

На правах рукописи

УДК 528.8

Уваров Иван Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ЛОКАЛЬНО-АДАПТИВНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ
СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ
ТИПОВ ЗЕМНОГО ПОКРОВА**

25.00.34 - Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Научный руководитель: Доктор технических наук
Барталев Сергей Александрович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук
Воронков Владимир Николаевич

Кандидат технических наук
Евстратова Лариса Геннадьевна

Ведущая организация:

Государственное учреждение «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2010 года в 12 час. на заседании диссертационного совета Д.212.143.01 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г. Москва, К-64, Гороховский пер., 4 (ауд. 321).

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

Автореферат разослан «___» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Краснопевцев Б.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Распознавание типов земного покрова на основе данных спутниковых измерений их спектрально-отражательных характеристик представляет собой одну из фундаментальных задач дистанционного зондирования. Получаемая по данным дистанционных наблюдений пространственная информация о типах земного покрова позволяет создавать тематические цифровые карты и базы данных, необходимые, в частности, для оптимального управления территориями, организации рационального природопользования, охраны окружающей среды, проведения фундаментальных исследований в области наук о Земле.

В настоящее время в мире находят широкое использование методы и технологии обработки данных дистанционного зондирования для создания карт земного покрова различных по пространственному охвату административно-политических или природно-географических образований. Сравнительно недавно, в конце 1990-х годов, было положено начало интенсивным разработкам методов спутникового картографирования земного покрова на уровне отдельных континентов и всей планеты. Однако в силу сложности задачи реальные успехи в этом направлении к настоящему времени достигнуты лишь в нескольких крупных научно-исследовательских центрах мира.

К особенностям спутникового картографирования земного покрова на глобальном и континентальном уровнях можно отнести сильное и, как правило, возрастающее по мере расширения охвата территории проявление неоднородности спектрально-отражательных и других физических характеристик семантически однотипных объектов. Увеличение такого рода неоднородности при обработке спутниковых изображений может проявляться в повышении вариабельности значений используемых признаков распознавания. В ряде случаев также возникает необходимость модификации множества признаков распознавания с учетом региональных различий их информативности. На практике учет указанной неоднородности при глобальном спутниковом картографировании часто фактически сводится к разработке и последующему объединению набора региональных информационных продуктов. Такой подход сопряжен с необходимостью привлечения большого количества региональных экспертов и затрудняет возможность

использования унифицированных технологий обработки спутниковых данных, а, следовательно, и получения устойчиво повторяемых результатов.

Для обеспечения возможности спутникового мониторинга земного покрова на континентальном и глобальном уровнях необходимо создание технологий, отличающихся высокой степенью автоматизации и использованием унифицированных алгоритмов распознавания на основе базы опорных данных, отражающих региональную изменчивость спектрально-отражательных характеристик различных типов земного покрова.

Цель и задачи исследований. Выполненные в рамках диссертационной работы исследования и разработки были направлены на построение эффективной автоматизированной технологии распознавания типов земного покрова по данным спутниковых наблюдений и создания на ее основе карты растительности России.

Достижение вышеуказанной цели потребовало решения ряда научно-исследовательских задач, в частности, таких как:

- анализ и экспериментальная апробация существующих подходов к распознаванию по данным дистанционного зондирования типов земного покрова для решения задач его глобального спутникового картографирования;
- разработка алгоритма локализованной оценки спектрально-отражательных характеристик (сигнатур) типов земного покрова на основе пространственно нерегулярной опорной выборки;
- разработка метода локально-адаптивной обучаемой классификации в многомерном пространстве признаков с целью распознавания типов земного покрова по спутниковым данным;
- разработка и экспериментальная апробация программного комплекса автоматического распознавания типов земного покрова по спутниковым данным;
- создание карты растительности России на основе разработанной технологии распознавания типов земного покрова и данных спектрорадиометра MODIS;
- анализ эффективности разработанной технологии обработки спутниковых данных и валидация полученной на ее основе карты растительности России;
- разработка информационной системы TerraNorte для обеспечения доступа к результатам спутникового мониторинга земного покрова.

Методы исследований. В работе использованы методы контроля состояния природной среды с помощью оптико-электронных систем дистанционного зондирования, методы распознавания образов и обработки изображений, математического моделирования, математической статистики, геоинформатики, системного и прикладного программирования.

Научная новизна работы. В диссертационной работе впервые предложен метод и разработана автоматизированная технология локально-адаптивной классификации спутниковых данных для распознавания типов земного покрова. Метод предусматривает, в частности, использование предложенного автором оригинального алгоритма локализованной оценки сигнатур различных типов земного покрова на основе пространственно нерегулярной опорной выборки. Разработанная автором автоматизированная технология позволяет унифицировано создавать континентальные и глобальные карты земного покрова, что обеспечивает высокий уровень повторяемости результатов при обработке временных серий спутниковых данных. Разработанная технология позволила создать новую карту растительности России на основе спутниковых данных спектрорадиометра MODIS.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

- метод распознавания типов земного покрова на основе локализованных опорных сигнатур классов и локально-адаптивной классификации спутниковых данных для решения задач континентального и глобального картографирования;
- автоматизированная технология локально-адаптивной классификации спутниковых данных для распознавания типов земного покрова;
- созданная на основе разработанной технологии и спутниковых данных спектрорадиометра MODIS новая карта растительности России;
- информационная система TerraNorte для обеспечения доступа к результатам спутникового мониторинга земного покрова.

Все основные результаты получены автором лично.

Практическая значимость. Полученные автором результаты нашли использование при создании действующих систем спутникового мониторинга лесов и сельскохозяйственных земель, выполнении научно-исследовательских и прикладных проектов. На основе разработанной автором технологии и данных спектрорадиометра MODIS создана карта растительности России, активно используемая в составе

Информационной системы дистанционного мониторинга лесов Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) и Системы дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса (СДМЗ АПК). Разработанная автором информационная система TerraNorte насчитывает в настоящее время около 300 зарегистрированных пользователей и активно используется для моделирования биогеохимических циклов, оценки биологического разнообразия и исследований динамики биосферы в условиях глобальных изменений климата.

Апробация. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на 17 международных и российских симпозиумах, конференциях и семинарах в Москве, Санкт-Петербурге, Сыктывкаре, Красноярске, а также в Великобритании (Лейстер), Германии (Йена), Словакии (Братислава), Эстонии (Тарту).

Публикации. По результатам исследований и разработок опубликовано 22 печатные работы по теме диссертации в российских и зарубежных научных изданиях, сборниках докладов симпозиумов и конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 128 страниц, включая 41 рисунок и 9 таблиц.

