

На правах рукописи



Плотников Дмитрий Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ
ВАРИАЦИЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ**

Специальность 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011

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, профессор
Малинников Василий Александрович

кандидат физико-математических наук
Жуков Борис Сергеевич

Ведущая организация:

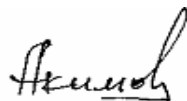
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН)

Защита диссертации состоится 15 февраля 2012 года в 11 час. на заседании диссертационного совета Д 002.113.01 в ИКИ РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « 20 » декабря 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Акимов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием и использованием спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения широкого круга научных и прикладных задач. В их числе, в частности, моделирование процессов энергомассобмена в геосистемах различного уровня, исследования глобальных трендов климата и биосферы, мониторинга опасных явлений, оценки возобновляемых биологических ресурсов и многие другие.

Занимая более 78% поверхности суши, а также являясь ключевым компонентом биосферы и важнейшим возобновляемым ресурсом, растительный покров Земли имеет огромное экологическое и экономическое значение. Современные системы ДЗЗ, обеспечивая возможность регулярных измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова, являются эффективным инструментом сбора информации о пространственном распределении и динамике растительности.

Динамику спектрально-отражательных характеристик растительности в любой момент времени можно описать линейной суперпозицией периодической (сезонной) T_s , трендовой T_t и нерегулярной T_i компонент: $T = T_s + T_t + T_i$. Тот факт, что сезонная составляющая доминирует в большинстве типов естественной растительности, положен в основу ряда подходов к их оценке по данным ДЗЗ. Однако некоторые типы растительности проявляют существенную нерегулярность временной динамики спектрально-отражательных характеристик, что требует разработки специальных методов их оценки на основе временных рядов данных спутниковых измерений. К наиболее представительным типам растительного покрова, характеризующимся нерегулярными (квазипериодическими) временными вариациями спектрально-отражательных характеристик, можно отнести земли сельскохозяйственного использования, а также экосистемы засушливых степей и полупустынь. В первом случае указанные нерегулярности имеют антропогенную природу, а во втором определяются стохастическим характером осадков как основным лимитирующим фактором роста растений в аридных регионах.

Достоверная оценка растительности с выраженной квазипериодичностью динамики спектрально-отражательных характеристик требует использования многолетних рядов данных регулярных измерений, получение которых оказалось

возможным благодаря устойчивому функционированию таких спутниковых систем, как Terra/Aqua-MODIS и SPOT-Vegetation. Задача обработки получаемых огромных объемов данных многолетних спутниковых наблюдений может решаться только на основе методов, обладающих высоким уровнем автоматизации. При этом необходимость охвата территорий континентального и глобального уровней требует разработки адаптивных алгоритмов, устойчиво применимых в широком диапазоне физико-географических условий, характеризующихся пространственно-временной изменчивостью.

Цель и задачи. Основной целью диссертационной работы являлась разработка обладающих свойствами пространственно-временной адаптивности алгоритмов и автоматизированных методов оценки растительности на основе временных рядов данных спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектральной яркости земного покрова. Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

- анализ физических основ методов спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова и информативности получаемых на их основе спектральных вегетационных индексов для дистанционной оценки растительности с учетом степени их инвариантности к пространственно-временным вариациям отражательных характеристик почв;
- экспериментальный анализ многолетних данных спектрорадиометрических спутниковых измерений земного покрова России с целью выявления характерных особенностей сезонной и межгодовой динамики спектрально-отражательных характеристик различных типов растительности и разработки информативных признаков их распознавания;
- разработка и программная реализация метода предварительной обработки временных рядов спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова с целью исключения зашумленных измерений и восстановления пропущенных данных;
- разработка и программная реализация пространственно-временного корреляционного алгоритма детектирования растительности, обладающей локально-коррелированной нерегулярной динамикой спектрально-

отражательных характеристик, на основе многолетних рядов данных спутниковых измерений;

- разработка и программная реализация алгоритма детектирования растительности, обладающей фазовым смещением динамики спектрально-отражательных характеристик, на основе сезонных рядов данных спутниковых измерений;
- разработка спектрально-динамических признаков и автоматической технологии оценки растительности на основе многолетних рядов спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
- анализ данных, полученных на основе разработанных методов, для оценки влияния антропогенной трансформации растительного покрова на изменение спектрального альбедо земной поверхности в ближнем ИК-диапазоне;
- практическая апробация разработанных алгоритмов и автоматизированных методов для решения задач спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель России.

Научная новизна работы:

1. предложены и апробированы научно-методические принципы дистанционной оценки растительности на основе многолетних временных рядов спутниковых измерений сезонных и межгодовых вариаций спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
2. разработаны и апробированы новые алгоритмы и автоматизированные методы дистанционной оценки растительности на основе пространственно-временного анализа амплитудных и фазовых особенностей динамики спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
3. предложен новый класс спектрально-динамических признаков распознавания типов растительности, основанных на использовании многолетних временных рядов спутниковых измерений отражательных характеристик земного покрова;
4. разработана автоматическая технология распознавания типов растительности на основе многолетних рядов спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
5. на основе разработанных подходов и методов созданы автоматизированные технологии спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель и

получены уникальные информационные продукты, отражающие многолетнюю динамику растительного покрова России.

На защиту выносятся следующие разработки и результаты:

1. пространственно-временной корреляционный алгоритм оценки типов растительности на основе многолетних рядов данных спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
2. адаптивный алгоритм детектирования на основе данных спутниковых измерений участков растительности со смещенной фазой сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик;
3. итеративный метод локально-адаптивного распознавания растительности по данным спутниковых измерений на основе амплитудно-фазовых различий сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик;
4. спектрально-динамические признаки и автоматизированная технология оценки типов растительности на основе многолетних рядов спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектрально-отражательных характеристик земного покрова.

Практическая значимость. Полученные автором результаты были использованы для оценки влияния антропогенной трансформации растительного покрова на изменение альбедо земной поверхности, а также нашли широкое использование для решения задач спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель. В частности, ежегодно получаемые на основе разработанных методов карты пахотных земель и сельскохозяйственных посевов на территории России применяются для оценки режимов землепользования, мониторинга развития культур и прогноза урожая. Результаты выявления пахотных земель на основе предложенного автором метода использованы при создании карты растительного покрова России по данным MODIS.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на десяти российских и международных конференциях, научных семинарах и совещаниях в Москве, Самаре, Санкт-Петербурге, а также Алма-Ате (Казахстан), Кембридже (Великобритания), Тарту (Эстония) и Испре (Италия). Автор дважды (2008 и 2010 годы) становился победителем конкурса Всероссийской

конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» за лучший доклад молодого ученого.

