координаты волнового числа максимума спектральной плотности в матрице спектра.

Методика построения поля скорости и направления ветра по спектрам космических изображений сводится к следующим этапам:

- оперативно рассчитываются спектры мощности фрагментов космических изображений с одновременной фильтрацией центральной части спектров (окном 3×3 пикселя);
- осуществляется медианная фильтрация спектров мощности большим окном 11×11 пикселей, что позволяет подавить все локальные максимумы в спектрах, кроме максимумов, относящихся к развитому ветровому волнению;
- определяются координаты спектральных максимумов в первой и второй четвертях матриц спектров мощности (выбирается максимальное значение);
- по формуле (2) рассчитываются волновые числа, соответствующие выделенным спектральным максимумам ветрового волнения;
- по приведенной выше формуле (1) рассчитываются скорости приповерхностного ветра;
- направления распространения приповерхностного ветра определяются из координат спектральных максимумов по формуле (3), при этом определяются только линии распространения ветровых волн, истинные направления ветра определяются из анализа исходных фрагментов.

Предложенная методика в случае использования космических изображений высокого пространственного разрешения позволяет получить данные о скоростях приповерхностного ветра на площадях от $100 \times 100 \text{ м}^2$ до $500 \times 500 \text{ м}^2$, в то время как современные космические средства (к примеру, спутник «Quikscat») обеспечивают формирование поля приповерхностного ветра лишь для участков поверхности океана размером $25 \times 25 \text{ км}^2$.

С использованием сформированного поля скоростей приповерхностного ветра можно рассчитать основные характеристики энергонесущих компонент развитого ветрового волнения. Для этого используется ряд эмпирических формул, позволяющих определить длины и высоты ветровых волн, среднюю энергию энергонесущих компонент ветровых волн.

Разработанная методика автоматизации процессов построения и анализа полей спектров морского волнения позволяет в 10-100 раз ускорить процесс обработки изображений высокого пространственного разрешения, а предложенная методика автоматизированного расчета скоростей ветра по спектрам космических изображений - обеспечить оперативное дистанционное определение этого важного метеорологического параметра в любом труднодоступном районе с высоким пространственным разрешением.

Для оперативного исследования сейсмоопасных территорий из космоса была разработана методика расчета плотностей линеаментов, градиентов плотностей линеаментов и роз-диаграмм направленности линеаментов, выделенных на космических изображениях. В качестве исходной информации рассматривались данные линеаментного анализа, полученные с помощью существующих программных пакетов LESSA.

Расчет плотностей и градиентов плотностей линеаментов осуществляется путем сканирования изображения линеаментов плавающими окнами с задаваемыми оператором размерами и коэффициентами перекрытия. Для расчета роз-диаграмм разработано два алгоритма. Первый основан на сравнении изображения с эталонными масками. При этом изображение поля линеаментов сканируется плавающим окном размером 5×5 с коэффициентом перекрытия 40%. При сканировании рассчитывается произведение матрицы исходного изображения и ряда предопределенных матриц H , отвечающих за соответствующие направление. Каждая предопределенная матрица является своего рода трафаретом для определенного направления α .

Причем в рассматриваемом фрагменте исходного изображения $B(x,y)$, на каждое направление имеется несколько предопределенных матриц H , характеризующих различные возможные расположения линеаментов. Для каждого окна определяется направление линеаментов в пределах границы данного окна. Дискретность определения направления линеаментов по этому алгоритму сравнима с дискретностью определения направления линеаментов по методике LESSA и составляет 22.5° . Совокупность направлений, рассчитанных для площади всего исследуемого изображения, формируется в файл, в котором каждому предопределенному значению направления соответствует количество отсчетов, попавших в это направление.

По данным из файла осуществляется представление результатов расчета в виде графика в полярных координатах, характеризующего совокупную роз-диаграмму линеаментов для всей территории исследуемого снимка.

