

**Обработка многоспектральных и
гиперспектральных аэрокосмических
изображений: информационно-прикладные
аспекты**

**В.В. Козодеров¹, В.В. Борзяк¹, Е.В. Дмитриев²,
В.Д. Егоров²**

**¹Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова,**

²Институт вычислительной математики РАН

Исходные положения

Аэрокосмические системы дистанционного зондирования развиваются в двух основных направлениях:

- **повышение пространственного разрешения аппаратуры до десятков метров и выше (фотографические и сканирующие системы наблюдений); были показаны примеры аппаратуры «Усовершенствованный тематический картограф» (Enhanced Thematic Mapper/ETM+) спутника Landsat-7 (6 спектральных каналов в области спектра от 0.45 мкм до 2.5 мкм с пространственным разрешением около 30 м) в развитие широко используемых данных аппаратуры «Видеоспектрорадиометр среднего разрешения» (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer/MODIS) спутника Terra (7 спектральных каналов с пространственным разрешением около 500 м);**
- **повышение спектрального разрешения аппаратуры до 1 нанометра с использованием так называемых ПЗС-матриц, позволяющих получить «гиперкуб данных» (две пространственные координаты и длина волны – «третья координата»); будут показаны примеры летных испытаний двух типов отечественных гиперспектрометров разработки НПО «Лептон», г. Зеленоград (около 200 каналов в области спектра от 0.4 до 1.0 мкм с пространственным разрешением около 2 м с высоты около 1 км).**

Вводные замечания по поводу приложений данных самолетной гиперспектрометрии

Переход на уровень спектрального разрешения в 1 нм и выше означает появление качественно новых возможностей решения прикладных задач, т.к. при таком разрешении регистрируются отдельные линии и полосы поглощения излучения минералами, естественными и искусственными материалами, химическими соединениями. Открываются возможности дистанционного нанодиагностики объектов.

Пример 1. Становится возможным отличать различные маскирующие элементы (сетки, пленки и т.д.) от фонового почвенно-растительного покрова – недостижимая для решения задача при использовании других видов съемки (аэрофото, сканерная и др.).

Пример 2. Определение стрессового состояния вегетирующей растительности, которое происходит под влиянием дефицита увлажнения, загрязнений природной среды, по характерному смещению основной полосы поглощения хлорофилла (главного пигмента зеленой листвы, хвои и т.д.) на величину в несколько нанометров в сторону более коротких волн.

Этапы обработки данных многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования

- 1. Поэлементное распознавание (классификация) образов наблюдаемых объектов на основе выбранной меры близости предъявляемых векторов спектральных образов соответствующих объектов (значений интенсивности регистрируемого излучения) некоторым «эталонным образам». В частности, находится минимум евклидова расстояния $d^{(n)}$ в пространстве образов между текущими значениями спектров L_k (каналы $k = 1, 2, \dots, K$ – общее число каналов) и спектров, относящихся к «эталонным классам» $L_k^{(n)}$ (номера эталонов $n = 1, 2, \dots, N$ – общее число таких эталонов):**

$$d^{(n)} = [\sum_{k=1}^K (L_k - L_k^{(n)})^2]^{1/2}.$$

- 2. Решение задачи поэлементного восстановления количественных параметров состояния объектов (объем зеленой фитомассы разных типов экосистем, породный состав лесной растительности, тип межкрупной растительности и др.) на основе обращения основного функционала расклассифицированных на первом этапе многоспектральных/гиперспектральных данных.**

Расчет функционала интенсивности уходящего излучения производится на основе оригинальной модели описания взаимодействия падающего излучения с отдельными фитоэлементами (листья/хвоя, ветки и т.п.) растительного покрова:

$$\begin{aligned}
 J_{ml}(\lambda, p, n, r, \theta, \varphi, M(C_{\Pi}, A_{кр}), \theta_0) = & \\
 = (\pi^2/2) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \{ & S^{(\lambda)}_{z=0}(n, \theta_0) [(1 - C_{\Pi} - \delta_1) \times \\
 & \times \rho_1(\lambda, r, \theta, \varphi, \theta', \varphi') + \\
 & + (C_{\Pi} - C_{\Pi} A_{кр} - \delta_2) \rho_2(\lambda, p, \theta, \varphi, \theta', \varphi') + C_{\Pi} A_{кр} \rho_3(\lambda, r)] + \\
 & + J^{(\lambda)}_{\downarrow z=0}(n, \theta', \varphi') [\delta_1 \rho_1(\lambda, r, \theta, \varphi, \theta', \varphi') \\
 & + \delta_2 \rho_2(\lambda, p, \theta, \varphi, \theta', \varphi')] \} \times \\
 & \times F_{ml}(\lambda, \Omega) \cos \theta' d\lambda d\theta' d\varphi',
 \end{aligned}$$