Публикации. По результатам исследований и разработок по теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 7 статей в российских периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка. Объём диссертации составляет 158 страниц, включая 47 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список содержит 146 литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Глава 1. Физические основы, приборы и методы дистанционного зондирования. При использовании оптических систем ДЗЗ наибольшее внимание уделяется интервалу длин волн 0,3-15 мкм, на которые приходится максимум излучения солнечной энергии, проходящего через атмосферные окна прозрачности. Излучение этого диапазона длин волн по-разному поглощается облаками, фотосинтезирующими элементами растений, почвой, водной поверхностью и снегом, что обеспечивает принципиальную возможность распознавания по спутниковым данным наблюдаемых объектов. Связанные с фенологическими циклами или изменениями состояния растительного покрова вариации его спектрально-отражательных характеристик в наибольшей степени определяются процессами накопления и разрушения хлорофилла, а также содержанием воды в зеленых фракциях растений. Наиболее сильно указанные вариации проявляются в участках оптического спектра, центры которых соответствуют красному (0,67 мкм), ближнему ИК (0,80-0,90 мкм) и средним ИК (1,64 мкм и 2,13 мкм) диапазонам длин волн.

В настоящее время оптические спутниковые системы характеризуются широким многообразием спектральных каналов, величин пространственного разрешения и частоты съёмки. Важной характеристикой спутниковых систем является продолжительность и систематичность съёмки, определяющие возможность получения и использования многолетних однородных временных рядов дистанционных измерений. Одним из путей повышения эффективности

использования спутниковых измерений для мониторинга растительности является построение спектральных вегетационных индексов, являющихся функциями значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в двух или большем числе спектральных каналов: $VI = f(l_1, \dots, l_n)$. Использование спектральных вегетационных индексов для дистанционной оценки растительности в ряде случаев обеспечивает существенные преимущества ввиду их меньшей зависимости от изменений яркости почв, геометрических условий освещения и наблюдения, прозрачности атмосферы. Особый интерес представляет группа почвенно-адаптивных индексов, в основе которых лежит экспериментально установленный факт наличия близкой к линейной связи (линии почв) между значениями КСЯ открытой почвы различных типов в красном и ближнем ИК диапазонах спектра. При этом соответствующие одинаковому развитию растительности значения почвенно-адаптивных индексов являются квазиинвариантными к изменениям типов и состояния почв, что особенно важно при дистанционной оценке растительности больших территорий.

Временные ряды дистанционных измерений обеспечивают возможность классификации типов растительности и регулярной оценки ее биофизических характеристик, в том числе для моделирования продуктивности растительных экосистем с использованием параметров эффективности поглощения солнечной радиации. Выбор метода классификации спутниковых данных обусловлен наличием априорных знаний о территории и требует различной глубины экспертного участия. При создании первых глобальных карт растительного покрова (проекты IGBP-DIS, TREES, GLC2000) в отсутствие репрезентативных обучающих выборок использовались методы неконтролируемой классификации с предварительной стратификацией изображения по природно-климатическим границам, что требовало значительного участия экспертов. При оценке больших территорий использование стандартных методов классификации часто является не достаточно эффективным в силу географической изменчивости значений признаков распознавания. На снижение этого ограничения направлено использование алгоритмов адаптивной классификации, обладающих механизмами адекватного учета пространственно-временной вариабельности значений признаков.

Глава 2. Банк данных о спектрально-отражательных характеристиках земного покрова России на основе спутниковых измерений спектрорадиометром MODIS.

Спектрорадиометр MODIS создан Национальным управлением по аэронавтике и исследованиям космического пространства (США) на основе кадмиево-ртутно-теллурических и кремниевых фотодетекторов, позволяя регистрировать излучение в диапазоне 0,4 – 14,4 мкм, включающем 36 спектральных каналов шириной от 0,01 до 0,5 мкм. Прибор обладает высоким (12 бит) радиометрическим разрешением при отношении сигнал/шум порядка $10^2..10^3$. Спектрорадиометр MODIS установлен на борту спутников ДЗЗ Terra и Aqua, имеющих круговую солнечно-синхронную околополярную (с наклоном 98°) орбиту высотой около 700 км. Прибор обеспечивает сканирование поверхности планеты с пространственным разрешением от 250 м до 1 км (в зависимости от спектрального канала) в полосе шириной 2330 км, что позволяет проводить полную съемку Земли в течение двух дней, а для широт выше 30° – ежедневно. В ИКИ РАН создан и непрерывно пополняется банк данных ежедневных измерений КСЯ земной поверхности для всей территории России за период с 2000 года по настоящее время, объем которого превысил 50 Тбайт.

Наибольший интерес для решения задач дистанционного зондирования растительного покрова представляют результаты измерений в синем (0,47 мкм), красном (0,67 мкм), ближнем ИК (0,85 мкм) и среднем ИК (1,64 мкм) диапазонах спектра. Систематические измерения спектральной яркости на указанных длинах волн необходимы не только для оценки характеристик растительности, но и для решения задач фильтрации мешающих факторов, таких как облака и снежный покров. Исследования автора показывают, что эффективный мониторинг растительного покрова с учётом динамики прозрачности атмосферы для большей части территории России требует ежедневных спутниковых наблюдений. Это подтверждается экспериментально установленной в работе зависимостью между вероятностью получения заданного числа свободных от влияния облачного покрова наблюдений и частотой съемки (рис. 1).

Созданные в ИКИ РАН алгоритмы предварительной обработки исходных данных MODIS предусматривают построение многоканальных композитных изображений, максимально свободных от влияния облачности. Тем не менее, анализ динамики развития растительного покрова на основе временных рядов измерений

КСЯ или значений вегетационного индекса часто затруднен из-за влияния изменений условий съёмки и наличия пропусков в данных наблюдений открытой земной поверхности. Для устранения таких недостатков автором разработан алгоритм оконной полиномиальной аппроксимации временных рядов данных спутниковых измерений функцией вида $f(t) = at^2 + bt + c$, предусматривающий использование скользящего вдоль оси абсцисс динамического окна, включающего фиксированное количество валидных измерений, которые используются для вычисления коэффициентов полинома. Поиск коэффициентов выполняется методом наименьших квадратов, а принцип работы алгоритма заключается в получении аппроксимирующих оценок для каждого измерения, на основе значений среднего $\bar{x}_t$ и дисперсии s_t , с помощью которых делается вывод о пригодности данного измерения. На первом этапе фактическое значение элемента временного ряда X_t сравнивается с расчетным средним значением $\bar{x}_t$ с учетом величины s_t и принимается решение о модификации значения или исключении элемента. На втором этапе производится оконная полиномиальная аппроксимация по измененной временной серии с получением новых оценок модифицированных значений. После повторения этапов в соответствии со значением параметра количества проходов, происходит заполнение пропусков на основе средних аппроксимирующих оценок $\bar{x}_t$. Разработанный алгоритм позволяет решать задачи заполнения пропущенных измерений КСЯ или вегетационного индекса, а также поиска и исключения измерений, сделанных под влиянием мешающих факторов и сглаживания временных серий одновременно.