При подготовке диссертационной работы большую поддержку автору оказал его научный руководитель – заведующий лабораторией ИКИ РАН д.т.н. С.А. Барталев. Автор также выражает искреннюю признательность д.т.н. Лупяну Е.А., к.т.н. Егорову В.А., к.т.н. Ершову Д.В., Беловой Е.И., Плотникову Д.Е., а также всем коллегам отдела технологий спутникового мониторинга ИКИ РАН, оказавшим помощь в исследованиях и разработках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы основные цели и задачи исследований, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

Глава 1. Задачи и методы распознавания типов земного покрова по данным дистанционного зондирования со спутников

Спутниковое тематическое картографирование земного покрова являются важнейшим инструментом получения актуальных и объективных данных для решения различных прикладных задач и проведения фундаментальных исследований.

Методология глобального картографирования земного покрова на основе спутниковых данных имеет уже достаточно продолжительную историю развития в качестве научного направления. Первый полномасштабный опыт такого рода картографирования, относящийся к проекту IGBP-DISCover, основывался на использовании данных радиометра AVHRR. Обработка спутниковых данных методом неконтролируемой классификации на уровне континентов с последующей экспертной идентификацией спектрально-временных кластеров позволила создать в 1997 году глобальную карту земного покрова с пространственным разрешением около 1 км. Легенда карты включает 17 классов, характеризующих 14 типов растительных ассоциаций. В последующие годы был разработан ряд карт земного покрова, охватывающих, в частности, природные биомы, континенты (Африка, Южная Америка) или крупные географические регионы (Северная Евразия, Юго-Восточная Азия). Разработку этих карт отличает охват столь больших по площади и природно-географическому разнообразию территорий, что их спутниковое картографирование требует использования подходов, методологически близких к тем, что применяются при создании глобальных продуктов.

Очевидно, что требования к методам обработки спутниковых данных для картографирования земного покрова по мере перехода от локального уровня к глобальному существенно меняются. При создании карт относительно небольших территорий в большинстве случаев используются стандартные алгоритмы классификации, изначально разработанные применительно к данным, не имеющим значительного пространственного охвата. Тем не менее, применение таких алгоритмов на локальном уровне часто позволяет получать приемлемые результаты без дополнительных методических приемов, таких как, например, стратификация территории и настройка алгоритмов на однородные по заданным условиям области. Это объясняется тем, что при классификации изображения небольшой территории можно принять условие постоянства множества классов и их априорной вероятности,

а также параметров распределения признаков распознавания. С увеличением территории возможность принятия этих допущений снижается, что приводит к необходимости разработки адекватных механизмов учета в алгоритмах классификации факторов географической изменчивости элементов множества допустимых классов и характерных для них значений признаков распознавания.

Предложены различные подходы к учету географической изменчивости при глобальном картографировании земного покрова по спутниковым данным. Проект Globcover использует данные Envisat-MERIS и предусматривает стратификацию суши планеты на 22 региона (страты), отличающиеся биоклиматической однородностью, а также относительно низкими внутриклассовыми и повышенными межклассовыми различиями спектрально-яркостных признаков. Достоинством подхода является более высокий уровень точности классификации, выполняемой отдельно для каждой страты. К недостаткам метода следует отнести часто проявляющуюся на границах между стратами несогласованность результатов классификации.

Картографирование растительности Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation в рамках проекта GLC2000 предусматривало учет географической изменчивости спектрально-отражательных характеристик одноименных объектов за счет классификации методом последовательной семантической декомпозиции. Выполненный на первом этапе кластерный анализ разносезонных изображений с получением большого числа спектрально-временных кластеров и первичная их интерпретация с присвоением им однозначных или комплексных наименований (в зависимости от уровня интерпретируемости) позволила сформировать начальный набор семантических кластеров. Получившие комплексные наименования кластеры являлись объектом дальнейшей декомпозиции с использованием доступных признаков и алгоритмов (пороговые процедуры, управляемая классификация или кластерный анализ). Целью декомпозиции являлось получение набора однозначно интерпретируемых семантических кластеров для последующего объединения в тематические классы. Основным недостатком такого подхода является высокий уровень зависимости результатов от экспертной идентификации кластеров, что ограничивает возможности получения повторяемых результатов. Вместе с тем карту отличает высокий уровень точности и тематической детальности (легенда включает 27 классов), что обеспечило ее широкое использование.

Согласно данным карты GLC2000, более 93% территории России покрыто растительностью. Характерной особенностью растительности, определяющей ее спектрально-отражательные свойства, является наличие хлорофилла. Поглощая солнечную радиацию в видимом диапазоне, прежде всего, в красном участке спектра, фотосинтезирующие органы растений отражают преимущественно ИК излучение. Этим обусловлен интерес исследователей в области картографирования земного покрова к системам ДЗЗ, осуществляющим съемку в видимом и ИК диапазонах.

В силу влияния облаков, теней и снега значительная часть спутниковых данных является непригодной для распознавания земного покрова. Вместе с тем, наличие систем, позволяющих проводить ежедневные наблюдения поверхности, позволило разработать эффективные методы очистки изображений от влияния указанных мешающих факторов. Результатом такой обработки данных являются композитные изображения, построенные по наблюдениям за заданный период времени – от нескольких дней до нескольких месяцев.

Анализ характеристик современных систем ДЗЗ, включая пространственное разрешение, частоту наблюдений и режима доступа к данным, указывает, в частности, на целесообразность использования для решения задач континентального и глобального картографирования растительности данных радиометра MODIS.

Обзор алгоритмов классификации типов земного покрова по спутниковым данным позволяет выделить параметрический подход, позволяющий оценивать параметры распределения признаков распознавания на основе опорной выборки как наилучшим образом соответствующий требованиям локальной адаптивности.

Для оценки качества результатов классификации в работе предложено использование метода оптимума Парето, определяющего детальность тематической карты с помощью величин ошибок первого и второго рода, а также обеспечивающего наглядное сравнение качества карт как между собой, так и по отношению к эталону, учитывая при этом различия в их пространственном разрешении.

Глава 2. Исследование возможностей использования данных спутникового спектрометрического радиометра MODIS для распознавания типов земного покрова

Разработанная в ИКИ РАН технология предварительной обработки спутниковых данных MODIS позволяет формировать очищенные от влияния мешающих факторов

(снежный покров, облака, тени, аппаратные шумы) композитные изображения. В основу выполненных в диссертационной работе исследований положено использование ежемесячных композитных изображений вегетационного периода (май-сентябрь) и интегрального изображения зимнего сезона (декабрь-февраль). При этом композитные изображения Северной Евразии были сформированы для трех спектральных диапазонов: 0.620-0.670 мкм, 0.841-0.876 мкм и 1.628-1.652 мкм.

