

**Программно-алгоритмическое  
обеспечение решения задач распознавания  
природно-техногенных объектов по  
гиперспектральным аэрокосмическим  
изображениям**

**В.В. Козодеров<sup>1</sup>, Е.В. Дмитриев<sup>2</sup>, В.П. Каменцев<sup>3</sup>,  
А.С. Каркач<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова,*

*<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН,*

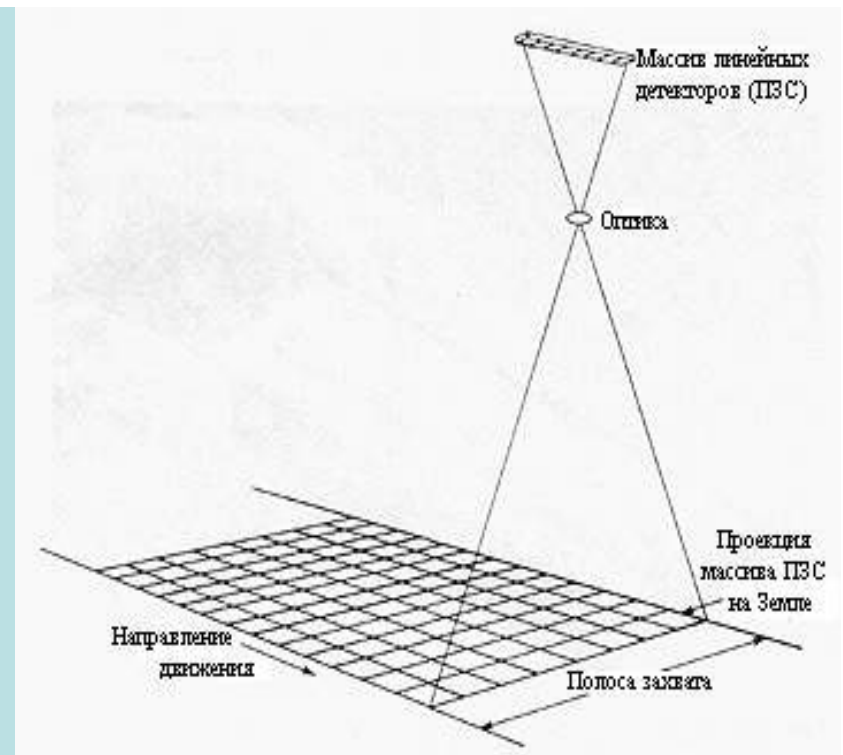
*<sup>3</sup>Тверской государственный университет*

# Содержание доклада

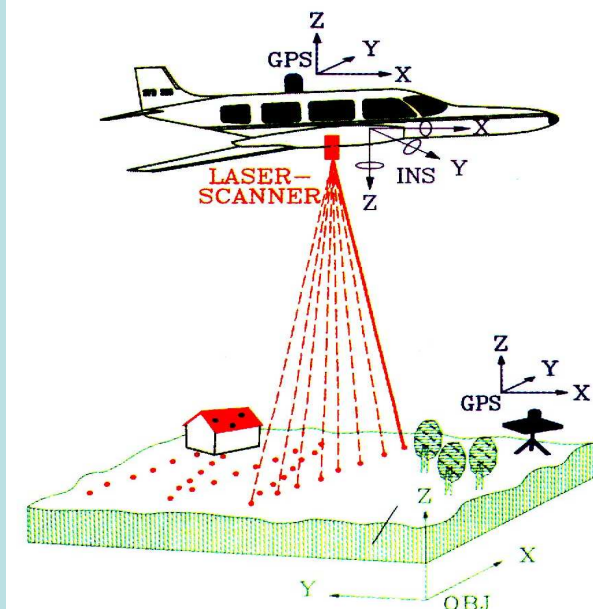
- **Составные элементы информационной технологии решения прикладных задач по данным аэрокосмического зондирования (существующие и новые подходы).**
- **Постановка задач распознавания природно-техногенных объектов (лесные, водные и другие экосистемы, объекты энергетики, лесные и торфяные пожары и т.д.) и оценки параметров состояния лесной растительности по данным гиперспектрального аэрокосмического зондирования (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области с разрешением в единицы нанометра).**
- **Примеры обработки гиперспектральных аэроизображений.**

## Вводные замечания

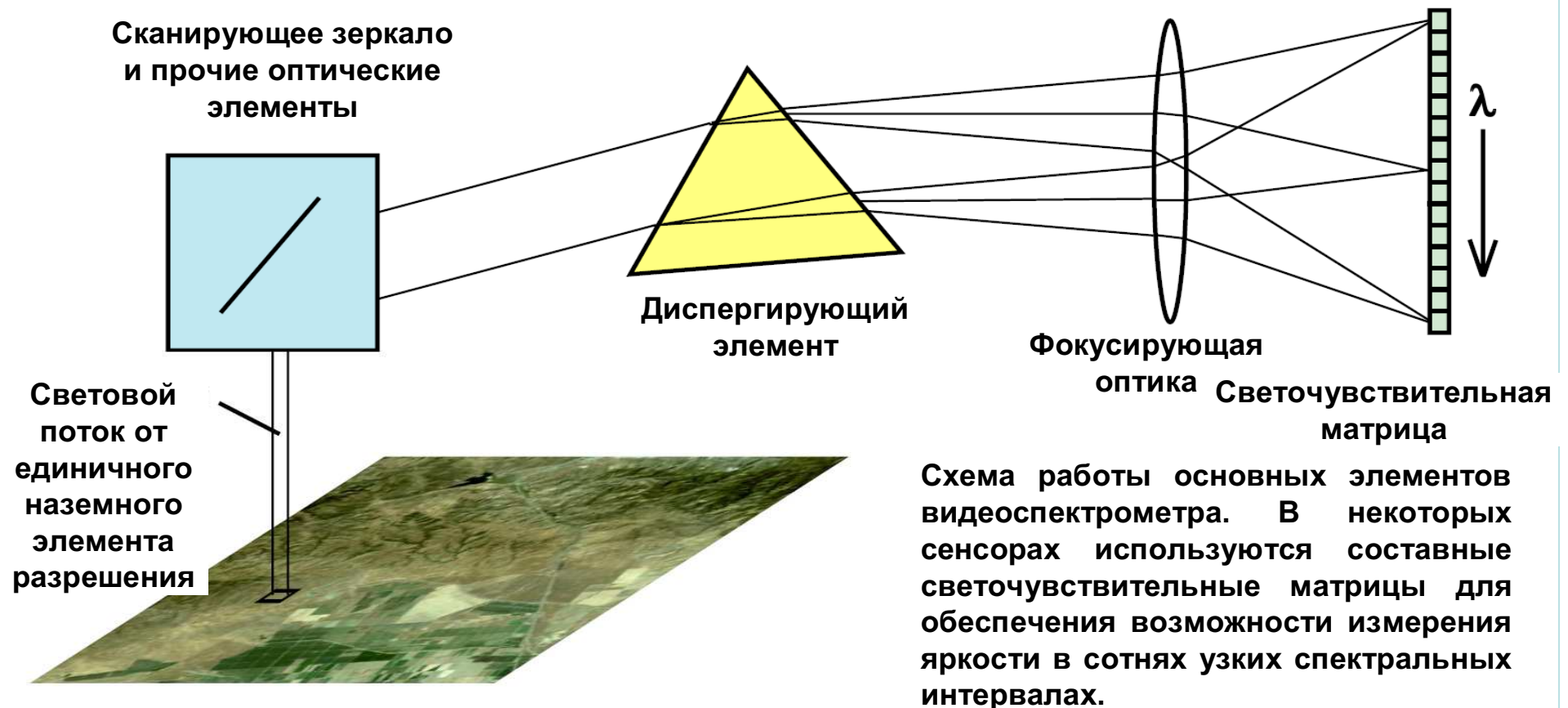
- Создание системы мониторинга экологической ситуации из космоса названо Президентом РФ на заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики (июнь 2011 года) одним из перспективных научно-технологических проектов.
- Мировым сообществом признано два наиболее перспективных подхода для развития приложений по экологическому мониторингу природно-техногенных объектов: использование данных гиперспектрального зондирования (требуется обоснование оптимального числа спектральных каналов для решения возникающих прикладных задач с заданной точностью), а для лесных экосистем использование также данных лазерного сканирования (активные системы) для восстановления вертикальной структуры растительного полога.