Почвенно-адаптивный перпендикулярный вегетационный индекс PVI в значительной мере инвариантен к изменениям яркости почвенного покрова и тесно коррелирует с объемом зеленой биомассы растений, что делает целесообразным его использование для мониторинга растительности на континентальном уровне. Выражение $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$ для вычисления значений данного вегетационного индекса в двумерном пространстве значений КСЯ красного (R_1) и ближнего ИК (R_2) диапазонов основано на использовании уравнения линии почв ($R_2 = 1,1R_1 + 0,05$), полученного в результате линейной аппроксимации

экспериментальных данных о значениях КСЯ открытой почвы в различных регионах РФ (рис. 2).

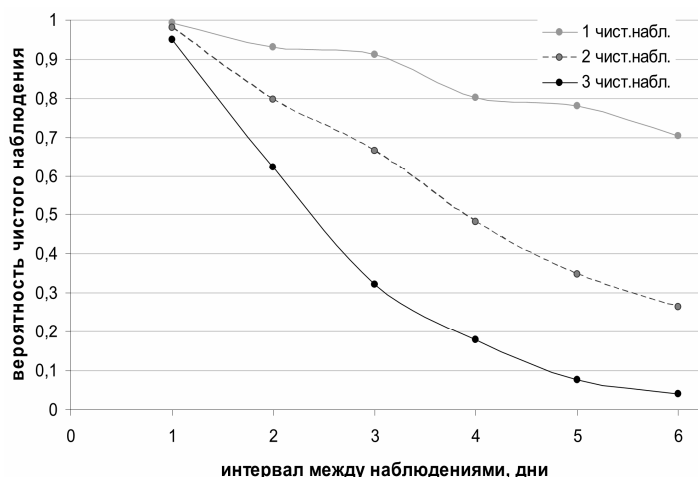


Рис.1. Зависимость вероятности наблюдения открытой поверхности от частоты съёмки

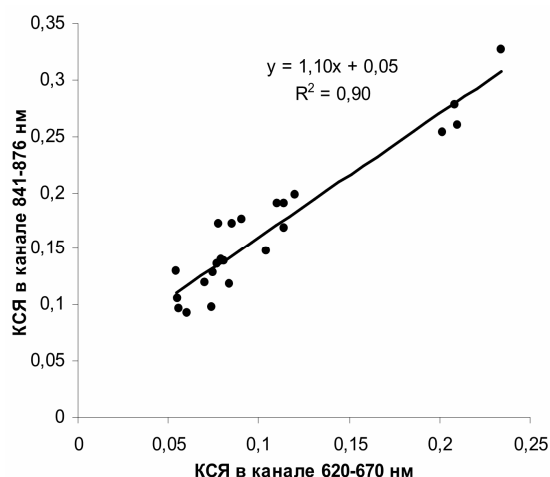


Рис.2. Линия почв по данным измерений КСЯ открытой почвы

Глава 3. Адаптивные алгоритмы оценки растительного покрова на основе временных рядов спектрорадиометрических спутниковых измерений.

Автором предложен и программно реализован пространственно-временной корреляционный алгоритм распознавания по многолетним рядам спутниковых данных типов растительности, обладающей нерегулярной локально-коррелированной динамикой спектрально-отражательных характеристик. К их числу относится, например, растительность засушливых регионов, сезонная динамика развития которой определяется наличием атмосферных осадков и носит стохастический характер.

В качестве критерия для распознавания заданного типа растительности используется значение коэффициента линейной корреляции K_{xy} между многолетними рядами x_i и y_i значений PVI, соответствующих опорному и анализируемому пикселю, находящемуся внутри окружности с центром в опорном пикселе и радиусом локальной однородности метеоусловий R (рис. 3).

Пикселям с высоким значением корреляции $K_{xy} > K_{пор}$ присваивается код заданного типа растительности в силу схожести с обучающим пикселем многолетней динамики развития и их совокупность, в свою очередь, выступает в качестве потенциальных опорных пикселей для следующего шага работы алгоритма. Для

равномерного покрытия анализируемой территории поиск новых опорных точек среди отобранных пикселей происходит в различных направлениях и на разных расстояниях от центральной точки. Новый опорный пиксель B_i должен удовлетворять требованиям репрезентативности: отстоять от центральной точки на расстояние более чем r , принадлежать связанной группе пикселей, превышающей заданный размер и быть полностью окружен пикселями данной группы.

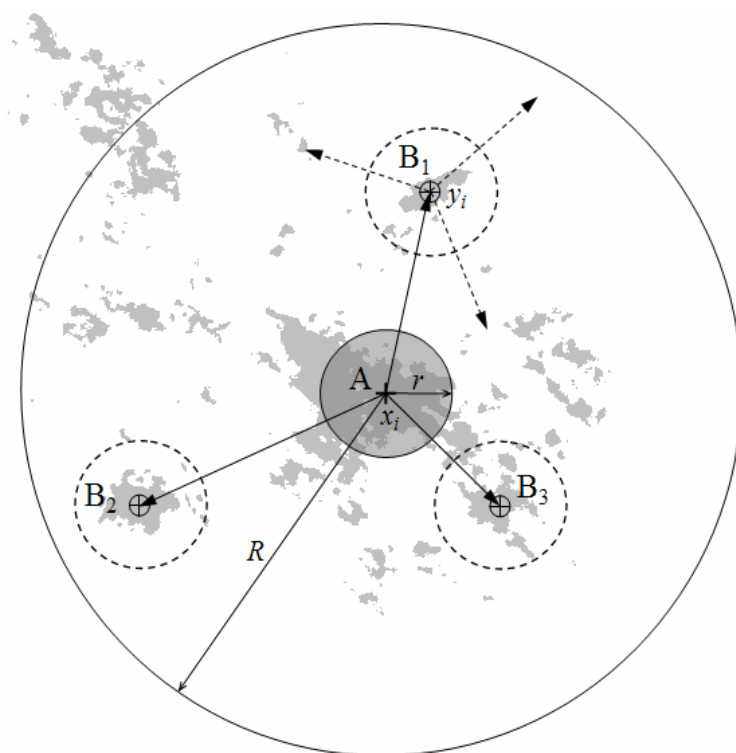


Рис. 3. Иллюстрация работы пространственно-временного корреляционного алгоритма классификации растительности

Алгоритм предусматривает поиск трёх новых опорных точек, а если это невозможно, то происходит изменение конфигурации поиска со снижением их количества до двух, затем до одной. При отсутствии точек, удовлетворяющих требованиям, построение маски в текущем направлении заканчивается (рис. 4).

К особенностям некоторых типов растительного покрова (как, например, озимые культуры) относится смещение фазы сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик, для величины которого свойственны значительные региональные и межгодовые вариации в зависимости природных и некоторых других условий.