Использование композитных изображений позволило провести на трех выбранных в различных климатических зонах тестовых участках оценку возможностей распознавания типов земного покрова по спектрально-временным отражательным характеристикам. Наличие репрезентативной выборки эталонных объектов, сформированной с использованием объективных источников, позволило получить статистические описания классов в многомерном пространстве спектральных яркостей (рис. 1).

Для оценки разделимости типов земного покрова был использован критерий дивергенции. Полученные значения дивергенции свидетельствуют о высоком уровне разделимости большинства выбранных классов. Вместе с тем, значения критерия для таких пар классов, как темнохвойный и светлохвойный леса, кустарниковая и травянистая тундра, свидетельствуют об их частичной разделимости в заданном пространстве признаков.

Оценка пространственной изменчивости спектральных яркостей типов земного покрова проводилось с использованием регулярной сети с шагом 25 км, в узлах которой вычислялись локализованные сигнатуры классов. Полученные оценки показывают, что широтный градиент сомкнутости полога лиственных лесов обуславливает рост величины яркости в красном диапазоне спектра на 85% в направлении с юга на север России. Высокие уровни вариабельности характерны также для темнохвойных и некоторых других типов леса. Различия яркости участков болот в ближнем ИК-диапазоне достигают 51%.

Необходимость учета пространственной изменчивости спектральных характеристик классов подтверждается и результатами классификации данных MODIS с использованием региональных и глобальных спектральных сигнатур. Для оценки точности классификации определялась доля верно распознанных эталонов. Использование региональных сигнатур обеспечило более точную классификацию,

чем использование глобальных сигнатур, полученных по эталонам для всей территории России. Доля верно распознанных эталонов при использовании региональных сигнатур в среднем выше на 20%. В некоторых случаях данный показатель отличается в несколько раз (хвойный листопадный лес – 73% и 9%, болота – 72% и 26%).

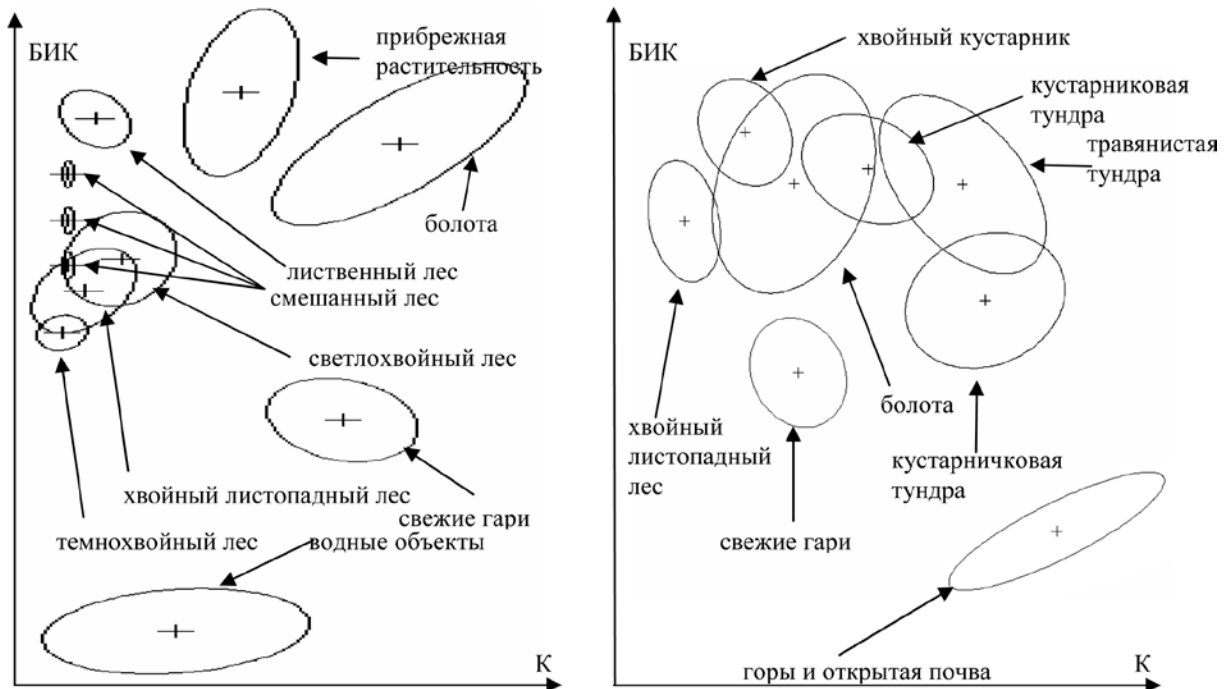


Рис. 1. Сигнатуры типов земного покрова в пространстве яркостей красного (К) и ближнего ИК (БИК) диапазонов для тестовых участков в Ханты-Мансийском АО (слева) и Республике Якутия (справа)

Глава 3. Метод локально-адаптивной обучаемой классификации и его использование для картографирования растительности России

В основу разработанного алгоритма классификации (рис. 2) положено формирование для заданной территории пространственно распределенного набора спектральных сигнатур на основе совокупности эталонных объектов опорной выборки с известной принадлежностью к одному из классов некоторого множества. Алгоритм классификации исходит из предположения нормального распределения признаков распознавания, получаемые оценки параметров которого формируют сигнатуры классов. Сигнатура каждого k -го класса включает в себя параметры вектора средних значений U_k и ковариационной матрицы Σ_k признаков. В качестве источников данных для формирования обучающей выборки часто выступают

существующие карты, данные наземных обследований или результаты экспертной интерпретации спутниковых изображений. Пространственное распределение локализованных сигнатур описывается заданием их значений в узлах $G(p; q)$ регулярной прямоугольной сети с шагом d , где p и q – порядковые номера узлов по осям x и y соответственно (рис. 3). Обучение классификатора направлено на оценку в узлах $G(p; q)$ параметров сигнатур $U_k(p; q)$ и $\Sigma_k(p; q)$ для каждого k -го класса.

Первоначально для каждого узла $G(p; q)$ на основе расположенных в границах ближайшей клетки эталонных пикселей вычисляются следующие величины:

$S_k^i(p; q)$ – сумма значений i -го признака k -го класса;

$C_k^{i,j}(p; q)$ – сумма произведений значений i -го и j -го признаков k -го класса;

$N_k(p; q)$ – количество эталонных пикселей k -го класса.