LASER-SCANNING



# Гиперспектральное зондирование



# **Существующие приложения данных аэрокосмического мониторинга**

- **Стремление мировых корпораций к созданию систем как можно более высокого пространственного разрешения (лучше 1 м) при сравнительно небольшом числе спектральных каналов. Для приложений используется вычислительная среда ESRI (Environmental Systems Research Institute) – название дано американской компанией, которая существует на мировом рынке уже около 40 лет. Программная составляющая в этой среде невелика по сравнению с вкладом специалистов в области географии, геодезии, картографии и смежных наук.**
- **Роль и место данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования не ясны, но преобладают приложения методов вычислительной математики в среде Matlab, в которой имеются возможности гибкого расширения существующего программного обеспечения обработки данных.**

## **Традиционные и новые технологии**

- **В России использованию данных аэрокосмического зондирования увязывают с ГИС-Ассоциацией, ИТЦ «Сканэкс» и другими дилерами и дистрибьютерами зарубежной космической информации и средств ее обработки (ERDAS, ENVI и др.). Наиболее эффективные решения здесь видятся в распространении программных продуктов и информационной продукции, поставляемых из-за рубежа.**
- **Наша цель - повышение роли отечественных разработок, касающихся моделей формирования уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой гиперспектрального зондирования, для распознавания природно-техногенных объектов и восстановления параметров, характеризующих биологическую продуктивность растительного покрова. Конечная цель – параметризация средообразующей роли лесной растительности в моделях климата.**

## **Реалии тематической обработки данных аэрокосмического зондирования**

- **Традиционные подходы построения «вегетационных индексов» (различных комбинаций измерительных каналов) становятся неэффективными при наличии сотен каналов гиперспектрального зондирования.**
- **Модельное описание формирования регистрируемых данных с помощью решения краевой задачи переноса излучения в системе «земная поверхность – атмосфера» с верхним граничным условием, характеризующим отсутствие на верхней границе диффузно рассеянного излучения, и нижним граничным условием, характеризующим зависимость интенсивности уходящего излучения от интенсивности падающего излучения и оптических свойств объектов земной поверхности, оказывается ограничено применимым для атмосферной среды, но не применимо для уходящего от полога леса излучения. Пытаются и для полога леса ввести свои индексы (например, LAI – Leaf Area Index), привязываясь к теории переноса в предположении мутной однородной среды, но перспективы здесь невелики.**

# Новые подходы

- **Функциональное описание регистрируемых данных гиперспектрального зондирования без упрощенных представлений об однородности лесного полога, но с возможностью привлечения дополнительных экспериментальных данных (для проходящего излучения и объектов разного возраста, породного состава и т.д.).**
- **Обоснование вычислительных процедур распознавания объектов при обработке конкретных гиперспектральных изображений на основе обучающих выборок (samples) с оптимизацией числа спектральных каналов при заданной точности распознавания.**
- **Обращение основного функционала уходящего излучения и восстановление параметров состояния лесной растительности (объема фитомассы листвы/хвои) для каждого элемента разрешения класса «лесная растительность».**



## **Этапы решения прикладных задач обработки гиперспектральных изображений**

- Построение расчетных моделей и алгоритмов решения прямых и обратных задач атмосферной оптики для заданных типов гиперспектральной аппаратуры.**
- Создание оригинального программного обеспечения и информационной технологии распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров состояния лесной растительности с учетом данных дистанционного зондирования и наземных лесотаксационных и других обследований тестовой территории.**
- Запатентован способ решения возникающих прикладных задач; получают авторские свидетельства на отдельные программы обработки данных.**
- Формирование требований к новому поколению гиперспектральной аппаратуры и вычислительным ресурсам обработки данных.**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2422858

**СПОСОБ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИХ СОСТОЯНИЯ ПО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫМ ДАННЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Козодеров Владимир Васильевич (RU)*

Автор(ы): *Козодеров Владимир Васильевич (RU)*

Заявка № 2010104429

Приоритет изобретения **10 февраля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 июня 2011 г.**

Срок действия патента истекает **10 февраля 2030 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*



*Б.П. Симонов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011616810

«Программа первичного анализа гиперспектральных изображений и построения обучающих выборок»

Правообладатель(и): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный университет» (RU)*

Автор(ы): *Дмитриев Егор Владимирович, Каменцев Владимир Петрович, Каркач Арсений Сергеевич, Козодеров Владимир Васильевич (RU)*

Заявка № 2011615000

Дата поступления 7 июля 2011 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

1 сентября 2011 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*

*Б.П. Симонов*

# Модель прямой задачи

Спектральная интенсивность уходящего от лесного полога излучения  
(спектральная плотность энергетической яркости – СПЭЯ, radiance)

$$L(\lambda; B(D_{canopy}, D_{crown})) = [E(\lambda) + H(\lambda)] \{ (1 - D_{canopy} - \delta_1) \rho_1(\lambda) + \\ + (D_{canopy} - D_{canopy} D_{crown} - \delta_2) \rho_2(\lambda) + \\ + D_{canopy} D_{crown} \rho_3(\lambda) \} \tau_a(\lambda) + L_b(\lambda),$$

$E(\lambda) = S_0(\lambda) \cos \theta_0 \tau_s(\lambda)$  – спектральный поток (освещенность объекта, irradiance) падающего на полог прямого излучения при зенитном угле Солнца  $\theta_0$ , пропускании атмосферы  $\tau_s(\lambda)$  и исходном потоке на верхней границе атмосферы  $S_0(\lambda)$ ;

$H(\lambda)$  – поток диффузно рассеянного излучения, приходящего со всех участков небесной сферы;

три слагаемых в фигурной скобке {...} описывают соответственно: межкрановую, крановую части и многократное рассеяние излучения внутри полога, которые попадают в поле зрения аппаратуры, имея спектральные отражательные способности  $\rho_1(\lambda)$ ,  $\rho_2(\lambda)$ ,  $\rho_3(\lambda)$  и доли теней между кронами и на кронах ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ) при плотности полога  $D_{canopy}$  и «ажурности» крон деревьев  $D_{crown}$  соответствующего породного состава;  $B$  - объем фитомассы листвы/хвои;

$\tau_a(\lambda)$  – атмосферное пропускание на трассе от объекта до аппаратуры;