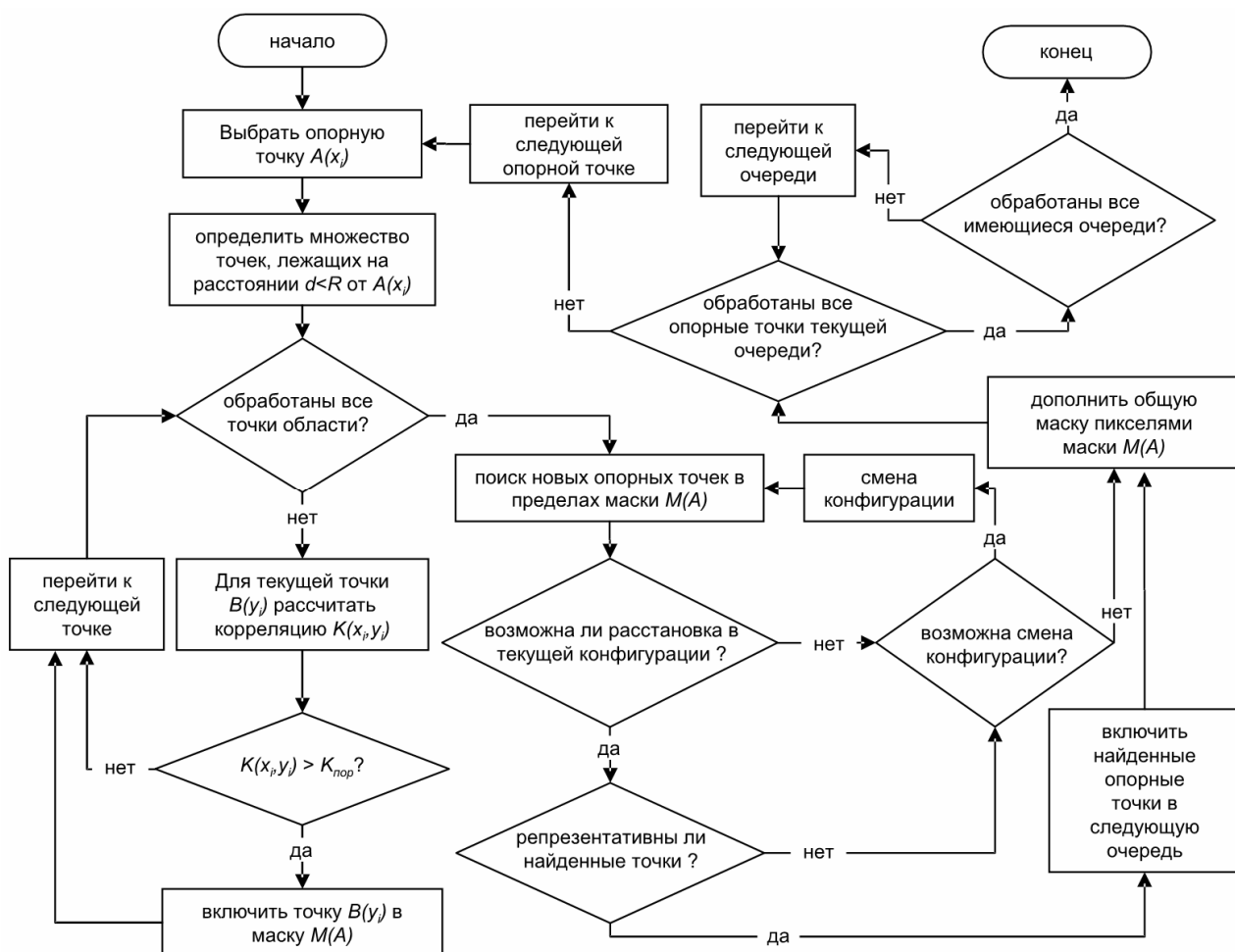


Рис. 4. Блок-схема работы пространственно-временного корреляционного алгоритма классификации растительности.

Для решения задачи отделения растительности со смещенной динамикой сезонного развития (класс 1) от других типов растительности (класс 2) с учётом указанных особенностей был разработан адаптивный алгоритм, в основу которого положен анализ рядов значений PVI, соответствующих некоторому временному интервалу, заведомо охватывающему период развития данного типа растительности. Внутри данного интервала проводится поиск минимального и максимального значений PVI для текущего пикселя (точки $I_{\min}$ и M_1 или M_2 на рис. 5), а соответствующие указанным экстремумам даты являются границами нового временного интервала, устанавливаемого независимо для каждого пикселя и внутри которого происходит дальнейший анализ. Пиксели, для которых максимум значений PVI наступил во времени раньше минимума, считаются не соответствующими «классу 1» и далее не рассматриваются (случай «в»). Остальные пиксели являются

претендентами для отнесения к этому классу, если ряд значений PVI демонстрирует на заданном временном интервале непрерывный рост для трех или большего числа последовательных наблюдений. Под «непрерывным ростом» понимается такое поведение временного ряда PVI, когда глубина возможных локальных спадов (G_1 и G_2) не превышает половину достигнутой величины роста (U_1 и U_2), т.е. если $U_2 - G_2 < G_2 - I_{\min}$ (случай «б»). В этом случае накопление числа точек непрерывного роста продолжается. Напротив, если $U_1 - G_1 > G_1 - I_{\min}$ (случай «а»), то делается вывод, что момент начала роста был выбран неверно, либо произошло воздействие неблагоприятных погодных условий. Дата наступления локального минимума (значение G_1 для кривой (а)) считается новым началом рассматриваемого временного интервала и процедура анализа временного ряда и накопление точек роста происходит сначала в новых временных границах. На основании полученной по результатам анализа ряда информации о количестве точек непрерывного роста делается окончательный вывод об отнесении текущего пикселя к «классу 1».