Второй алгоритм построения роз-диаграмм линеаментов основан на использовании преобразования Радона:

$$R_{\theta}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta), x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta)) dy',$$

где

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (4)$$

С использованием этого преобразования вычислялась проекция матрицы изображения вдоль заданного направления на ось ординат для каждого значения угла поворота θ системы координат. При применении преобразования Радона к бинарному изображению линеаментов используется поворот системы координат от 0° до 359° с дискретностью 1° . Таким образом, задача определения наклона линеаментов на изображении сводится к нахождению координат локальных максимумов матрицы, полученной в результате преобразования Радона. После нахождения всех максимумов производится расчет роз-диаграммы, определяется суммарное число максимумов, приходящееся на каждое направление. На основании рассчитанных значений производится построение роз-диаграммы в полярных координатах при углах от 0° до 359° . Возможно построение роз-диаграмм с усреднением по заданному сектору, с произвольной дискретностью.

Отличительной особенностью предложенных алгоритмов является то, что они позволяют осуществлять анализ линеаментов, полученных любым способом (не только с помощью программы LESSA).

В главе приведено описание разработанного комплекса потоковой обработки космической информации для автоматического мониторинга пожаров.

Современный уровень развития техники не позволяет достичь одновременно требуемой высокой вероятности и точности определения координат лесных пожаров, охвата большой территории и малых интервалов времени между получением серий данных. Наиболее подходящими спутниками для целей глобального оперативного мониторинга лесных пожаров с точки зрения соотношения таких характеристик, как пространственное разрешение аппарата, зоны охвата территории, повторяемость пролетов над исследуемой территорией, являются полярно-орбитальные космические аппараты серии NOAA (прибор AVHRR) и серии EOS - TERRA. AQUA (прибор MODIS).

В рамках проекта по мониторингу пожаров, угрожающих магистральным ЛЭП и электрическим подстанциям системы РАО ЕЭС, была разработана программная подсистема автоматизированной параллельной обработки потоков космических изображений с сенсоров MODIS и AVHRR, предназначенная для обнаружения "Hot Spots"(точек, потенциально являющихся пожарами).

В качестве средств приема были использованы наземные антенные комплексы ЦПАМ «Аэрокосмос» для приема информации AVHRR и MODIS спутников серии EOS.

Блок обработки данных реализован на основе алгоритмов ESA(AVHRR) и Enhanced MODIS Fire detection Algorithm. Взаимодействие программ основано на использовании скриптов, созданных с помощью языка Perl, и специальных сервисных программ, обеспечивающих взаимодействие различных программных средств.

Прием спутниковых данных был организован в г. Москве (спутники NOAA, EOS), г. Иркутске (спутники EOS) и г. Красноярске (спутники NOAA). Таким образом, обеспечивалось полное покрытие заданных пожароопасных районов при проведения мониторинга.

Формат данных для предоставления результатов обработки космических изображений был единым для всех станций приема и для потребителей информации. После обработки полученных изображений на каждой из станций формировался файл (информационный пакет), упакованный в формате zip и содержащий следующие файлы:

- растровый файл синтезированного изображения пролета в формате JPG;
- файл географической привязки для синтезированного изображения JGW;
- растровый файл информации об облачной обстановке в формате BMP;
- файл географической привязки для информации об облачности BPW;
- полигональный шейп-файл с информацией о пожарах с соответствующей атрибутивной таблицей (SHP,SHX,DBF);
- шейп-файл (полилиния) с трассой пролета спутникового аппарата(SHP,SHX,DBF).