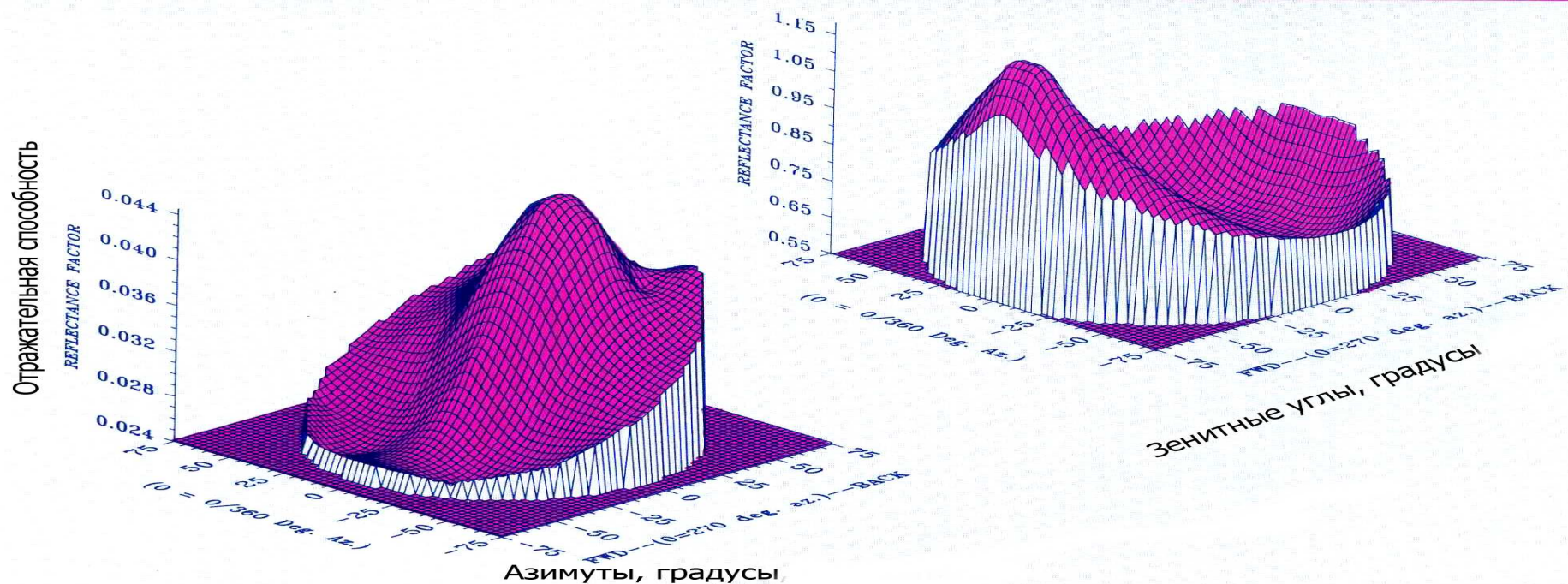
$L_b(\lambda)$  – фоновая компонента атмосферы и объекта (path radiance).

Типичные предположения о сплошном однородном покрове без теней в поле зрения аппаратуры ( $D_{canopy} = 1, D_{crown} = 0, \delta_1 = \delta_2 = 0$ ), а также  $\tau_a(\lambda) = 1, L_b(\lambda) = 0$  приводят к выражению

$$L(\lambda) = [E(\lambda) + H(\lambda)] \rho(\lambda),$$

в котором  $\rho(\lambda, \theta_0; \theta, \phi, \theta', \phi')$  – бинаправленная функция отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF) при зенитном угле Солнца  $\theta_0$ , зенитных углах падения ( $\theta'$ ), отражения ( $\theta$ ) излучения  $H(\lambda)$  и соответствующих азимутах ( $\phi, \phi'$ ) вводит угловые координаты ( $\theta, \phi$ ) в значения СПЭЯ.

При ортотропном отражении  $\rho(\lambda) = r(\lambda)/\pi$ ,  $r(\lambda)$  – коэффициенты спектральной яркости. Пример из работы D.Deering. Theory and Applications of Optical Remote Sensing. John Wiley and Sons, 1989 демонстрирует: слева - наличие обратного отражения (hot spot) растительности в шт. Канзас в полдень (Солнце падает справа), справа – наличие зеркального отражения песков в пустыне White Sands утром.



# Модель формирования регистрируемых спектров

На основе значений  $L_{ccd}(\lambda) = L(\lambda) \tau_o(\lambda)$ , где  $\tau_o(\lambda)$  – пропускание оптической системы ПЗС-матрицы (Charge Compactable Device - CCD) спектры в каждом из  $k = 1, \dots, K \sim 200$  каналов формируются в виде

$$x_k = \zeta_k \int_{\Lambda_k} L_{ccd}(\lambda) A(\lambda) d\lambda,$$

где значения  $\zeta_k$  учитывают влияние углов визирования ПЗС-матрицы для каждого из спектральных каналов шириной  $\Lambda_k$  и аппаратной функцией

$$A(\lambda) = \alpha(\lambda) F(\lambda) + \beta(\lambda),$$

$\alpha(\lambda)$  - спектральный коэффициент усиления регистрируемого сигнала при заданной функции спектральной чувствительности  $F(\lambda)$  и шумовой составляющей аппаратуры  $\beta(\lambda)$ .

Для интерпретации спектров  $x_k$  надо иметь:

наземные спектрофотометрические значения потоков  $E(\lambda) + H(\lambda)$  для заданного тестового участка;

какие-то сведения об отражательных характеристиках объекта ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ );

знать свойства гиперспектральной аппаратуры:  $\zeta_k, \tau_o(\lambda), A(\lambda)$ .

## Принципы распознавания объектов по гиперспектральным изображениям:

- Каждый спектр  $x = (x_1, \dots, x_K)$  как вектор отображается точкой в многомерном (порядка 200) признаковом пространстве.
- Множество точек для близких по спектральным признакам классов объектов могут кластеризоваться (сгущаться) в этом пространстве.
- Задача распознавания (классификации и идентификации) объектов на обрабатываемом изображении сводится к нахождению границ между разными классами. Например, при бинарной классификации множество всех спектров  $x_i$  разделяется на два класса в соответствии с выбранными признаками  $y_i$  нахождения решающей (дискриминантной) функции.
- При отсутствии каких-либо сведений о наблюдаемых объектах используются процедуры кластер-анализа без обучения по тестовой выборке. При наличии априорных сведений об объектах реализуются вычислительные процедуры классификации с обучением.

## Суть вычислительных процедур классификации объектов с обучением:

- Отображение пространственного распределения пикселей всех каналов (например, путем RGB-синтезирования спектров) для получения априорных сведений об объектах.
- Оконтуривание объектов интереса на синтезированном изображении, отбор обучающих пикселей внутри контуров, нахождение средних спектров  $x_i$  (число  $i$  может быть разное для разных классов) и их меры изменчивости.
- Нахождение коэффициентов связи между спектрами  $x_i$ , используемыми для обучения, и признаками объектов  $y_i$ : например, разделение по знаку  $+1$  или  $-1$  при бинарной классификации в модели линейного дискриминатного анализа  $y_i = \langle wx_i \rangle + b$  при наличии скалярного произведения  $\langle \dots \rangle$  векторов, когда, решая систему линейных алгебраических уравнений, требуется найти набор  $(w, b)$ , характеризующий наклон разделяющей гиперплоскости относительно начала координат многомерного пространства.
- Экстраполяция полученной зависимости на все элементы изображения (пиксели).



# **Исходные данные обработки**

- Гиперспектральные изображения в около 200 спектральных каналах от 400 нм до 1000 нм с разрешением около 1 нм в коротковолновых каналах и 5-10 нм – в длинноволновых каналах. Высота полета 1.5-2 км, пространственное разрешение аппаратуры порядка 1-2 м.**
- Синхронные аэрофотоизображения зондируемой территории.**
- Картосхемы наземных лесотаксационных обследований территории в виде отдельных кварталов и выделов внутри них.**

# **Специфика обработки данных гиперспектрального зондирования**

- В регистрируемых спектрах наблюдается множество линий и полос поглощения солнечного излучения зондируемыми средами (атмосфера и подстилающая поверхность), их идентификация характеризует микроуровень взаимодействия излучения с молекулярными соединениями этих сред.**
- Требуется распознавание объектов на макроуровне их описания с помощью линейных или нелинейных уравнений связи спектральных признаков объектов и текущих данных, относящихся к обучающим пикселям, но возникают сложности решения соответствующих уравнений для такого большого числа спектральных каналов вследствие существования корреляций между каналами.**