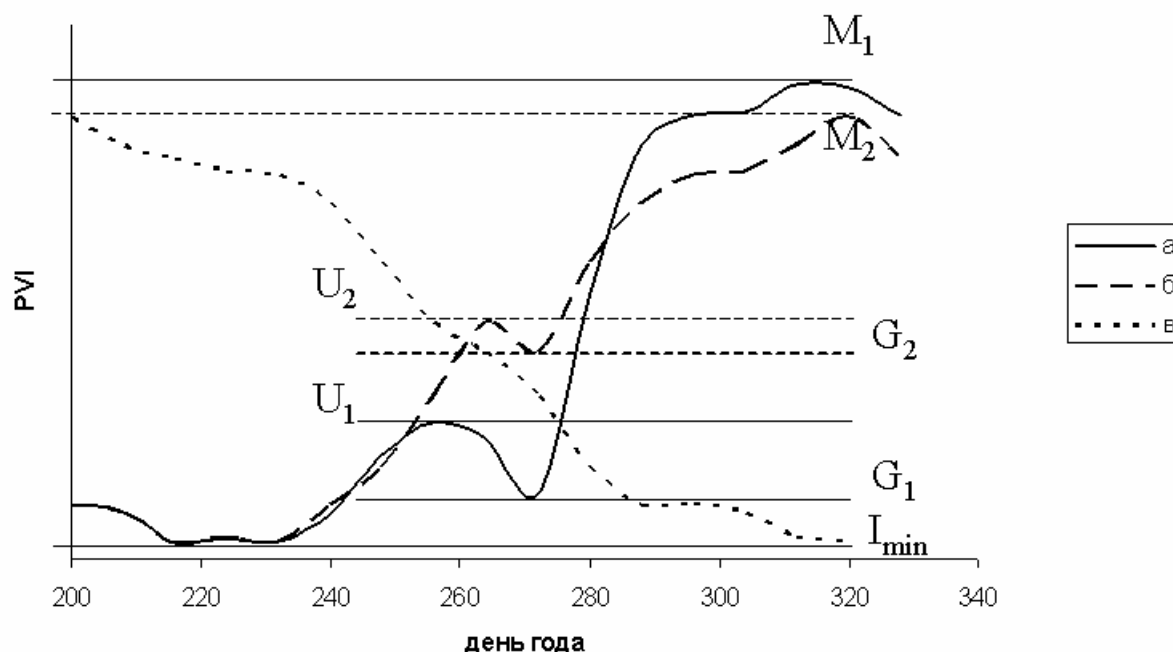


Рис. 5. Схематичное представление анализируемых вариантов поведения временных рядов PVI для решения задачи разделения классов

Таким образом, признаком распознавания участков, занятых искомым типом растительности, является длительность «непрерывного роста», величина которой

инвариантна к локальным изменениям почвенно-климатических условий и ряда других факторов.

Глава 4. Спектрально-динамические признаки и методы распознавания растительного покрова на основе локально-адаптивной классификации.

Использование временных серий спутниковых данных дает возможность получения объективных оценок структуры растительного покрова. В рамках настоящей работы экспериментально продемонстрирована возможность распознавания широкого набора типов растительности на основе фазовых кривых ее развития, получаемых по временным сериям измерений в красном и ближнем ИК диапазонах. Это позволило разработать метод оперативного распознавания растительности на основе амплитудно-фазовых различий динамики ее спектрально-отражательных характеристик и итеративного алгоритма локально-адаптивной классификации. Метод предусматривает использование временных рядов значений КСЯ в качестве признаков распознавания и обучающих данных для различных категорий растительности, разделяемых по амплитудно-фазовым особенностям сезонного развития. Временная динамика локальных значений КСЯ классов связана с почвенно-климатическими условиями и, как следствие, с особенностями фазового развития культурной растительности, что приводит к высокой изменчивости внутриклассовых значений при рассмотрении больших территорий. Это обосновывает необходимость использования локально-адаптивного алгоритма для обеспечения возможности локальной дифференциации типов растительности. Ввиду возможного влияния стрессовых факторов, таких как, например, заморозки и засухи, приводящих к изменению динамики вегетационного индекса, учет изменяющихся условий предполагает использование оперативно поступающих спутниковых данных для изменения опорной выборки и коррекции полученных на предыдущих этапах результатов.

Одной из ключевых задач диссертационной работы являлась разработка спектрально-динамических признаков распознавания растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития на основе временных серий спутниковых данных. Такого рода признаки должны удовлетворять следующим условиям:

– наличие формализованных математических описаний для унифицированного автоматического вычисления значений признаков;

- устойчивость к возможному наличию пропусков во временных рядах измерений земной поверхности в связи с сезонным наличием снежного покрова;
- низкий уровень случайного шума в значениях признаков;
- высокий уровень локальной делимости и вероятности правильного распознавания классов на основе совокупного использования признаков;
- применимость в широком диапазоне физико-географических и других условий развития растительности.

Разработанные признаки являются математически формализованным обобщением выявленных устойчивых отличий, характерных для многолетних временных рядов PVI участков растительности различных типов (рис. 6).

Разработанные спектрально-динамические признаки распознавания (таблица 1) включают группы основных ($L_{1/2}$, MSI и $NSMI$) и вспомогательных признаков в зависимости от их роли в решении вышеупомянутых задач.

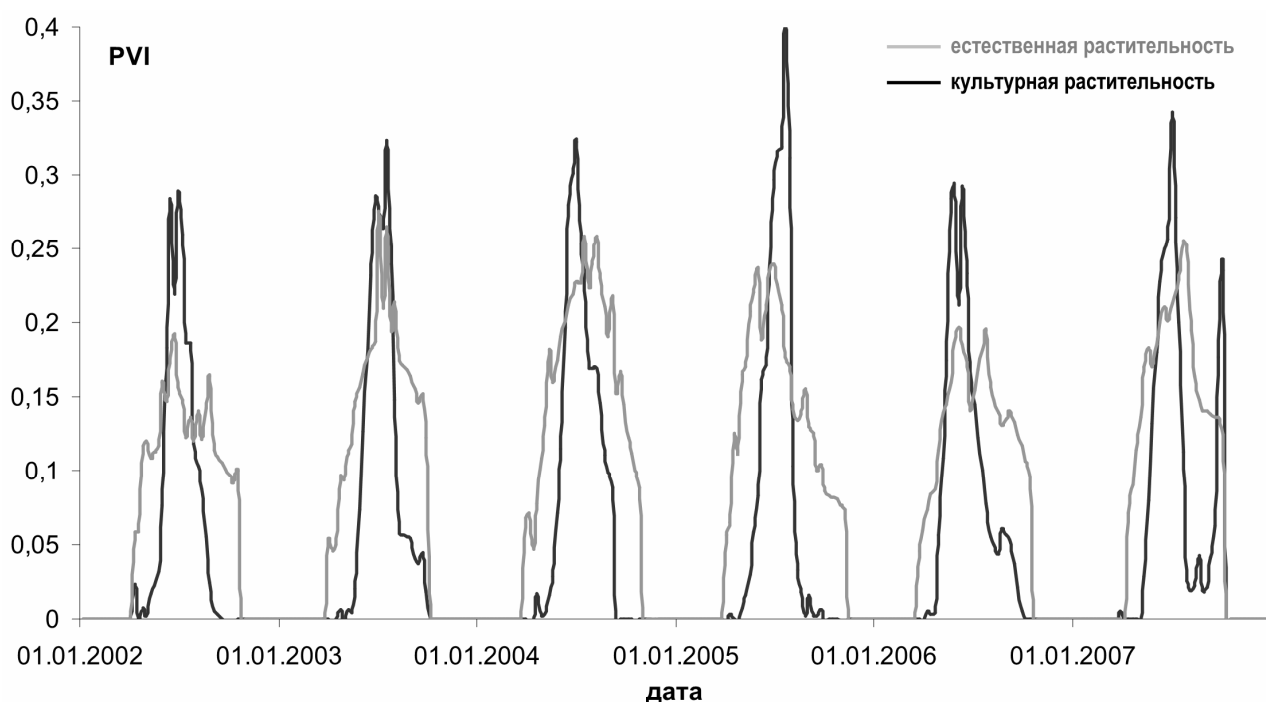


Рис. 6. Примеры многолетней динамики PVI для участков растительности различных типов в одинаковых климатических условиях