Указанные величины используются для оценки элементов $Cov_k^{i,j}(p; q)$ ковариационной матрицы $\Sigma_k(p; q)$ на основе следующего выражения:

$$Cov_k^{i,j}(p; q) = \frac{C_k^{i,j}(p; q)}{N_k(p; q)} - \frac{S_k^i(p; q)}{N_k(p; q)} \frac{S_k^j(p; q)}{N_k(p; q)} \quad (1)$$

Оценка элементов $Cov_k^{i,j}(p; q)$ ковариационной матрицы и средних значений признаков на основе $S_k^i(p; q)$ и $N_k(p; q)$ позволяет получить параметры сигнатур $U_k(p; q)$ и $\Sigma_k(p; q)$.

Как видно из рисунка 3, исходная обучающая выборка имеет пространственно неравномерное распределение. При этом в случае отсутствия эталонных пикселей k -го класса в окрестности узла $G(p_0; q_0)$ вычисление параметров $U_k(p_0; q_0)$ и $\Sigma_k(p_0; q_0)$ оказывается невозможным. Кроме того, при малых значениях $N_k(p_0; q_0)$ возрастает влияние случайных ошибок в обучающей выборке. Для учета этого фактора метод предусматривает задание порога репрезентативности T , характеризующего минимально допустимое количество эталонных пикселей для оценки локальных сигнатур классов. Это приводит к появлению узлов, не обеспеченных значениями параметров сигнатур некоторых классов и, как следствие, к необходимости проведения второго этапа обучения локально-адаптивного классификатора.