## Разные типы классификаторов

- **Линейный дискриминантный анализ (Linear Discriminant Analysis/LDA) – пример простейшего классификатора, требуется найти матрицу коэффициентов линейного преобразования (строки – обучающие пиксели, столбцы – размерность пространства) при минимизации внутриклассового расстояния и максимизации межклассового расстояния для наблюдаемого множества точек многомерного пространства.**
- **Более современные классификаторы (например, метод опорных векторов, Support Vector Machine/SVM) при разделении опорных векторов и относящихся к объектам-нарушителям обеспечивают точность распознавания более 90% и возможности распараллеливания вычислений.**

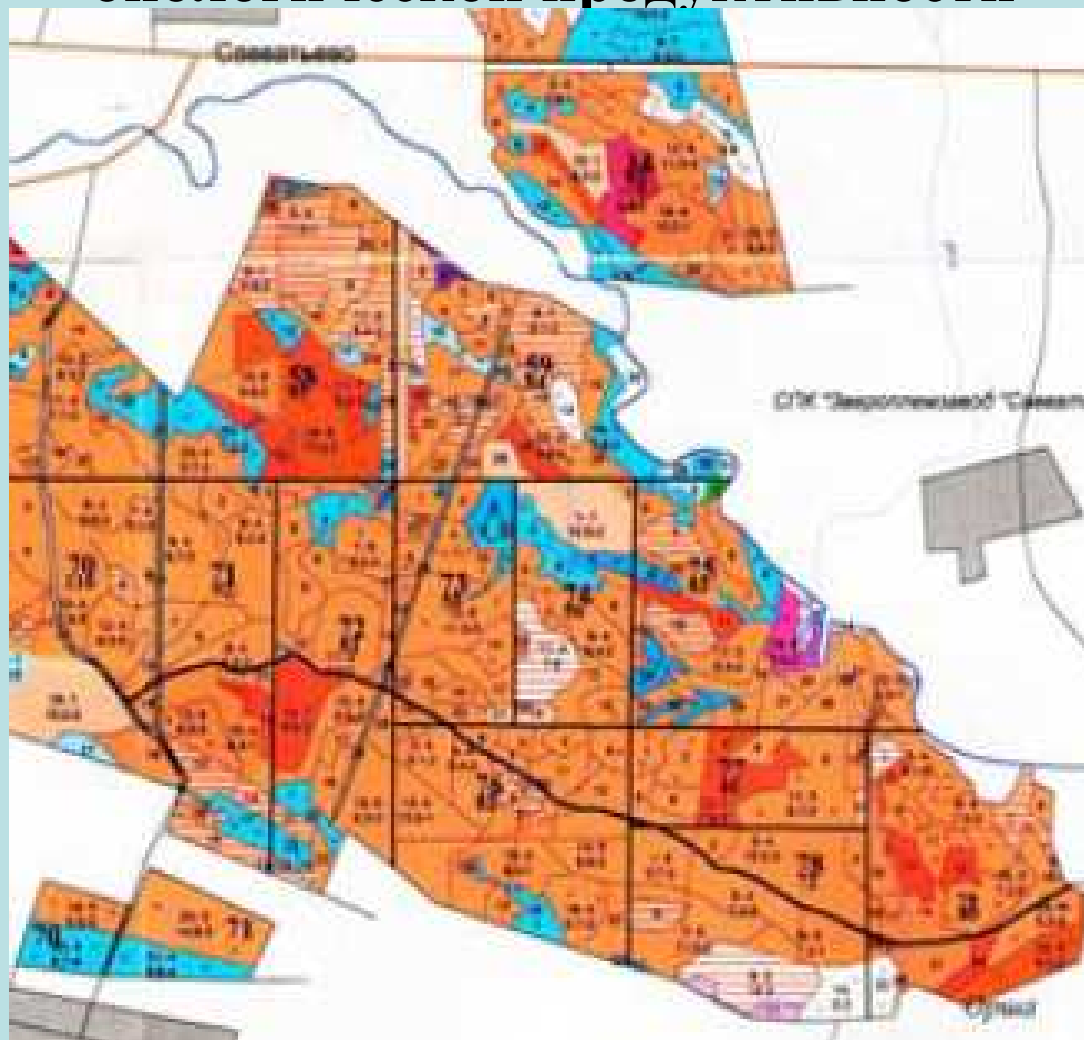
# **Особенности используемых классификаторов**

- **Преимущество метода LDA – наглядность построения границы между классами в предположении многомерного нормального (гауссовского) распределения векторов при известных средних значениях и ковариационной матрице для каждого класса, но при нарушении этих предположений точность данного классификатора невелика.**
- **Использование классификатора SVM важно при реализации параллельных вычислений на многопроцессорных компьютерных системах в процессе решения задачи квадратичного программирования для нахождения седловой точки функции Лагранжа при максимизации зазора (margin) между двумя параллельными гиперплоскостями и минимизации суммы ошибок всех объектов-нарушителей.**
- **Возможности метода квадратичного дискриминантного анализа до конца не ясны, но в некоторых случаях точность метода приближается к точности метода SVM.**

## **Этапы обработки иллюстрируемых ниже данных гиперспектрального аэрозондирования**

- Создание специальных программ RGB-синтезирования обрабатываемых гиперспектральных изображений для выделения на них контуров характерных объектов по данным наземных лесотаксационных и других обследований территории (априорная информация).**
- Создание специальных программ выделения спектров всех пикселей в пределах отобранных контуров.**
- Реализация собственно программ распознавания объектов разными методами.**
- Восстановление параметров лесной растительности (объем фитомассы и др.) для каждого пикселя класса «растительность».**

**Существующие возможности наземной валидации получаемой информационной продукции обработки гиперспектральных изображений: лесотаксационные данные; лесотипологическая характеристика; геоботанические описания; данные по биологической продуктивности**



# Лесотаксационные данные

- **Наиболее стандартизованный вид наземных работ, имеются нормативные методы и приборы, существуют тысячи наименований нормативно-справочных материалов (числовые таблицы, графические материалы, математические модели), в которых учитываются общие и региональные особенности роста и продуктивности лесов.**
- **Данные лесотаксации отображаются на картосхемах по отдельным кварталам и выделам внутри них. В идеале для каждого выдела фиксируется преобладающий породный состав древостоя, занимаемая площадь, возраст и бонитет – характеристика качества древостоя, которая строится на основе утверждения, что дерево определенной породы должно вырасти к определенному возрасту на определенную высоту.**
- **Измеряемые характеристики – запас древесины (объем ствола), высота (как функция возраста и бонитета), полнота (степень заполнения древостоями выбранного участка).**

# Лесотипологическая характеристика

Отличается большим разнообразием; содержит сотни уникальных понятий, относящихся к межкроновой растительности (болотный, кустарниковый, разнотравный, сфагновый, черничник, брусничник и т.д.). Для практических приложений интерес представляет связь этих описаний с бонитетом древостоя, но такие записи при наземных обследованиях делаются не всегда.





# Геоботанические описания

**В пределах каждого выдела с учетом рельефа местности, почвенного покрова, ярусов древесной травянисто-кустарниковой, мохово-лишайниковой растительности дается информация о породном составе (приспевающие, спелые, перестойные деревья): сосняки, ельники, березняки, ольшаники и др.; подрост; подлесок; преобладающие виды покрова (мхи, лишайники, злаки, хвощи и т.д.).**



**Наиболее полные данные наземной  
лесоинвентаризации отдельных участков содержат  
информацию:**

**KZEM** - тип произрастания леса

**KV** - номер квартала

**VD** - номер выдела

**PL** - площадь выдела, га

**ZAPGA** - объемы древесины на выделе, м.куб.

**VOZ** - возраст основной породы, лет

**BON** - бонитет (чем больше значение, тем хуже качество  
древесины)

**Q** - плотность произрастания

**TL** - тип леса по травяному покрову: СФ-сфагновый; ДМ-  
долгомошник ЧЕР-черничник; БР-брусничник; ПРЧ-  
приручьевой;