Индекс кратчайшего сезона вегетации $L_{1/2}$ информативен для выявления растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития в широком диапазоне условий антропогенного воздействия, приводящего, как правило, к сокращению периода вегетации. Предпосылками для разработки и использования

Таблица 1

Признаки распознавания растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития

Название	Формула	Описание	Особенности				
			D	K	R	C	V
Индекс кратчайшего сезона вегетации	$L_{1/2} = \min_{j=1..N} (t_L^j - t_F^j),$ $PVI(t_L) = PVI(t_F) = \frac{PVI_{\max}}{2},$ $t_L > t_{\max}, t_F < t_{\max}$	Минимальный для ряда лет отрезок времени, когда в течение года значения PVI превышали половину его сезонного максимума	+	–	–	+	–
Индекс весеннего развития растительности	$MSI = \min_{j=1..N} \sum PVI_i, i \in spw$	Многолетний минимум интеграла PVI в период 1 января - 15 июня (spw) каждого года наблюдений	–	+	+	+	–
Индекс сезонного снижения фитомассы	$NSMI = \text{const} - \frac{\sum_{j=1}^N PVI_{\min}}{\sum_{j=1}^N \sum PVI_i}, i \in sw$	Нормированная сумма многолетних сезонных минимумов PVI в период 15 мая - 15 сентября (sw) каждого года наблюдений	+	+	+	–	+
Индекс межгодовых различий динамики растительности	$K = \min_{i,j \in 1..N} (\text{Cor}(PVI(\text{Year}_i), PVI(\text{Year}_j)))$	Минимум всех возможных значений межгодовых корреляций временных рядов PVI	+	+	+	–	–
Индекс межгодовой изменчивости фитомассы	$D = SD \left(\sum_{i=1..N} PVI_j \right)_{\text{Year}_i}$	Стандартное отклонение сумм накопленных за различные годы значений PVI	–	+	+	–	–
Разностный индекс сезонного пика вегетации	$T = \text{Med} (PVI_{\max}^{\text{Year}_j} - PVI_{\text{mean}}^{\text{Year}_j})_{j=1..N}$	Многолетняя медиана разности максимального и среднего значения PVI	+	+	+	+	–

Примечания:

1) В таблице представлены следующие обозначения особенностей признаков:

D – устойчивость к пропускам в данных наблюдений: (+) – устойчив и (–) – неустойчив

K – квантованность значений признака: (+) – слабая и (–) – сильная

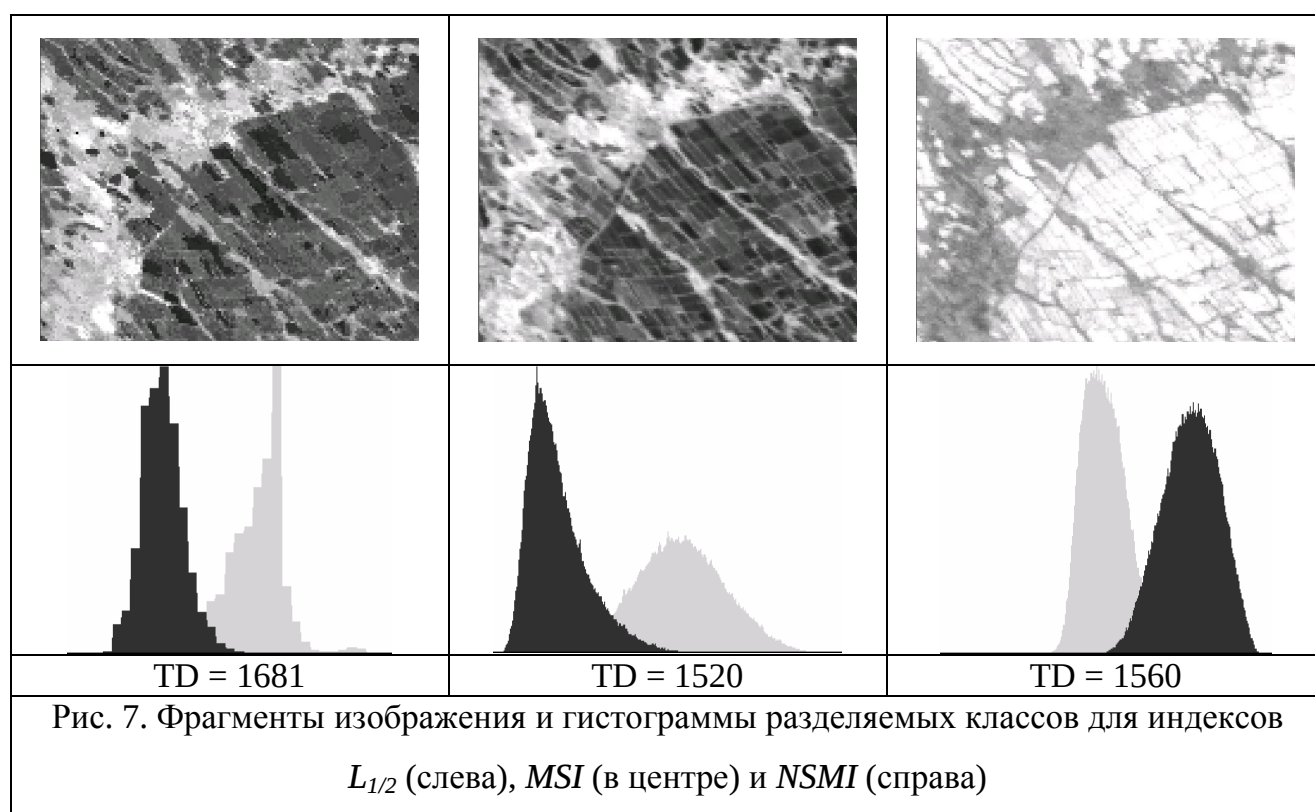
R – динамический диапазон: (+) – широкий и (–) – узкий

C – зашумленность: (+) – низкая и (–) – высокая

V – вероятность перепутывания с участками изменений естественной растительности: (+) – низкая и (–) – высокая

2) В формулах приняты следующие обозначения математических операций: Cor – корреляция; SD – стандартное отклонение; Med – медиана

индекса весеннего развития растительности MSI являются характерные для естественной и культурной растительности различия времени начала роста. В основе индекса сезонного снижения фитомассы $NSMI$ лежит предположение о наличии в течение вегетационного сезона кратковременных периодов, соответствующих состояниям открытой почвы и интенсивного изменения фитомассы.. Региональное использование признаков вспомогательной группы с экспертным выбором оптимальных порогов позволили сформировать опорную выборку для растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития и естественной растительности. Построенная выборка позволила на начальном этапе исследовать пространственную вариабельность значений разработанных признаков и оценить уровень локальной разделимости различных типов растительности. Результаты оценки разделимости классов на основе гистограмм и величин трансформированной дивергенции (TD) показаны на рис. 7.