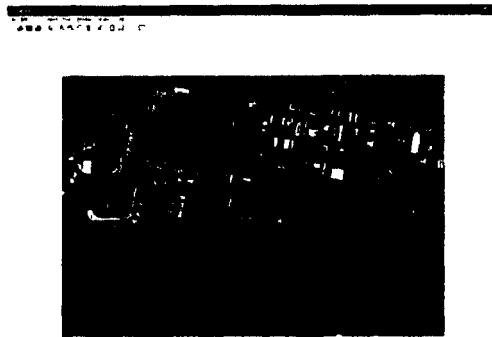
Сформированный информационный пакет передается на FTP-сервер. Время обработки и предоставления информации потребителям в среднем равно: для данных AVHRR ~30 мин. а для данных MODIS ~ 40 мин.

В третьей главе представлены описания разработанных программных пакетов анализа космических изображений, реализующих методики, описанные в главе 2. Результатом проделанной работы по исследованию алгоритмов тематической обработки изображений стало создание специализированных программных пакетов, предназначенных для обработки космических изображений - Aspect - STAT, являющихся логическим развитием существовавших ранее пакетов SHELL-STAT. Перед началом работы по созданию программного пакета Aspect - STAT был проведен анализ исходных кодов существующего пакета обработки изображений SHELL-STAT. Задачей исследования являлось сохранение функциональных возможностей предыдущей версии пакета с введением в программы новых модулей и функций, обеспечивающих проведение оперативной потоковой обработки космических изображений.

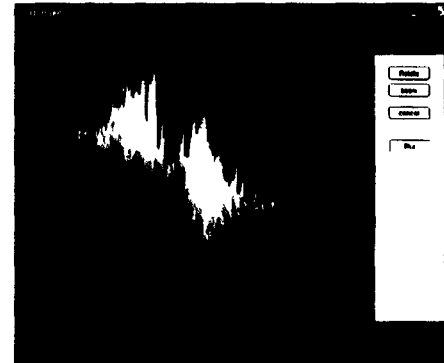
Программный пакет Aspect, предназначенный для предварительной и тематической обработки космических изображений, был разработан в среде MATLAB. Выбор данной среды для разработки позволил перейти от операционной системы MS-DOS (версия SHELL) к операционным системам семейства Microsoft Windows (95,98,XP) и Unix, что позволяет говорить о пакете Aspect как о кроссплатформенной системе. При создании пакета Aspect были полностью переработаны пользовательские интерфейсы программного пакета, что позволило существенно упростить и ускорить работу в программном пакете, а также дополнить существующие модули новыми способами вывода и информации для последующей оценки пользователем. Схема взаимодействия программных интерфейсов этой программной системы представлена на рис.1. По сравнению с предыдущей версией (SHELL), было расширено число признаков формируемых в файлах рабочих выборок, что позволило отказаться от необходимости использования дополнительной сервисной программы. В программный пакет были встроены новые модули тематической обработки космических изображений, реализующих методологию ДПЧС, и модули линеаментного анализа. Кроме того, в пакете Aspect были сохранены все модули из пакета SHELL (модули предварительной обработки изображений, трансформирования изображений, расчета информативных признаков изображений, визуализации изображений). Возможности пакета Aspect по обработке потоков изображений с использованием методологии ДПЧС, линеаментного анализа открывают широкие перспективы для применения разработанного пакета при оперативном космическом мониторинге окружающей среды.

Программный пакет STAT был разработан в среде Borland C Builder. При создании пакета широко использовались исходные коды предыдущей версии пакета SHELL-STAT. Операционной системой для функционирования нового программного пакета являются операционные

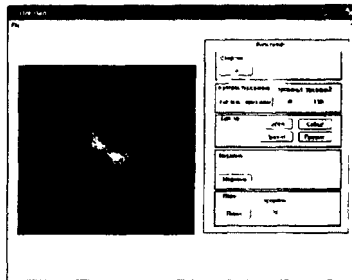
**Окно визуализации загруженных изображений
(Модуль визуализации изображений)**