**D** - диаметр, см

**H** - высота, м

**SOSTAV** - породный состав (цифра - процентное соотношение  
пород на выделе)

## **Данные по биологической продуктивности**

- **Оценки чистой первичной продукции (Net Primary Productivity - NPP) производятся научными группами исследователей, т.к. использование этих данных далеко не всегда относится к повышению эффективности ведения лесного хозяйства (лесоустройства), а к изучению средообразующей роли лесов, включая моделирование процессов обмена веществом и энергией с окружающей средой.**
- **Имеющаяся база исследований – построение моделей отношения фитомассы фракций (листва/хвоя, ветви и т.д.) к запасу древесины как некоторых функций (обычно показательной и экспоненциальной) от класса бонитета, возраста и относительной полноты древостоя. При построении моделей используются известные таблицы хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии (В.А.Усольцев, 1988; А.И.Уткин, 1997; А.З.Швиденко, 2002 и др.).**

## **Традиционное использование**

### **многоспектральных спутниковых данных:**

- подсчет площадей гарей от лесных пожаров, рубок, других возмущений лесных покровов (лесоповал, воздействия насекомых-вредителей и др.);**
- определение лесистости (отношения площади наличия лесов к общей площади территории).**

**Категория лесистости входит в современные модели оценок депонирования и высвобождения углерода в моделях климата без детализации породного состава, возраста и полноты древостоя и т.д.**

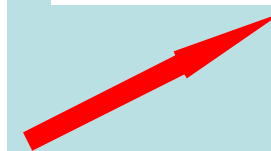
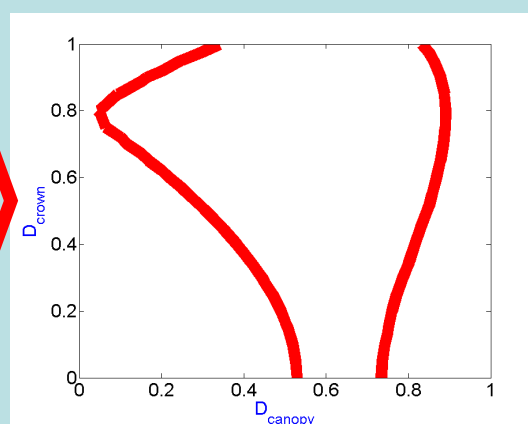
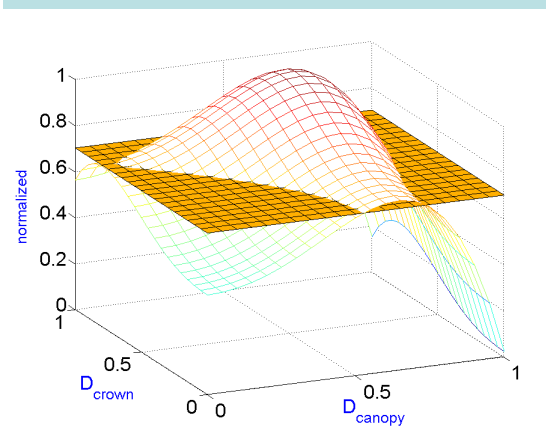
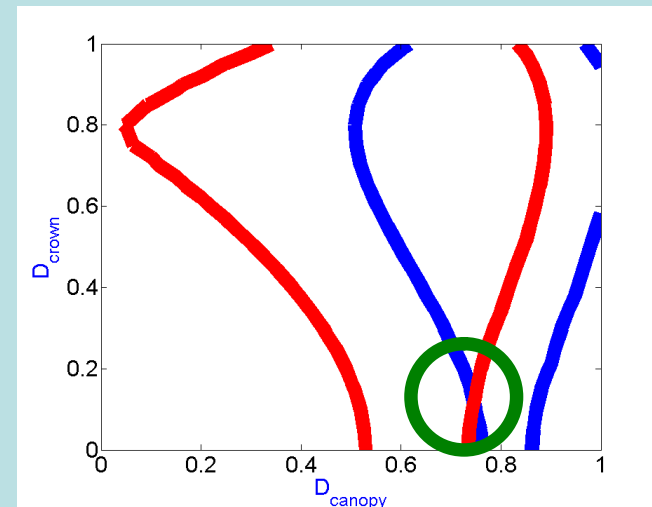
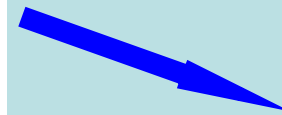
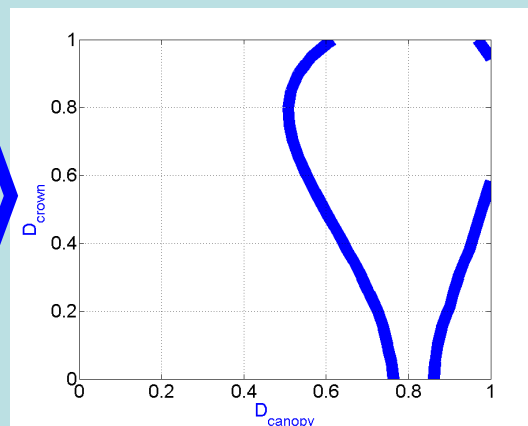
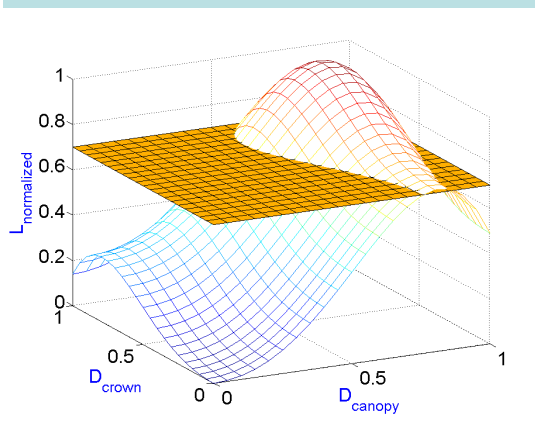
## **Новые задачи использования данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования для понимания средообразующей роли лесов**

- Обоснование реальных возможностей классификации гиперспектральных изображений при использовании высокопроизводительных вычислительных средств.**
- Переход от имеющихся упрощенных описаний к более реалистичной картине тепло-, влаго-, энерго- и массообмена между пологом леса и атмосферой.**
- Улучшение параметризации соответствующих процессов для перехода от ключевых параметров (фитомасса листвы/хвои в координатах «плотность полога и ажурность крон»), восстанавливаемых для каждого элемента гиперспектрального изображения класса «лесная растительность», к характеристикам биологической продуктивности (NPP и др.).**

**Восстановление фитомассы листьев: находится пересечение расчетных кривых в разных каналах и минимальное расстояние до ближайшей изолинии  $B$  с заданной точностью поиска решения  $\Delta$ :**

$$L = L(D_{canopy}, D_{crown}, \dots \text{остальные переменные} \dots) \quad B = B(D_{canopy}, D_{crown})$$

$$|L_{measured} - L_{simulated}| < \Delta \longrightarrow B$$



# Выходная продукция модуля решения обратной задачи (для каждого элемента обрабатываемого изображения)

1. Тип объекта. 1 – растительность, 2 – вода, 3 – облака, 4 – городская застройка, 5 – почво-грунты.
2. Прозрачность атмосферы. 4 градации.
3. Объем фитомассы листьев деревьев. Значения изменяются от 0 до 35 т/га.
4. Оценка среднеквадратичной ошибки определения фитомассы.
5. Тип леса. Всего 11 классов: 1 – полностью лиственный, ..., 11 – полностью хвойный.
6. Тип межкроновой растительности. Выделяется 8 классов объектов.
7. Изрезанность верхней границы леса: 1 - ровная граница, т.е. деревья имеют примерно одинаковую высоту, 3 - сильно изрезанная граница.
8. Сомкнутость полога. Заполненность элемента разрешения кронами деревьев.
9. Ажурность крон деревьев. Характеристика заполнения кроны фитоэлементами.
10. Площадь проективного покрытия. Заполненность поверхности почвы фитоэлементами растений при рассмотрении сверху.
11. Доля поглощенной фотосинтетически-активной радиации. Относительная часть солнечной радиации в диапазоне 380-710 нм, поглощенной листьями деревьев при фотосинтезе.
12. Чистая первичная продукция. Масса углерода, поглощенного растениями из атмосферы на единичной площади в единичный период времени за вычетом дыхания.