Примечание: На гистограммах светлый цвет соответствует классу естественной растительности, тёмный – растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития.

Для классификации использован локально-адаптивный алгоритм LAGMA. Ввиду особенностей признаков и комплексного состава выявляемых объектов использовалась схема независимой классификации по каждому признаку с интеграцией получаемых результатов согласно логическому выражению

$AL = R(L_{1/2}) \cap (R(MSI) \cup R(NSMI))$, где AL – результат распознавания класса, $R(X)$ – результат независимой классификации по признаку X . Разработанный метод детектирования типов растительного покрова продемонстрировал свою эффективность и позволил создать автоматизированную технологию ежегодного мониторинга используемых пахотных земель (ИПЗ) на континентальном уровне (рис 8).

Разработанная технология может, в частности, применяться в качестве объективного инструмента независимой оценки качества получаемых традиционными средствами данных ведомственной отчетности (рис. 9). Для валидации метода использовались данные о границах полей Южного федерального округа, полученные на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения. Для количественной оценки точности распознавания ИПЗ был использован метод на основе оптимума Парето, анализирующий величины ошибок первого и второго рода на основе сопоставления результатов распознавания с эталонными данными (рис.10).

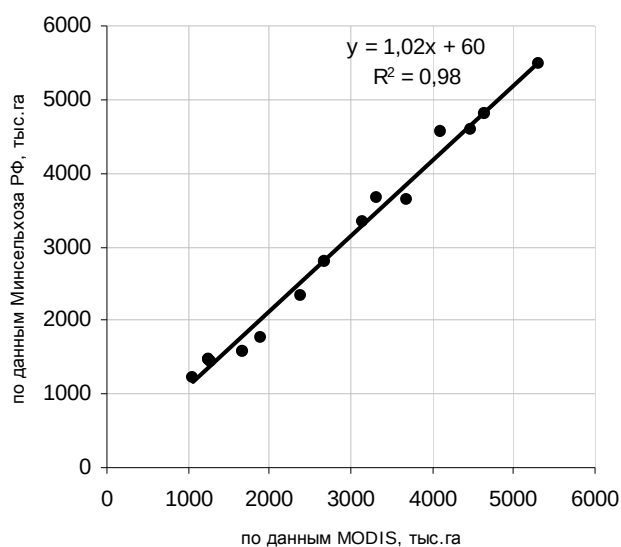


Рис. 9. Сравнение данных дистанционной оценки площадей ИПЗ и ведомственной статистики по субъектам РФ

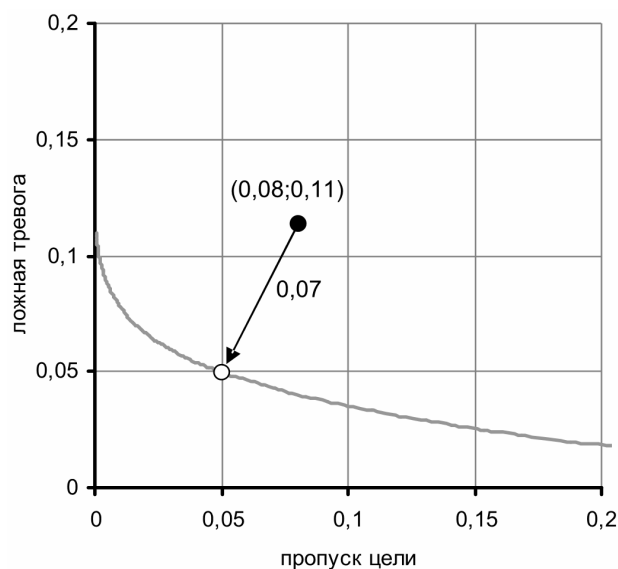


Рис. 10. Кривая оптимума Парето в пространстве ошибок I и II рода распознавания ИПЗ

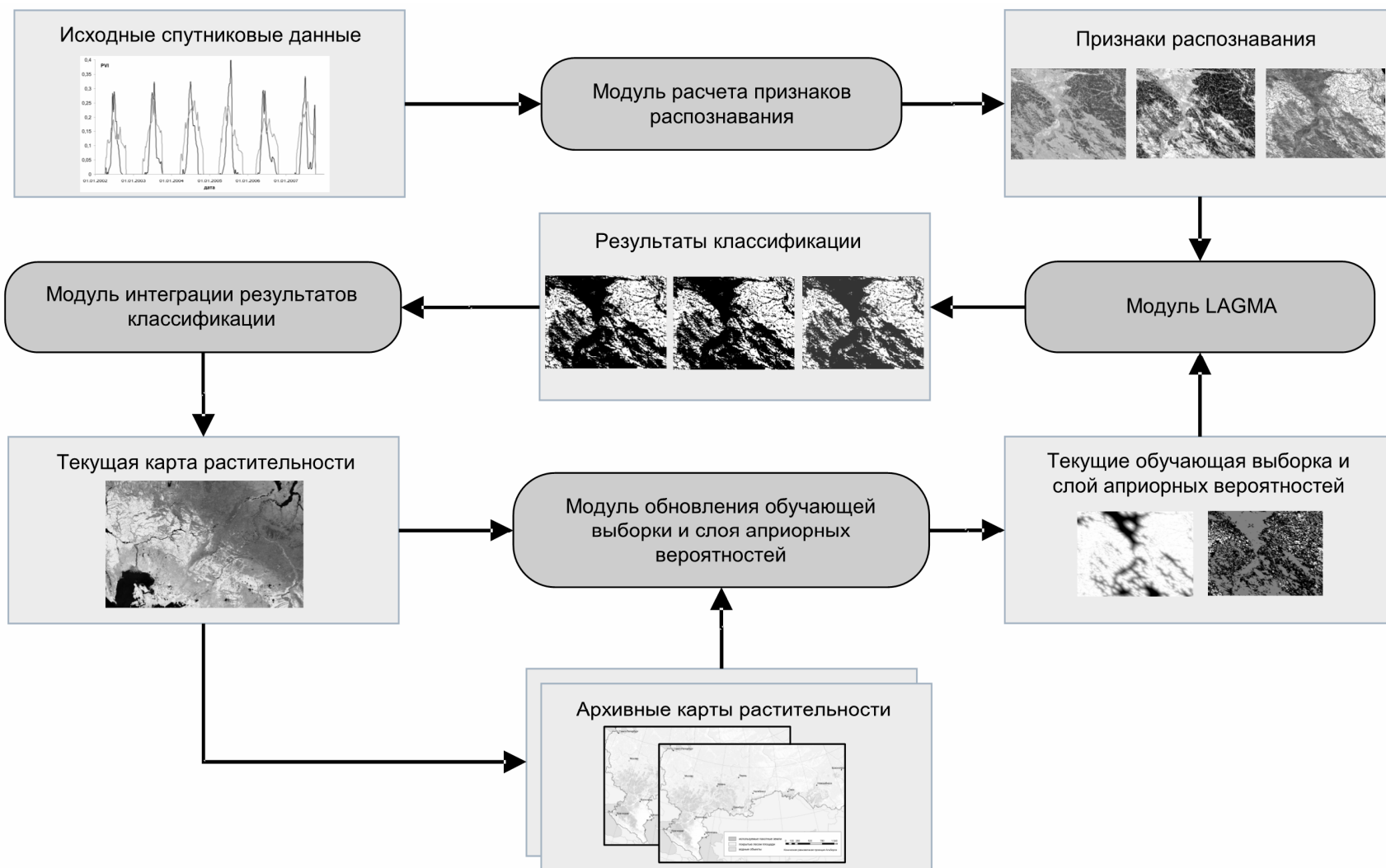


Рис. 8. Технология ежегодной оценки растительности с возмущенной квазипериодической динамикой развития