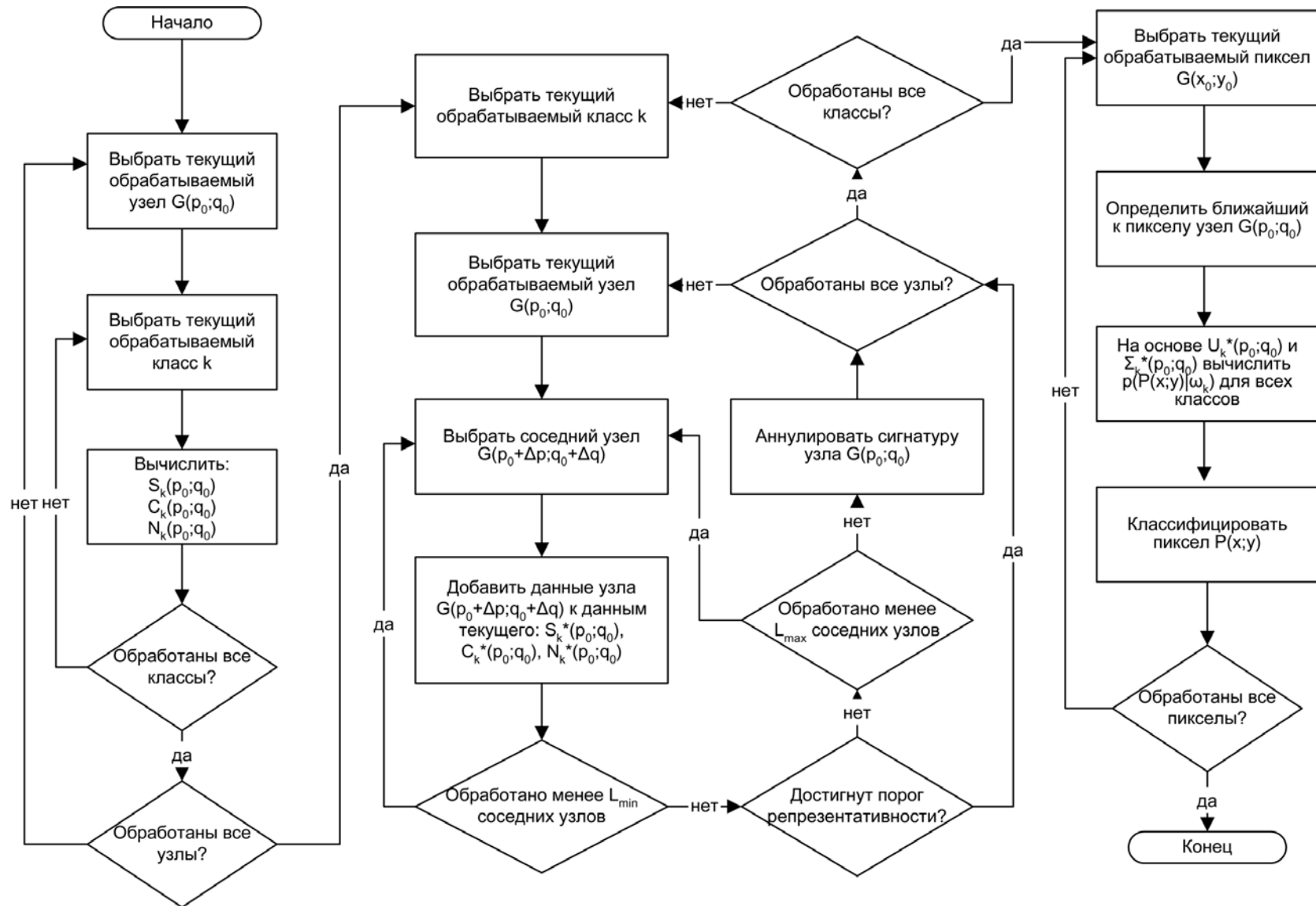


Рис. 2. Блок-схема алгоритма локально-адаптивной классификации

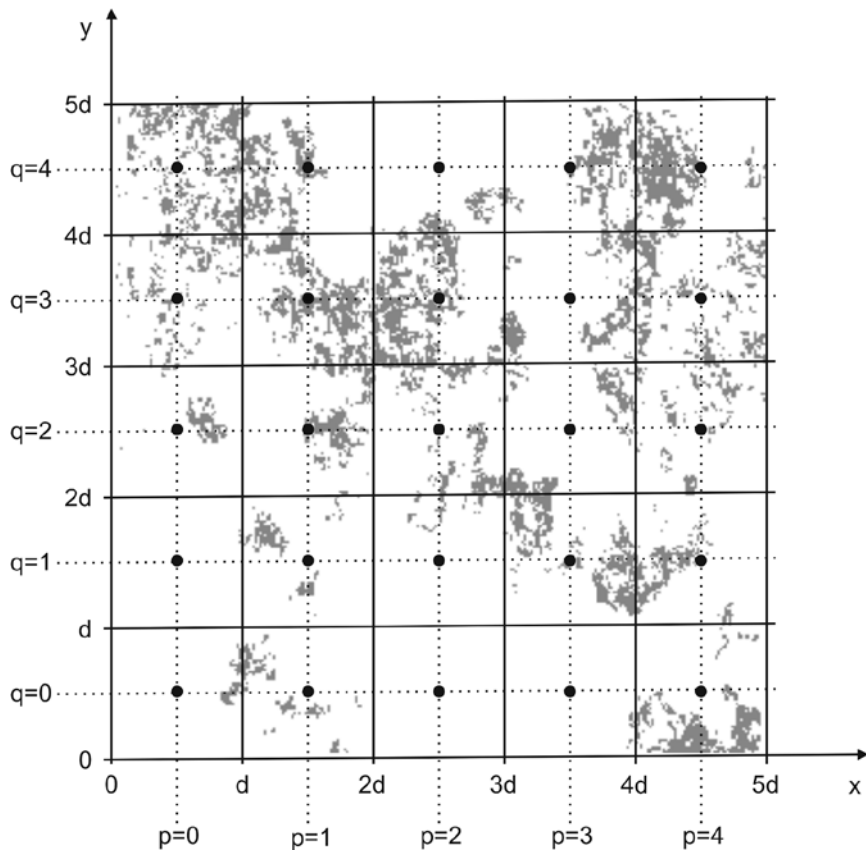


Рис.3. Локализация сигнатур классов

На втором этапе для каждого не преодолевшего порог репрезентативности ($N_k(p_0; q_0) < T$) узла $G(p_0; q_0)$ проводится обработка данных соседних клеток. Количество используемых соседних клеток зависит от величины T , числа эталонных пикселей в клетке $N_k(p_0; q_0)$ и соседних клетках $N_k(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$. Кроме того, предусмотрено задание параметров L_{\min} и L_{\max} , ограничивающих снизу и сверху число используемых соседних клеток. Число используемых соседних клеток итеративно увеличивается, начиная с L_{\min} до величины, соответствующей достижению порога репрезентативности T . Если порог T не был преодолен при достижении числа ближайших клеток значения L_{\max} , то сигнатура узла $G(p_0; q_0)$ для класса k считается несуществующей.

Расширение анализируемой для оценки параметров локальной сигнатуры класса окрестности осуществляется дискретно путем последовательного включения соседних клеток, находящихся на одинаковом удалении от узла $G(p_0; q_0)$, и обобщения полученных на первом этапе обучения величин $S_k^i(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$, $C_k^{i,j}(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$ и $N_k(p_0 + \Delta p; q_0 + \Delta q)$. При этом новые характеристики узла

$S_k^{i*}(p_0; q_0)$, $C_k^{i,j*}(p_0; q_0)$ и $N_k^*(p_0; q_0)$ вычисляются как суммы соответствующих величин, полученных для соседних узлов на первом этапе обучения.

По результатам второго этапа обучения, для класса k в узлах, для которых справедливо выражение $N_k^*(p; q) \geq T$, определяются с использованием выражения аналогичного (1) параметры сигнатур $U_k^*(p; q)$ и $\Sigma_k^*(p; q)$ для последующей обучаемой классификации.

В рамках локально-адаптивной классификации могут быть использованы различные решающие правила классификации, такие как методы максимального правдоподобия, минимального расстояния или параллелепипеда. К настоящему времени в составе разработанного программного комплекса реализован алгоритм классификации на основе метода максимального правдоподобия. В соответствии с решающим правилом максимума правдоподобия, пиксел $P(x; y)$ относится к множеству ω_l пикселей класса l , если для всех $k=1, 2, \dots, m$ выполняется условие:

$$p(\omega_l)p(P(x; y) | \omega_l) \geq p(\omega_k)p(P(x; y) | \omega_k), \quad (2)$$

где $p(\omega_l)$, $p(\omega_k)$ – априорные вероятности классов l и k ; $p(P(x; y) | \omega_l)$, $p(P(x; y) | \omega_k)$ – плотности вероятности отнесения пиксела $P(x; y)$ к множеству пикселей класса l и множеству пикселей класса k .

В свою очередь, плотность вероятности определяется по формуле:

$$p(P(x; y) | \omega_k) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}(B(x; y) - U_k^*(p; q))^T \Sigma_k^*(p; q)^{-1} (B(x; y) - U_k^*(p; q))\right)}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_k^*(p; q)|^{1/2}}, \quad (3)$$

где $B(x; y)$ – вектор признаков пиксела $P(x; y)$; n – число признаков.

При классификации используются параметры $U_k^*(p; q)$ и $\Sigma_k^*(p; q)$ локализованных сигнатур, вычисленных на втором этапе обучения. Для классификации пиксела $P(x; y)$ используются сигнатуры ближайшего узла $G(p; q)$, порядковые номера которого в строках и столбцах регулярной сетки с шагом d определяются по формулам $p = x/d$ и $q = y/d$.

Наряду с сигнатурами, характеризующими локализованные значения признаков классов, при классификации используются априорные вероятности, полученные на основе данных об ареалах распространения типов земного покрова в пределах

рассматриваемой территории. В решающем правиле (2) априорная вероятность класса задается для каждого класса и каждого пиксела территории. Априорные вероятности могут быть получены в результате обобщения обучающей выборки таким образом, что в окрестности эталонных пикселов классов их значения максимальны и снижаются по эмпирически подобранным правилам по мере удаления.

Использование существующих тематических карт для формирования обучающей выборки, как правило, требует дополнительного анализа. Это обусловлено, в частности, наличием ошибок классификации, изменениями земного покрова, различиями пространственного разрешения существующих карт и используемых спутниковых данных.

Для получения точной обучающей выборки оправданно применение итерационного подхода, включающего классификацию, экспертный контроль результатов и внесение исправлений в обучающую выборку для последующей итерации. Исправление обучающей выборки на основе экспертных знания является неотъемлемой частью процесса разработки продукта, однако целесообразно также применение автоматизированных средств фильтрации. В качестве одного из инструментов такого рода был разработан алгоритм гистограммной фильтрации, который может быть применен на начальном этапе подготовки опорной выборки.

Разработанная технология локально-адаптивной классификации была использована для создания карты растительности России TerraNorte RLC. Для классификации использованы композитные изображения MODIS с пространственным разрешением 250 м. Источником для формирования опорных данных на начальном этапе послужила карта наземных экосистем Северной Евразии GLC2000.

Легенда созданной карты включает 22 класса земного покрова, образующих группы лесов, тундры, кустарниковых и травяных типов растительного покрова. Классы не покрытых растительностью площадей включают водную поверхность, урбанизированные территории и некоторые другие классы.