**Фотосинтетически-активной радиацией (ФАР)** называют ту часть солнечной радиации, которая поглощается растением при фотосинтезе (диапазон длин волн 380 - 710 нм - в российских работах, 400 - 700 нм - в зарубежных работах).

Для расчета **доли поглощенной ФАР** в нашей модели применяется следующее соотношение

$$FAPAR = A * F * [1 + R * (1 - (1 - T) * F)]$$

где  $A=A(\text{Тип леса})$  – коэффициент поглощения фитоэлементами деревьев различного типа,  $F$  – значение площади проективного покрытия, рассчитанное в нашей модели,  $R=R(\text{Тип межкр. растит.})$  – коэффициенты отражения межкрасной растительностью различного типа,  $T=T(\text{Тип леса})$  – коэффициент пропускания фитоэлементами деревьев различного типа.

**Чистая первичная продукция (Net Primary Productivity - NPP)** - это масса углерода, поглощенного растениями из атмосферы на единичной площади в единичный период времени за вычетом дыхания растений.

На основе нашей технологии восстановления фитомассы листвы/хвои по данным гиперспектрального зондирования возможно использование следующей параметризации, адаптированной к растительности восточно-европейской части России (данные по сосне, ели, березе, клену, осине и ясеню)

$$Y = (1 - W) \left( \frac{X}{B_{deciduous}} \right)^{A_{deciduous}} + W \left( \frac{X}{B_{conifer}} \right)^{A_{conifer}}$$

$Y$  – чистая первичная продукция (текущий прирост углерода в г/м<sup>2</sup>/год),  $X$  фитомасса (в т/Га),  $W$  – процент хвойного леса в лиственном,  $A$  и  $B$  – параметры ( $A < 1$ ).

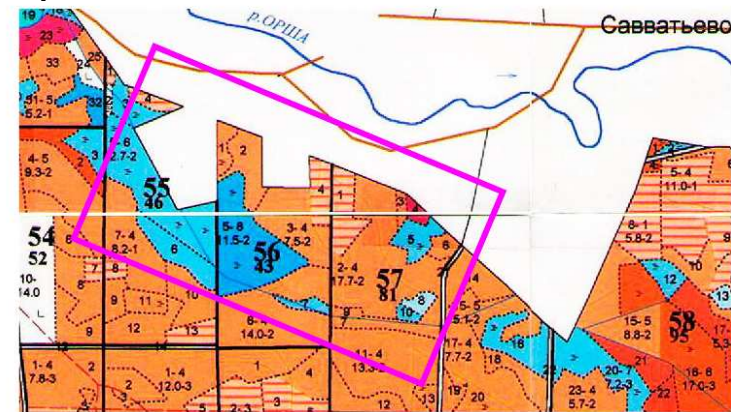


## Распознавание объектов при разном спектральном разрешении (квадратичный дискриминантный анализ)

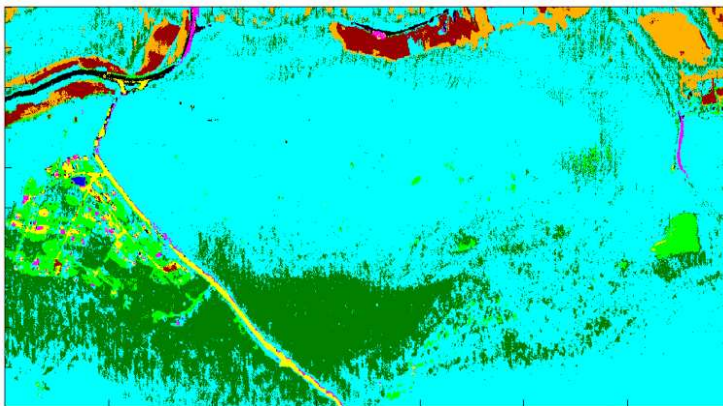
a)



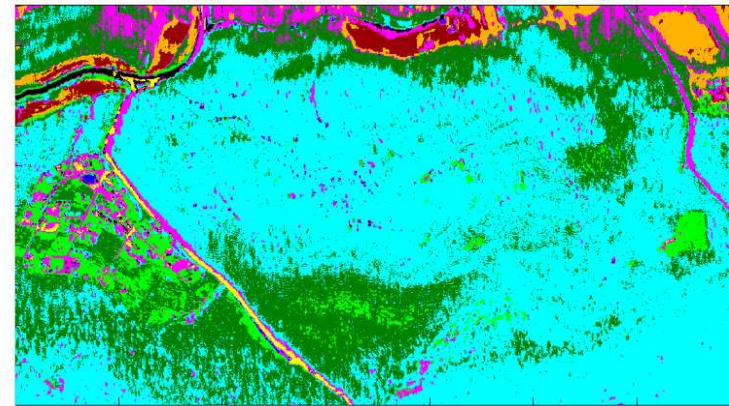
b)