**Окно построения трехмерной поверхности
(Модуль визуализации изображений)**



**Окно фильтрации изображений
(Модуль предварительной обработки)**



**Окно расчета характеристик ветрового волнения
(Модуль тематической обработки спектров морского волнения)**

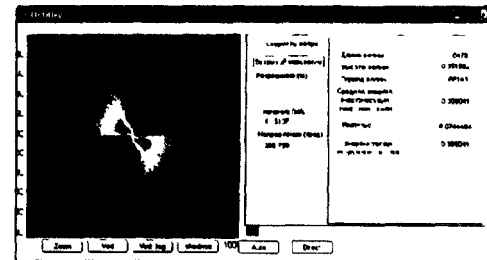


Рис. 1. Пример пользовательских интерфейсов программы обработки изображений Aspect

системы семейства Microsoft Windows (95,98,XP). Основная работа при создании сводилась к изменению визуального представления пользовательских интерфейсов и расширению числа одновременно анализируемых признаков. В функциональные блоки данного программного продукта были внесены изменения, позволяющие более наглядно, по сравнению с предыдущей версией, визуализировать результаты обработки рабочих выборок, созданных на основе информативных признаков изображений. Кроме того, в пакете STAT было расширено число одновременно анализируемых признаков и записей, что позволило расширить возможности комплекса по оперативной классификации космических изображений. В этом пакете были сохранены все модули, присутствующие в предыдущей версии пакета (расчета статистики, аппроксимации стандартными распределениями, построения гистограммы, оценки n-мерной плотности распределения, классификации), однако существенно увеличилась скорость обработки данных.

При обработке потоков космических изображений должны использоваться оба пакета (Aspect и STAT). В пакете Aspect происходит предварительная, тематическая обработка изображений и потоковая обработка данных. Результатом работы пакета Aspect являются изображения (подвергнутые обработке), растровые и векторные изображения графиков, построенные по результатам обработки, и наборы информативных признаков в формате ASCII. Наборы этих признаков, в свою очередь, являются входными данными для работы пакета STAT, который осуществляет расчет статистики и классификацию изображений. Выходными данными пакета STAT являются файлы отчетов формата DOC (Microsoft Word Document), содержащие информацию о проведенных расчетах в пакете STAT и результаты классификации изображений по рабочим выборкам.

В четвертой главе рассмотрено практическое применение созданного программного комплекса обработки космических изображений Aspect-STAT для решения различных задач, связанных с мониторингом окружающей среды, а также продемонстрированы результаты работы комплекса обработки потоков космических изображений при проведении оперативного мониторинга пожаров, угрожающих ЛЭП.

Использование созданного программного комплекса при решении задач автоматизации обработки космических изображений морской поверхности по методологии ДПЧС доказало высокую эффективность разработанных алгоритмов и программных модулей. С использованием созданных программных комплексов осуществлялись исследования в рамках международного эксперимента по дистанционному мониторингу антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий (RASP). Целью проводимых исследований являлось получение

информации о площадях и направлениях распространения загрязнений, вызванных сбросом сточных вод в океан после переработки на водоочистных сооружениях. В качестве объекта исследования была выбрана акватория Тихого океана вблизи о. Санд, бухта Мамала (о. Оаху, г. Гонолулу, Гавайи, США). В ходе проекта по разработанной автором методике осуществлялась обработка панхроматических спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, полученных с космических аппаратов Ikonos-2 и QuickBird. В процессе обработки происходила разбивка космических изображений, полученных со спутника Ikonos-2, на отдельные фрагменты. Размеры фрагментов выбирались, исходя из необходимости получения объемов выборок, достаточных для достижения требуемой статистической точности оценки пространственных спектров, а также для обеспечения необходимого пространственного разрешения при оценке пространственно-геометрических характеристик возмущений морской поверхности, вызванных антропогенным воздействием. При обработке выбранных фрагментов с помощью программного комплекса Aspect-Stat были построены поля пространственных спектров и проведена классификация полученных фрагментов. С помощью модуля расчета скорости приповерхностного ветра, реализованного в программе Aspect, была произведена обработка изображений, результаты которой, в качестве примера, представлены на рис 2.