Сравнение полученных на основе TerraNorte RLC и данных Росстата значений площади лесов в субъектах РФ позволило получить величину коэффициента детерминации $R^2=0,99$ (рис. 4.а). Общая оценка площади лесов по данным TerraNorte RLC составляет 746 млн. га, что на 4% отличается от оценки Росстата 2003 года (776 млн. га). При этом установлено, что наибольшая часть площади лесов РФ приходится

на субъекты, в которых относительная величина ошибки минимальна (рис. 4.б). Так, 674 млн. га (87% общей площади) расположены в 57 субъектах РФ, относительная ошибка в которых не превышает 15%.

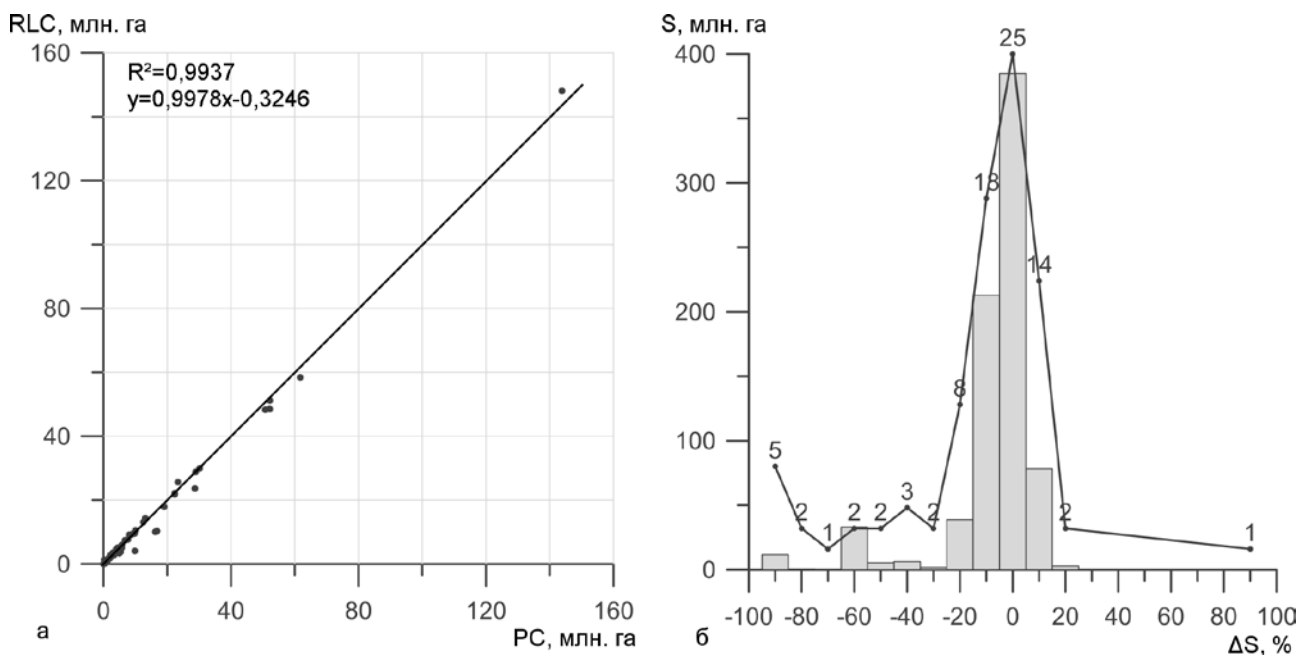


Рис. 4. а) площади лесов в субъектах РФ по данным Росстата (РС) и TerraNorte RLC; б) распределение площади лесов в Субъектах РФ (высота столбцов) и количества субъектов РФ (числа на графике) по относительной величине ошибки

Для оценки пространственной детальности карты использован метод на основе оптимума Парето. В качестве эталонных данных высокого пространственного разрешения были использованы результаты классификации изображений Landsat-ETM+ для тестовых участков. Для корректного сопоставления легенды эталонных данных и карты TerraNorte RLC были упрощены до дихотомического вида («лес» и «не лес»). Для каждого из тестовых участков определены границы Парето, описывающие серию идеальных для данного участка продуктов с пространственным разрешением 250 м. Дополнительно, аналогичное исследование было проведено для пространственного разрешения равного 1 км. Кроме того, величины ошибок первого и второго рода были вычислены для карты TerraNorte RLC и GLC2000.

Анализ полученных данных подтвердил гипотезу о том, что величины ошибок первого и второго рода, вычисленные для реально существующих карт выше, чем у идеальных (смоделированных) продуктов такого же пространственного разрешения,

что видно на графике (рис. 5) по взаимному расположению точек и линий. Одновременно с этим, удалось установить, что точность карты TerraNorte RLC выше, чем у идеальных продуктов с разрешением 1 км, несмотря на то, что для создания опорной выборки использована карта данного разрешения.

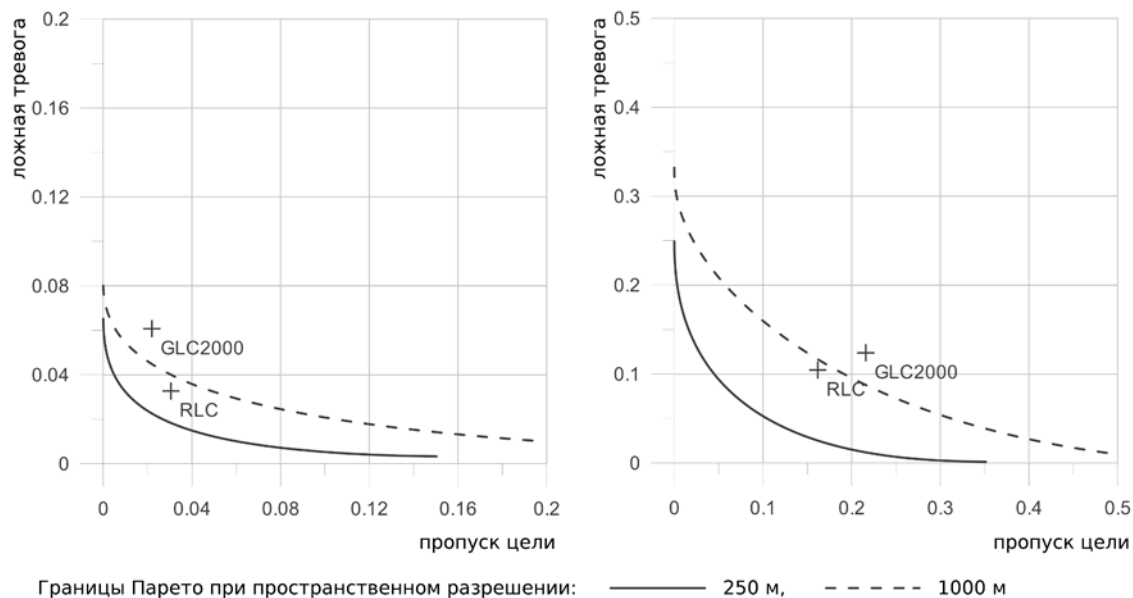


Рис. 5. Оптимумы Парето для тестовых участков: республика Коми (слева), республика Карелия (справа)