c) hyperspectral

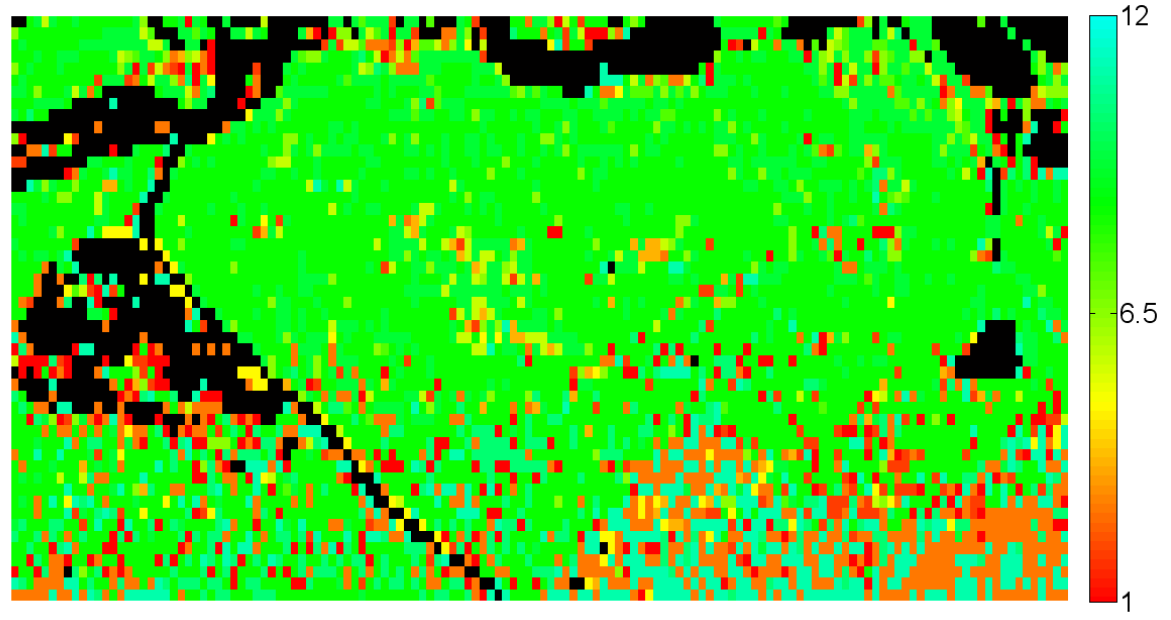


d) multispectral

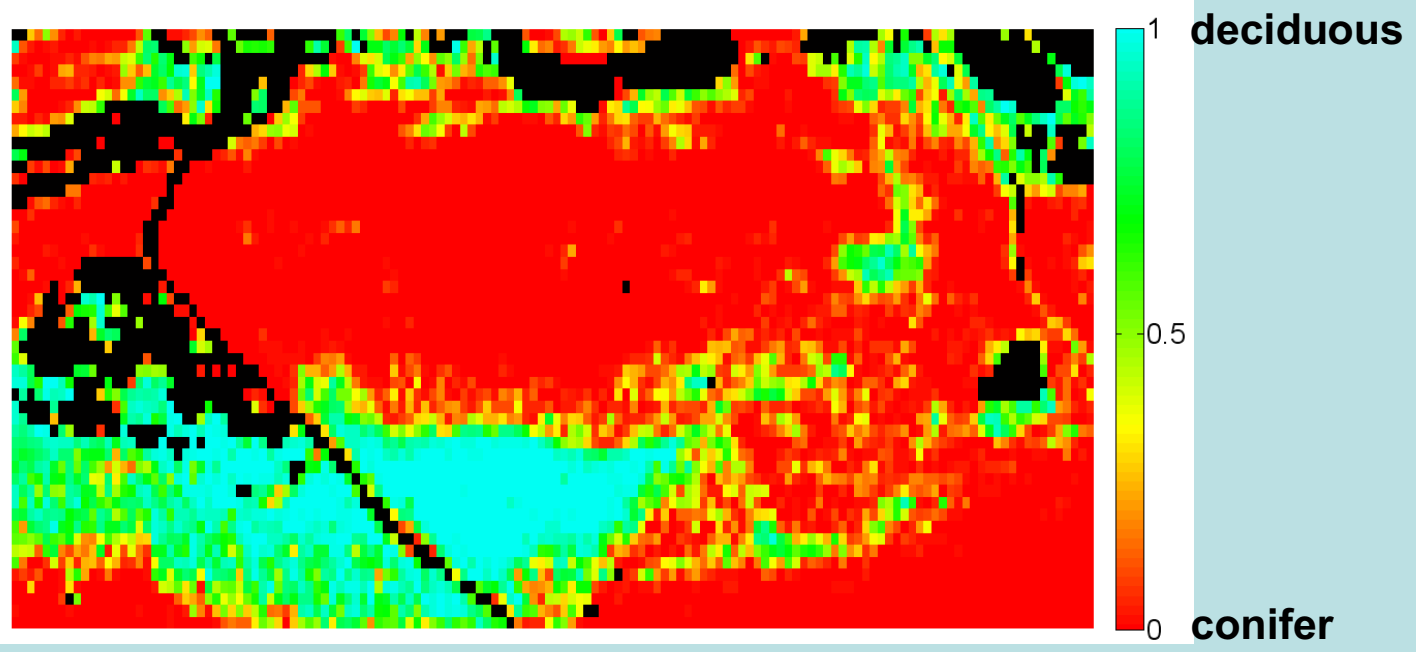


(a) – RGB; (b) – картосхема лесотаксации, синий цвет – преобладание березы, коричневый - сосны; (c) – распознавание по 48 каналам (разрешение 10 нм); (d) – распознавание по 6 каналам (разрешение 100 нм).  
Цвета для (c) и (d): синий – вода, черный – асфальт, желтый – песок, темно-красный – открытые почвы, оранжевый – трава, светло-зеленый – молодые березняки, темно-зеленый – спелые березняки, цвет морской волны – спелые сосняки, фиолетовый – другие объекты.