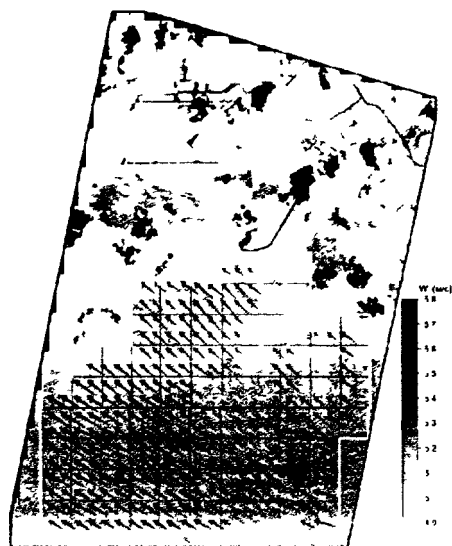


Рис 2 Поле направлений и скоростей ветра, построенное по результатам обработки пространственных спектров волнения в программе Aspect (о.Оаху, Гонолулу, Гавайи США)

Применение модуля линейamentного анализа, разработанного при создании программного пакета Aspect для анализа геодинамических предвестников землетрясений, позволило достоверно интерпретировать информацию, полученную методами традиционного линейamentного анализа космических изображений (рис.3.). Методика была реализована в международном проекте (ERPS) на примере оперативного мониторинга сейсмоопасности территории Калифорнии (США). При выполнении этого проекта с использованием программного комплекса Aspect и программы LESSA была произведена обработка потоков изображений, полученных со спутника TERRA (аппаратуры MODIS) для территории Южной Калифорнии (спектральный диапазон -620 - 670 нм, пространственное разрешение - 250 м). Для обработки были использованы серии изображений, полученные для районов свершившихся и ожидаемых сейсмических событий. Изображения экспортировались в программный пакет LESSA, при помощи которого был проведен линейamentный анализ выбранных фрагментов изображений сейсмоопасного региона.

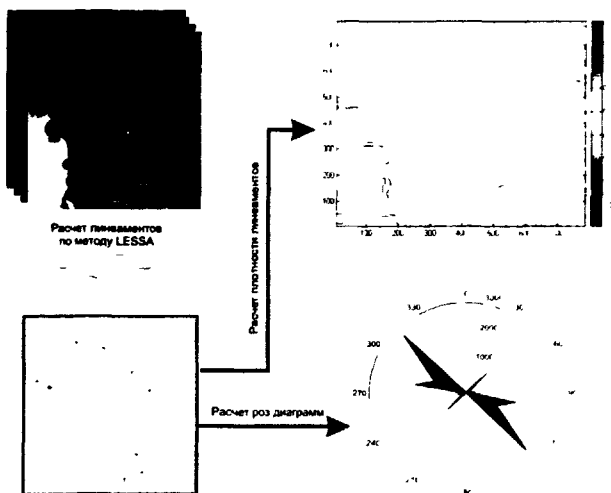


Рис.3. Роз-диаграмма и плотность линейamentов, полученные в результате обработки бинарного изображения линейamentов с помощью модуля линейamentного анализа

Затем, с помощью тематического блока анализа линейamentов, реализованного в программе Aspect, строились роз - диаграммы, характеризующие совокупное направление линейamentов на изображениях. Всего было обработано более 100 изображений MODIS на 5 районов свершившихся сейсмических событий в Калифорнии (землетрясения магнитудой от 4.2 до 6.5). Для каждого района исследовались линейamentы.

полученные с разными порогами. Общее число обработанных фрагментов составило -2000 бинарных изображений линеаментов. На основании анализа полученных роз-диаграмм было выявлено изменение формы роз-диаграмм в периоды времени, предшествующие сейсмическим событиям, что подтверждает гипотезу, высказанную В.Г. Бондуrom и А.Т. Зверевым, о возможности использования данных линеаментного анализа для прогноза землетрясений.