Точность результатов распознавания растительности характеризуется расположением соответствующей точки в пространстве ошибок первого и второго рода по отношению к задаваемой эталоном линии оптимума. Величина евклидова расстояния (0,07) от точки до кривой оптимума Парето является интегральной мерой ошибки распознавания.

Выполненный на основе разработанной технологии анализ позволил оценить влияние антропогенной трансформации растительного покрова в течение десятилетнего периода на изменение величины спектрального альbedo. Анализ спутниковых данных спектрорадиометра MODIS позволил выявить введенные в период с 2000 по 2010 годы в сельскохозяйственное использование (группа пикселей T_n) и заброшенные (группа пикселей T_a) участки пахотных земель. По результатам разноугловых измерений КСЯ земной поверхности на длине волны 0,87 мкм было получено значение спектрального альbedo A_{IR} участков подстилающей поверхности. Оценка динамики A_{IR} выполнялась на участках изменения режима землепользования по всей территории Российской Федерации (таблица 2).

Таблица 2.

Динамика спектрального альbedo для участков изменений режима
землепользования

Участки изменений	Значение A_{IR} в 2000 году	Значение A_{IR} в 2010 году	ΔA_{IR}
Участки группы T_n	0,2710	0,2688	$-2,2 \cdot 10^{-3}$ (-0,81%)
Участки группы T_a	0,2689	0,2719	$3,0 \cdot 10^{-3}$ (1,12%)
Все изменения	0,2699	0,2704	$0,5 \cdot 10^{-3}$ (0,18%)

Анализ изменений спектрального альbedo земной поверхности указывает на наличие связи его значений с интенсивностью антропогенной трансформации растительного покрова. В частности, можно сделать вывод, что антропогенные возмущения растительного покрова приводят к снижению значений A_{IR} . Интегральное альbedo участков всех изменений растительного покрова с возмущенной динамикой развития демонстрирует рост в течение десятилетнего интервала наблюдений на территории Российской Федерации.

Заключение. Диссертационная работа содержит новые результаты исследований и разработок автора по развитию методов и алгоритмов оценки растительного покрова на основе временных рядов данных спутниковых измерений отраженного излучения. В ходе выполненных в диссертационной работе исследований были получены следующие результаты:

1. разработаны методы предварительной обработки временных рядов данных спутниковых наблюдений, позволяющие минимизировать влияние изменений состояния атмосферы, сезонного присутствия снежного покрова, различий в геометрических условиях наблюдения, аппаратных шумов сенсора;
2. разработаны адаптивные алгоритмы оценки типов растительного покрова на основе амплитудно-фазовых различий и особенностей локально-коррелированной динамики сезонных и многолетних временных серий спутниковых измерений;
3. предложены и исследованы спектрально-динамические признаки распознавания типов растительности на основе многолетних рядов спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектрально-отражательных характеристик земного покрова;
4. на основе разработанных автором методов обработки временных рядов данных спутниковых измерений и адаптивных алгоритмов распознавания создана автоматизированная технология ежегодной оценки типов растительного покрова с возмущенной динамикой развития. Созданная технология позволяет оценивать влияние антропогенной трансформации растительного покрова на изменения спектрального альбедо земной поверхности, а также используется для дистанционного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А. Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Т.7. № 1. С.330-341.

2. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2008. Вып.5. Т.II. С.322-330.
3. Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика, 2011. Т.35. №1. С.103-116.
4. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Жарко В.О., Михайлов В.В., Просяникова О.И. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №1. С.199-208.
5. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №4. С.285-302.
6. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА»). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №1. С.190-198.
7. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Медведева М.А., Плотников Д.Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 года в России). Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т.8. №1. С.150-162.

В других изданиях

8. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А., Савин И.Ю. Использование данных спутникового радиометра MODIS для распознавания пахотных земель, чистого пара и посевов озимых культур // Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения: Материалы Всероссийской научной конференции. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2010. – С.417-422.

9. Плотников Д.Е. Метод оценки площадей сельскохозяйственных культур по данным MODIS на основе локально-адаптивной классификации разновременных композитных изображений вегетационного индекса // VII конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2010. С.46.
10. 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.
11. Барталев С.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Савин И.Ю., Толпин В.А., Фисенко Е.В. Возможности оперативной оценки воздействия засух на состояние сельскохозяйственных посевов в системе дистанционного мониторинга земель агропромышленного комплекса // Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2009. С.273.
12. Плотников Д.Е. Метод ежегодной оценки динамики возделываемых пахотных земель на основе спутниковых данных MODIS // Сборник тезисов VI конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2009. С.34.
13. Bartalev S.A., Loupian E.A., Medvedeva M.A., Plotnikov D.E., Savin I.Y., Tolpin V.A. The Earth Observation Data for Agricultural and Climate Change Relevant Monitoring in Russia // International Workshop on “Impact of Climate Change on Agriculture” Space Applications Centre. ISRO. Ahmedabad, India, 2009.
14. 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.
15. Плотников Д.Е. Методы анализа временных рядов спутниковых данных для классификации растительности при решении задач сельскохозяйственного

мониторинга // V Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2008. С.34-35.

16. Акаткин Ю.М., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Мельник Н.Н., Лупян Е.А., Ляпинков Д.В., Плотников Д.Е., Полищук А.А., Столпаков А.В., Темников В.Н., Толпин В.А. Возможности и перспективы развития системы спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель МСХ РФ // Пятая юбилейная открытая всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2007. С.232.

17. Плотников Д.Е., Барталев С.А. Методы анализа временных рядов спутниковых данных для классификации растительности на примере детектирования озимых культур и степных территорий // Пятая юбилейная открытая всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН. 2007. С.267.

18. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Новая карта растительного покрова России // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Тезисы конференции. М.: ИКИ РАН. 2010. С.7-8.

19. Жарко В.О., Плотников Д.Е., Барталев С.А. Распознавание сельскохозяйственных культур по данным спутниковых наблюдений // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 15-19 ноября 2010. Сборник тезисов конференции, 2010. С.311-312.