Глава 4. Программный комплекс обработки спутниковых данных и информационная система представления результатов мониторинга земного покрова

Отсутствие программного обеспечения, позволяющего выполнять распознавать типы земного покрова методом локально-адаптивной обучаемой классификации, потребовало разработки специализированного программного комплекса. Комплекс состоит из модулей, выполняющих необходимые для реализации метода процедуры, в том числе: вычисление локализованных сигнатур, локально-адаптивная классификация, выявление участков изменений обучающих данных, гистограммная фильтрация, моделирование спектральных смесей, а также вспомогательные модули (слияние результатов работы нескольких компьютеров; визуализация локализованных сигнатур и пр.)

Модули предназначены для запуска в режиме командной строки под

управлением ОС Linux. Такое устройство программного комплекса упрощает указание необходимых параметров работы, а также автоматизированный запуск модулей. Уникальность структуры данных локализованных сигнатур, большой объем обрабатываемых изображений и требование высокой производительности обработки обусловили необходимость разработки специализированной библиотеки доступа к данным, реализованной в виде набора классов на языке C++.

Процесс разработки тематических карт, как правило, связан с необходимостью многократной классификации данных, экспертной оценки результатов и исправления ошибок. Это делает актуальным вопрос минимизации временных затрат на классификацию, что в настоящей работе достигается одновременным применением следующих подходов:

- частичная классификация территории (участки, на которых обучающая выборка осталась без изменений, повторно не классифицируются);
- распределение вычислений между несколькими компьютерами;
- автоматическое управление вычислительными процессами (с момента подачи обучающих данных на вход до момента получения карты на выходе участие человека не требуется).

Для обеспечения доступа пользователей к создаваемым в ИКИ РАН на основе обработки спутниковых данных информационным продуктам автором была разработана информационная система мониторинга земного покрова TerraNorte (<http://terranorte.iki.rssi.ru>). Банк данных информационной системы включает в себя ряд продуктов и баз данных, полученных по данным дистанционного зондирования и отражающих состояние и динамику растительности в результате воздействия естественных и антропогенных факторов, таких как лесные пожары, вырубki лесов, сельскохозяйственное использование земель.

Пользовательский интерфейс TerraNorte предоставляет доступ к данным в нескольких режимах:

- загрузка информационных продуктов, предоставляющая пользователям возможность получения данных в виде файлов в векторных и растровых форматах, совместимых с распространенными программными пакетами ГИС;
- выполнение интерактивных запросов к базам данных для получения количественных показателей в табличной и графической формах;

- просмотр картографической информации в окне web-браузера с использованием интерактивного интерфейса (раздел «карты on-line») без необходимости установки программного обеспечения на компьютер пользователя (рис. 6).

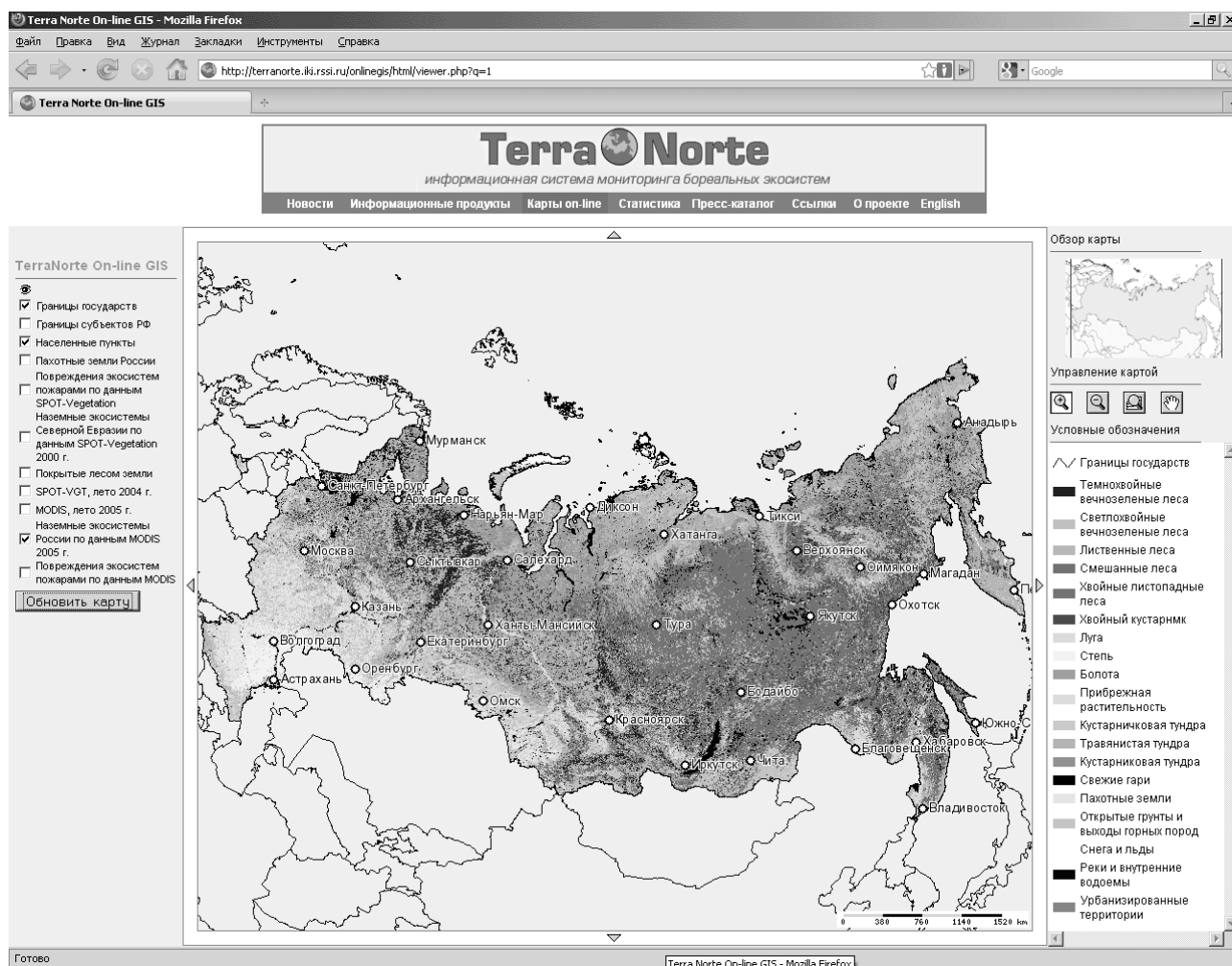


Рис. 6. Интерфейс системы TerraNorte: карта TerraNorte RLC

Заключение. Представленная диссертационная работа содержит результаты исследований и разработок автора, которые можно рассматривать как решение научной проблемы развития методов и технологий распознавания и картографирования типов земного покрова по данным спутниковых наблюдений.