Система оперативного космического мониторинга пожаров является примером применения системы обработки потоков космических изображений. Данные, полученные в процессе мониторинга, использовались для предотвращения чрезвычайных ситуаций на магистральных ЛЭП и электрических подстанциях РАО ЕЭС. Совместное использование данных аппаратуры MODIS и AVHRR дало возможность улучшить качество мониторинга лесных пожаров. Это позволило существенно уменьшить уровень аварийности и затрат на ремонт. Мониторинг пожаров осуществлялся с использованием четырех станций приема космической информации (двух станции приема в г. Москва, одной - в г. Иркутск и одной - в г. Красноярск), принимающих информацию с 6 спутниковых аппаратов (NOAA-12, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, TERRA и AQUA), это позволило обеспечить возможность круглосуточного автоматического мониторинга пожарной обстановки практически на всей территории России, с интервалом получения информации ~1 час. Космические изображения, полученные в ходе мониторинга, и результаты их обработки могут быть использованы для дальнейшего изучения и создания новых алгоритмов автоматизированного обнаружения пожаров по космическим изображениям.

В среднем за каждый месяц работы поток изображений составлял:

- данные MODIS (TERRA, AQUA) (г. Москва) ~230 информационных пакетов;
- данные MODIS (TERRA, AQUA) (г. Иркутск) ~360 информационных пакетов;
- данные AVHRR (NOAA) (г. Москва) ~300 информационных пакетов;
- данные AVHRR (NOAA) (г. Красноярск) ~160 информационных пакетов.

В перспективе, в случае увеличения исследуемой территории, этот комплекс может быть легко расширен за счет подключения дополнительных станций приема и обработки информации.

Мониторинг осуществлялся в течение периода весна-лето-осень

2004 г. (с 1 апреля по 1 ноября). В процессе мониторинга за этот период времени было обнаружено **~25000** пожаров. На основании данных, содержащихся в информационных пакетах, с помощью средств ГИС осуществлялось прогнозирование ситуации при обнаружении лесных пожаров, угрожающих ЛЭП системы РАО ЕЭС.

Основные результаты исследований:

1. Разработана методика автоматизации процесса обработки космических изображений морской поверхности по методологии дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, основанная на анализе изображений высокого разрешения скользящим окном с автоматическим подбором коэффициентов гамма - контрастирования, позволяющая за счет использования автоматизированных процедур фрагментирования и фильтрации увеличить в 10-100 раз (в зависимости от решаемой задачи) скорость предварительной обработки данных по методу ДПЧС.

2. Разработана методика автоматизации обработки потоков космических изображений при мониторинге сейсмоопасных территорий, основанная на формировании и анализе бинарных изображений полей линеаментов путем расчета плотности, градиента плотности линеаментов (с применением метода плавающего окна) и роз-диаграмм линеаментов (путем расчета с использованием предопределенных масок и применением преобразования Радона), обеспечивающая выделение геодинамических предвестников землетрясений.

3. Создан программный модуль автоматизированного расчета полей скоростей и направлений приповерхностного ветра по пространственно-частотным спектрам изображений морской поверхности, основанный на автоматическом расчете максимумов спектральной плотности, позволяющий получать информацию о параметрах приповерхностного ветра с разрешением от **100×100 м²**, что в 250 раз лучше, чем с существующих космических средств.

4. На основе существующих пакетов обработки космических изображений Shell-Stat создан специализированный программный пакет Aspect-Stat, функционирующий в операционных системах Microsoft Windows, отличающийся новыми возможностями вывода информации, современными пользовательскими интерфейсами и увеличением числа одновременно обрабатываемых информативных признаков в 2 раза, а числа записей на каждый признак - в 100 раз.