Наряду с уже введенными обозначениями используются: m - номер канала приемной аппаратуры l -го типа с полем зрения S_0 и функцией чувствительности $F_{ml}(\lambda, \Omega)$; λ - длина волны с нижним (λ_1) и верхним (λ_2) пределами; Ω - телесный угол зрения аппаратуры; n - параметр типа атмосферных условий (прозрачности атмосферы); p - параметр типа (породы) лесной растительности; r - параметр типа межкроновой травянистой/кустарниковой растительности; спектральные отражательные способности межкроновой растительности $\rho^{(\lambda)}_1$, кроновой растительности $\rho^{(\lambda)}_2$, а также многократного рассеяния излучения внутри крон $\rho^{(\lambda)}_3$; сомкнутость лесного полога C_{Π} , ажурность крон деревьев $A_{кр}$; доля теней в межкроновых областях δ_1 , на кронах деревьев δ_2 ; объем зеленой фитомассы M .

Искажающее влияние атмосферы на значения J_{ml} на трассе от земной поверхности до высоты полета спутника учитывается с помощью линейной модели при заданной функциональной связи прозрачности атмосферы P^m и яркости атмосферной дымки D^m – той части регистрируемого излучения, которая обусловлена его многократным рассеянием в атмосфере:

$$J^*_{ml}(\dots) = J_{ml}(\dots) P^m(n, \theta, \varphi) + D^m(n, \theta, \varphi).$$

Входные данные расчетных программ

- **Цифровые матрицы данных спектральной интенсивности зарегистрированного излучения в виде отдельных элементов разрешения (строки $i = 1, 2, \dots, I$; столбцы $j = 1, 2, \dots, J$) многоспектральных изображений для каждого из дискретных $k = 1, 2, \dots, K$ измерительных каналов: каждый элемент отображается K -мерным вектором образов ($K = 6$ для данных аппаратуры ЕТМ+).**
- **Гиперкуб данных спектральной интенсивности зарегистрированного излучения, в котором наряду с цифровыми матрицами по пространственным координатам для каждого элемента разрешения (строки-столбцы i, j) представлены практически непрерывные данные по третьей координате – длине волны излучения ($K \sim 200$).**