Intercrown vegetation type

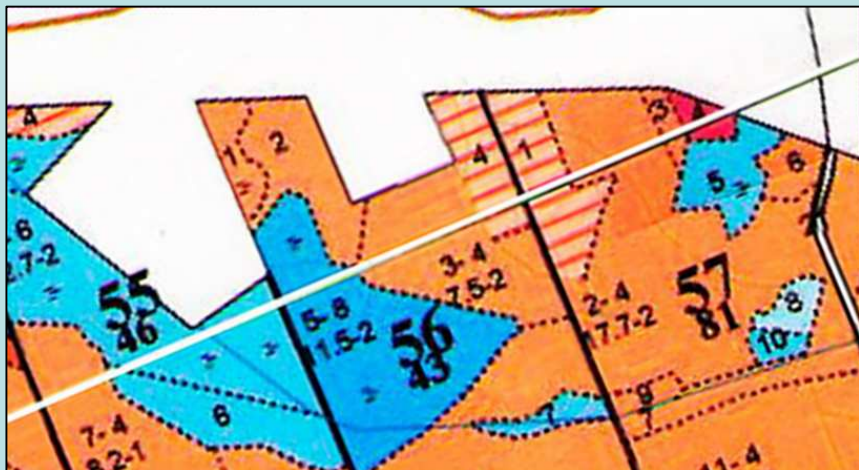


Forest type

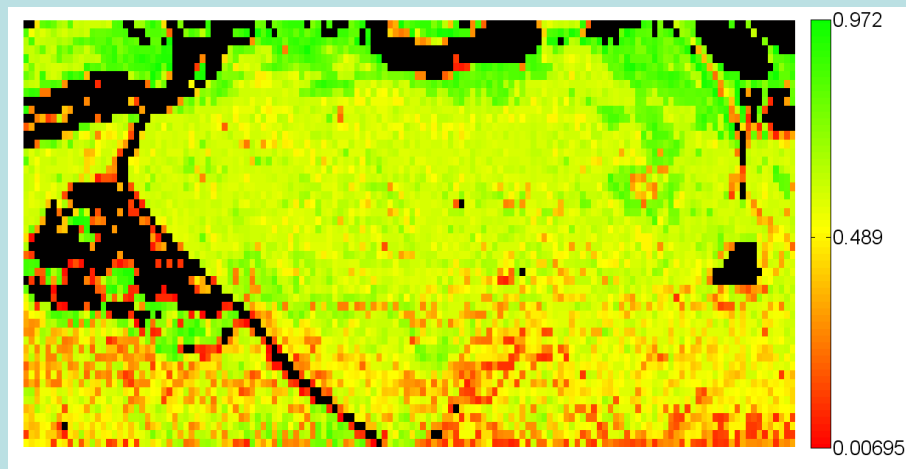


# Восстановленные характеристики лесной растительности

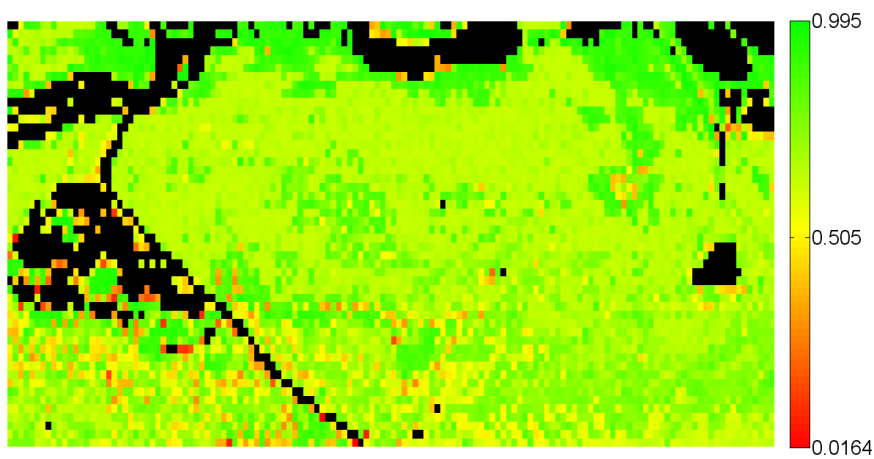
Карта лесотаксации



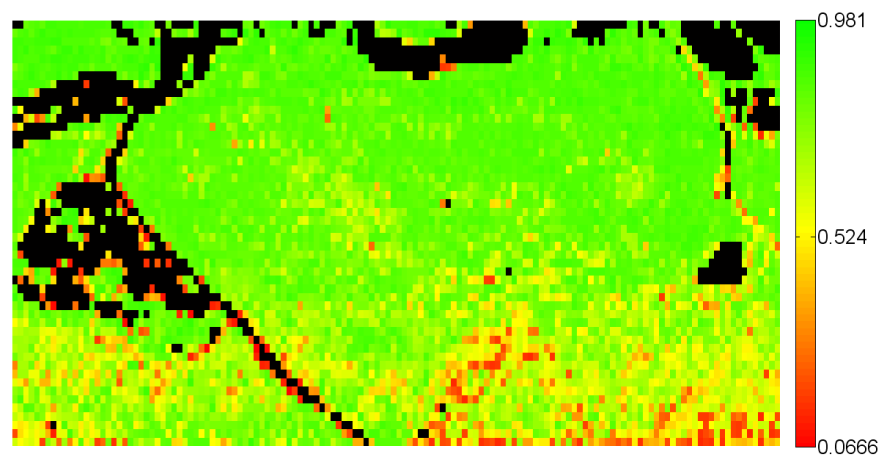
Проективное покрытие



Плотность полога



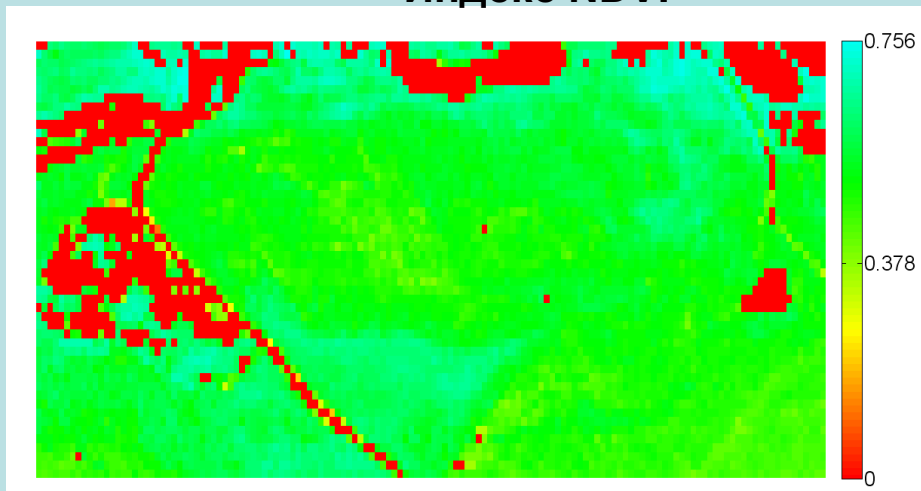
Ажурность крон



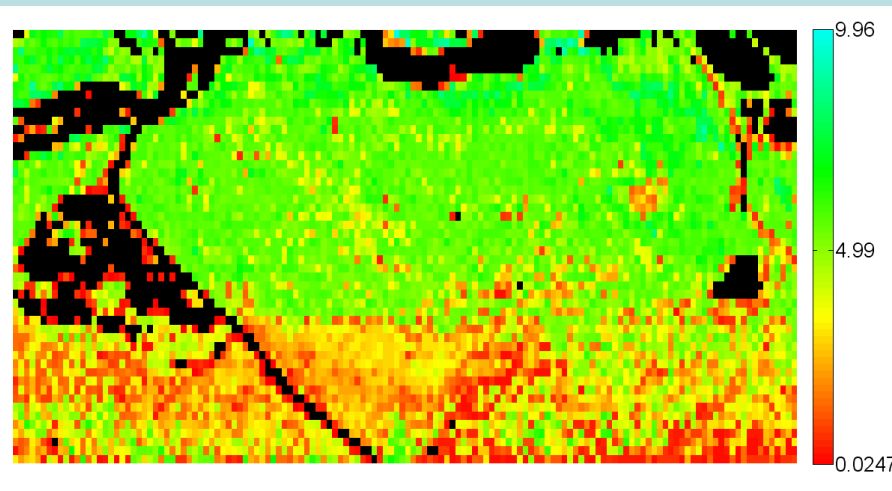
Черный цвет – нелесные объекты

# Восстановленные характеристики биопродуктивности

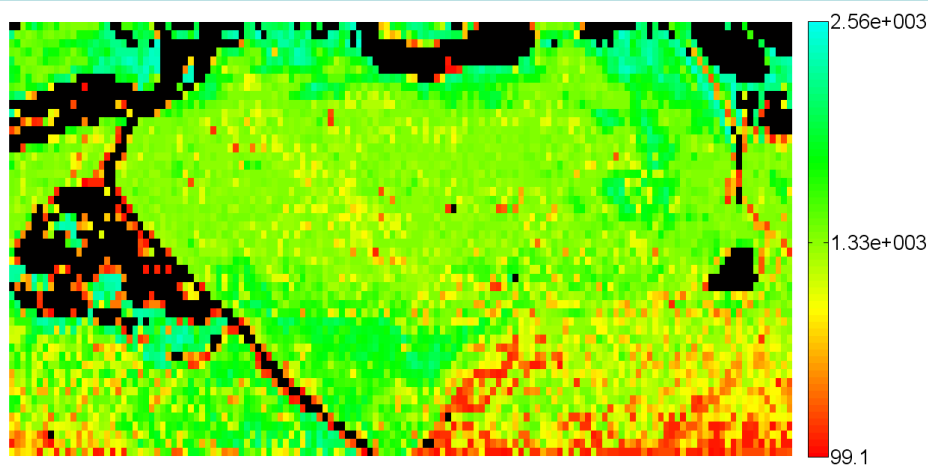
Индекс NDVI



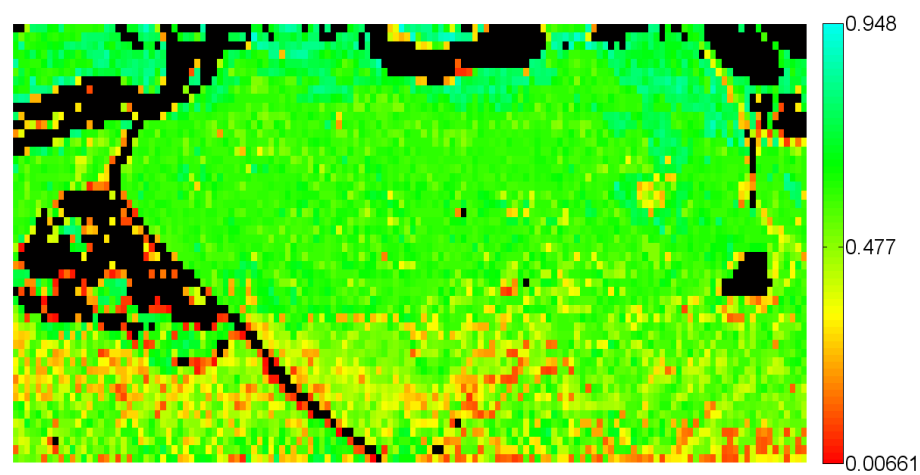
Биомасса листьев, т/га



NPP, г С/м2/год



FAPAR, доля поглощенной ФАР



# **Заключение**

**Отрабатываются элементы технологии обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования, отличительная особенность которой – максимальное использование наземных экспериментальных данных и усовершенствованных модельных описаний взаимодействия солнечного излучения с пологом леса разной структуры вместо традиционных моделей переноса излучения в растительном покрове, имеющих существенные ограничения.**

**Вместо индексов NDVI и др., ограничивающих реальные возможности гиперспектрального зондирования, предлагается задействовать методы вычислительной математики для оптимизации числа спектральных каналов, реализующих решение прикладных задач распознавания природно-техногенных объектов и восстановления параметров состояния лесной растительности с заданной точностью.**

**Показаны особенности решения задач распознавания гиперспектральных аэроизображений и оценки параметров биологической продуктивности лесной растительности на основе предлагаемых технологических разработок.**