5. На основании разработанных методик и программных модулей автоматизации процессов обработки потоков космических изображений расширены функциональные возможности программного пакета Aspect-Stat путем использования дополнительных блоков автоматизированной тематической обработки космических изображений морских акваторий

и автоматизированного геодинамического анализа сейсмоопасных территорий, что позволило увеличить эффективность мониторинга окружающей среды.

6. На основе существующих многоканальных алгоритмов поиска пожаров по космическим изображениям - порогового ESA и контекстуального Enhanced MODIS Fire Detection Algorithm, созданы программы оперативной автоматизированной обработки потоков космических изображений с представлением результатов обработки в формате ГИС, обеспечивающие автоматический анализ суммарного потока информации до 35 изображений в сутки, которые использовались при оперативном космическом мониторинге пожаров в районах буферных зон магистральных ЛЭП на территории России.. За период мониторинга (с апреля по ноябрь 2004 г.) было обработано около 5000 изображений и обнаружено порядка 25000 пожаров.

7. Разработана подсистема взаимодействия программных средств приема и тематической обработки потоков космических изображений, основанная на использовании дополнительных программ для передачи потоков данных между рабочими станциями приема и рабочими станциями обработки информации, обеспечивающая автоматизацию процессов анализа и преобразования результатов обработки при оперативном мониторинге окружающей среды.

8. С помощью разработанных программ для геодинамического анализа сейсмоопасных территорий осуществлена обработка около 2000 бинарных изображений линеаментов на территорию Калифорнии (США), позволившая обнаружить изменение вида обобщенных роздиаграммы линеаментов с разным порогом выраженности в периоды времени, предшествующие сейсмическим событиям (с магнитудой >4.0) и подтвердить гипотезу о возможности использования линеаментов в качестве предвестника при космическом мониторинге землетрясений.

Публикации по теме диссертации

1. Батуева Е.В., Базаров А.В., Дарижапов Д.Д., Гришаев М.В., Зуев В.В., Зуев П.В., Смирнов С.В. Комплексные измерения в Бурятии общего содержания и вертикального распределения двуоксида азота и спектральной УФ-облученности // Оптика атмосферы и океана. - Т. 14. - 2001.- № 12.- С.1153-1156.

2. Зуев П.В. Создание комплексов программного обеспечения приема и обработки аэрокосмических данных дистанционного зондирования Земли // Современные достижения в исследованиях окружающей среды и экологии (Сборник научных статей, посвященных памяти академика В.Е. Зуева). -Томск: СГТУ. 2004. - С. 112-114.

3. Бондур В.Г., Зуев П.В. Технология пространственно-спектральной обработки космических изображений морской поверхности высокой информационной емкости методом сканирующего окна //

Известия вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2003. - Вып. 1. - С. 131-134.

4. Zuev P., Vorobjev V. Software Complex SHELL-STAT designed for the estimation of data of remote sensing of marine shelf zones // Окружающая среда и экология Сибири, Дальнего Востока и Арктики (Материалы II Международной конференции (EESFEA-2003), посвященной памяти академика РАН В.Е. Зуева). - Томск: Международный исследовательский центр по физике окружающей среды и экологии ТНЦ СО РАН, 2004. - С. 146-147.

5. Zuev P., Vorobjev V. Study of statistical characteristics of ocean-atmosphere boundary according to the data of incoherent impulse sensing. // Окружающая среда и экология Сибири. Дальнего Востока и Арктики (Материалы II Международной конференции (EESFEA-2003), посвященной памяти академика РАН В.Е. Зуева). - Томск: Международный исследовательский центр по физике окружающей среды и экологии ТНЦ СО РАН, 2004. - С. 147-149.

25.00

Подписано в печать 27.04.2005. Гарнитура Таймс
Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,5
Тираж 80 экз. Заказ №74 Цена договорная

УПП «Репрография» МИИГАиК
105064, Москва, Гороховский пер., 45

19 МАЯ 2005

51