Разработанный метод локально-адаптивной обучаемой классификации лег в основу созданного автором программного комплекса. Функциональные возможности комплекса обеспечивают автоматизированное картографирование типов земного покрова по спутниковым данным с использованием системы управления распределенными вычислениями.

С использованием разработанного программного комплекса на основе данных MODIS была создана карта растительности России, превосходящая по пространственному разрешению (250 м) существующие аналогичные карты на территорию России.

Независимая валидация, проведенная с использованием данных Росстата продемонстрировала высокую корреляцию ($R^2=0,99$) оценок площадей лесов в субъектах РФ. Исследование пространственной детальности карты в сравнении со спутниковыми данными высокого разрешения, выполненное методом оптимума Парето, показало высокий для данного пространственного разрешения уровень точности карты.

Благодаря высокой степени автоматизации разработанный программный комплекс позволяет получать временные серии карт типов земного покрова.

Созданная в рамках диссертационной работы информационная система мониторинга земного покрова TerraNorte обеспечивает эффективный доступ пользователей к результатам исследований и разработок автора, включая новую карту растительности России.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Егоров В.А., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Мониторинг повреждений растительного покрова пожарами по данным спутниковых наблюдений. //Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, МИИГАиК, №2. Москва, 2006, - С. 98-109.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A. and Uvarov I.A. Multi-year circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION // International Journal of Remote Sensing. 2007. No.28(6). pp. 1397 - 1404
3. Кравцова В.И., Уваров И.А. Гиперспектральная система MODIS для глобального мониторинга Земли // Информационный бюллетень ГИС-ассоциации – 2001 - №2(29)-3(30). М.: «ГИС-Ассоциация», 2001 – с.39-41.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Оценка площади повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000-2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и

технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН, Сборник научных статей, Научные редакторы: д.т.н. Е.А. Лупян, к.ф.-м.н. О.Ю. Лаврова, Том II, Москва, «GRANP polygraph», 2005 - С. 354-366.

5. Барталев С.А., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - М.: ИКИ РАН, 2005. - С. 131-139.
6. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Уваров И.А., Ховратович Т.С. Структура и функциональные возможности информационной системы TerraNorte для поддержки спутникового мониторинга бореальных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 3. Том II. – М.- ООО «Азбука-2000», 2006 - с. 375-379.
7. Bartalev S., Uvarov I. TerraNorte. A new boreal ecosystems monitoring data access facility. Land Cover and Change. Newsletter of the GOF-C-GOLD Land Cover Project Office, no. 9, February 2006.
8. Уваров И.А., Барталев С.А. Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса :Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. М: ООО "ДоМира", 2010. Т.7. № 1. С.353-365.
9. Уваров И.А. Разработка WEB-интерфейса информационной системы спутникового мониторинга наземных экосистем Северной Евразии // II Конференция молодых учёных «Исследования космического пространства в интересах фундаментальных наук». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН., 2005. С.31.
10. Bartalev S.A., Loupian E.A., Uvarov I.A. The TerraNorte Information System: New Terrestrial Ecosystem Dynamics Facility for Northern Eurasia // Proceedings of 31st International Symposium on remote sensing of Enviroment. Saint-Petersburg, 2005.

P.24-26.

11. Барталев С.А., Егоров В.А., Курятникова Т.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Методы и результаты использования данных спутниковых наблюдений для оценки воздействия пожаров и вырубок на леса России. // Дистанционные методы в лесоустройстве и учете лесов. Приборы и технологии: Материалы Всероссийского совещания-семинара с международным участием, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Научный редактор: академик РАН А.С. Исаев, Красноярск, 2005 – С. 23-27.
12. Уваров И.А., Нейштадт И.А. Оценка возможности использования данных TERRA-MODIS для картографирования растительности России // III конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН., 2006. С.39.
13. Уваров И.А., Барталев С.А. Разработка обучаемого алгоритма классификации наземных экосистем по данным Terra-MODIS с использованием опорных тематических данных // Четвертая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2006. С.238.
14. Уваров И.А., Барталев С.А. Разработка автоматического обучаемого алгоритма классификации наземных экосистем по данным MODIS // IV конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2007. С.48
15. Уваров И.А., Барталев С.А. Разработка автоматического регионально-адаптивного алгоритма обучаемой классификации лесов по спутниковым данным. // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады IV Международной конференции. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007 - с. 146-147.
16. Уваров И.А., Барталев С.А. Метод глобального картографирования растительного покрова по данным спутниковых наблюдений на основе контекстно-зависимой обучаемой классификации // Пятая юбилейная открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2007. С.277.
17. Медведева М.А., Уваров И.А., Барталев С.А. Выявление водных объектов и

сезонно затопляемых территорий для картографирования наземных экосистем по данным MODIS // Пятая юбилейная открытая всероссийская конференция «Дистанционное зондирование Земли из космоса». Тезисы докладов. М. ИКИ РАН. 2007. С. 260

18. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А., Уваров И.А. Развитие метода выявления возделываемых пахотных земель по многолетним рядам спутниковых данных MODIS // Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2008. С.265
19. Уваров И.А., Барталев С.А., Егоров В.А., Медведева М.А. Возможности картографирования наземных экосистем Северной Евразии на основе данных MODIS с использованием метода локально-адаптивной обучаемой классификации // Шестая открытая всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2008. С. 274
20. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Уваров И.А. Метод выявления посевов озимых культур по данным MODIS на основе итеративного алгоритма локально-адаптивной классификации с обучением // Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2009. С.292
21. Уваров И.А. Метод глобального картографирования растительного покрова по спутниковым данным на основе локально-адаптивной обучаемой классификации // VI конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2009. С. 41-42
22. Уваров И.А. Разработка автоматизированной интерактивной системы локально-адаптивной обучаемой классификации для глобального картографирования земного покрова по спутниковым данным // VII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2010. С.61