Исходные данные обработки

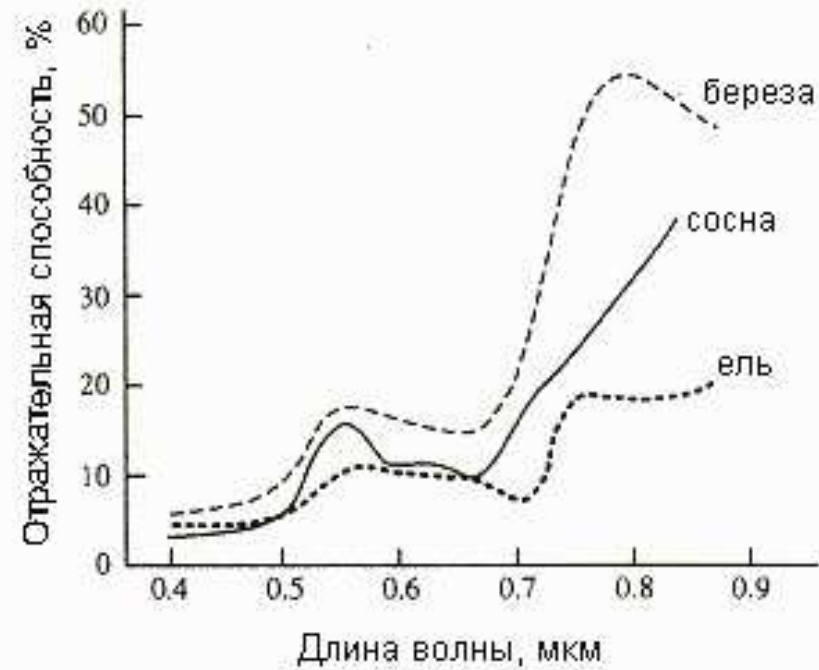
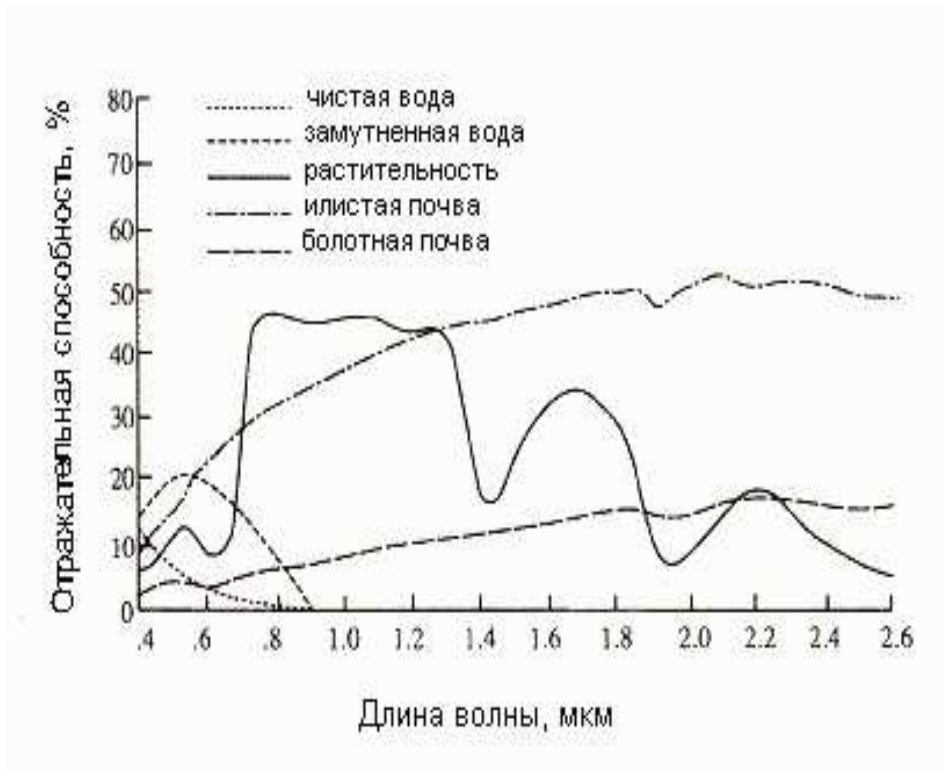
- **Данные 7 каналов аппаратуры MODIS (0.459-0.479; 0.545-0.565; 0.62-0.67; 0.841-0.876; 1.23-1.25; 1.628-1.652; 2.105-2.155 мкм) для всей территории Тверской области, представленные в hdf-формате в Вт/(м² мкм стер) для каждого элемента разрешения (пространственное разрешение около 500 м).**
- **Данные 6 каналов аппаратуры ETM+ (0.45-0.52; 0.53-0.61; 0.63-0.69; 0.78-0.90; 1.55-1.75; 2.09-2.35 мкм) для выбранных районов Тверской области, представленные в тех же энергетических единицах в стандартном цифровом формате, воспринимаемом создаваемым программным обеспечением обработки многоспектральных аэрокосмических изображений (пространственное разрешение около 30 м).**
- **Данные около 200 каналов трех типов самолетных гиперспектрометров со спектральным разрешением около 1 нм в области длин волн 0.4-1.0 мкм для выделенных тестовых участков Тверской области (2007-2009 гг.), представленные в тех же энергетических единицах в виде гиперкубов данных (пространственное разрешение около 2 м с высоты 1 км).**

Выходная продукция обработки каждого элемента многоспектрального и гиперспектрального изображения:

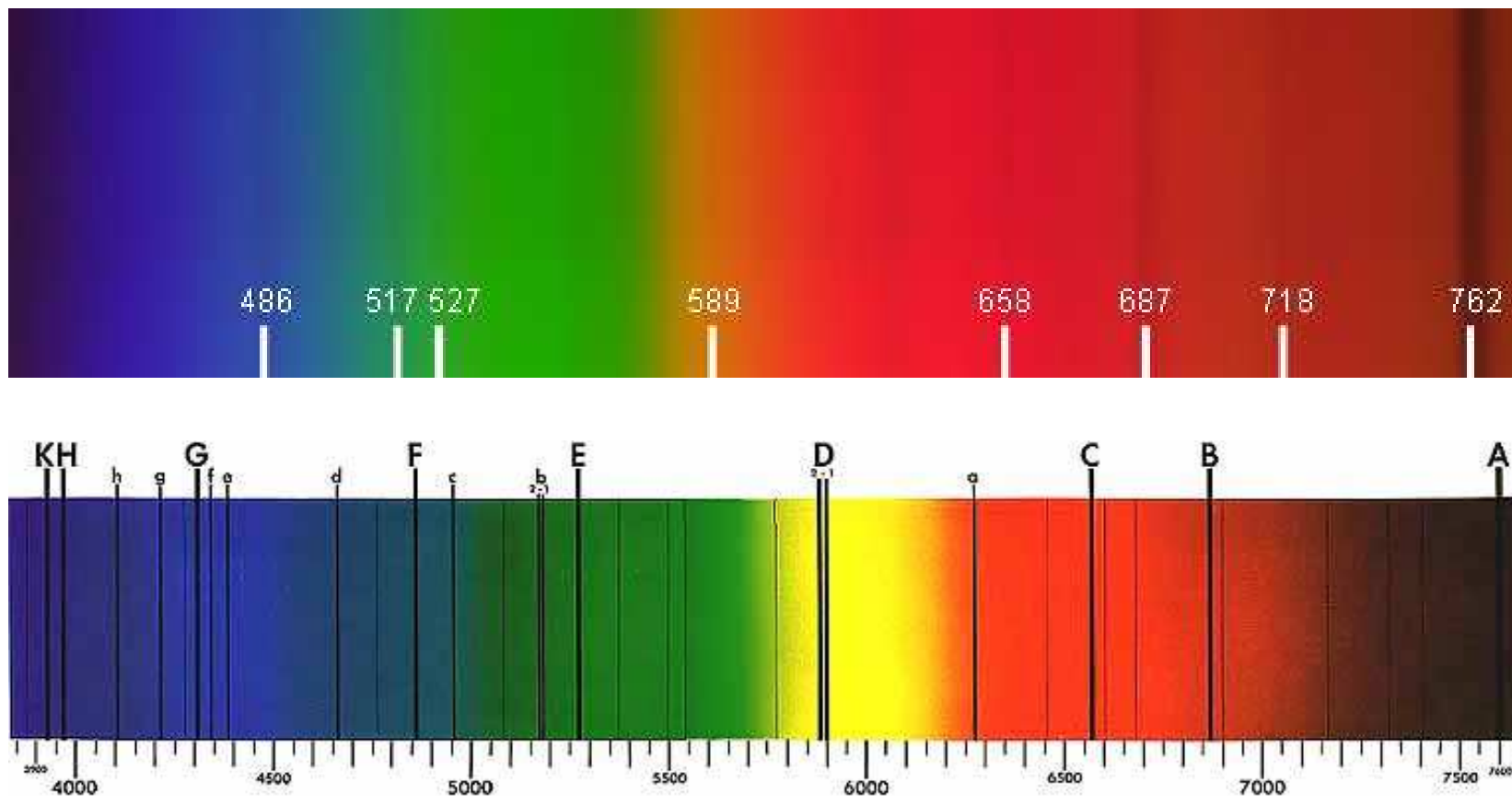
- **тип объекта (1 – растительность, 2 – вода, 3 – облачность, 4 – почвогрунты; класс «растительность» в процессе расчета может быть программным образом разбит на подклассы: лесная, болотная, луговая, сельскохозяйственная и другая растительность);**
- **прозрачность атмосферы (по крайней мере, 4 типа от прозрачной до сильно замутненной атмосферы; этим целям определения состояния атмосферы в момент съемки служит самый коротковолновый канал аппаратуры MODIS и ETM+);**
- **объем зеленой фитомассы растительности (типичные значения от нуля до приблизительно 30 т/га; имеются эмпирические связи для перехода от этой величины к общей биомассе древесной и другой растительности);**
- **среднеквадратические отклонения значений зеленой фитомассы растительности (соответствуют точности решения обратной задачи восстановления этой величины);**

- **тип растительности (для лесной растительности выделяется 11 классов породного состава: 1 – полностью лиственные породы, 11 – полностью хвойные породы; между ними – смешанные породы через каждые 10% преобладающих пород; для остальной растительности – болотно-луговая, сельскохозяйственные поля и др., также восстанавливаются соответствующие значения объема фитомассы и их среднеквадратические отклонения);**
- **тип межкроновой лесной растительности (выделяется несколько классов в соответствии с исходными данными модельных представлений о спектральных образах: яркая трава; более темная трава; болотная растительность: более темная и более светлая; мох; отсутствие растительности; кустарники; преобладание открытой водной поверхности между кронами деревьев);**
- **сомкнутость полога (от нуля до единицы: 0 – отсутствие фитомассы; 1 – полное покрытие лесного полога или полога иной растительности);**
- **ажурность верхней границы полога (то же, что и сомкнутость, но на уровне одного дерева или другого элемента, рассеивающего падающее излучение).**

Спектральный ход кривых отражательной способности, измеренных в лабораторных или наземных условиях – основа технологии поэлементной обработки многоспектральных (гиперспектральных) изображений. Примеры взяты из базы данных Министерства геологии США (United States Geological Survey/USGS)



Некоторые известные факты формирования линий поглощения излучения отдельными химическими элементами и молекулярными соединениями атмосферы и земной поверхности

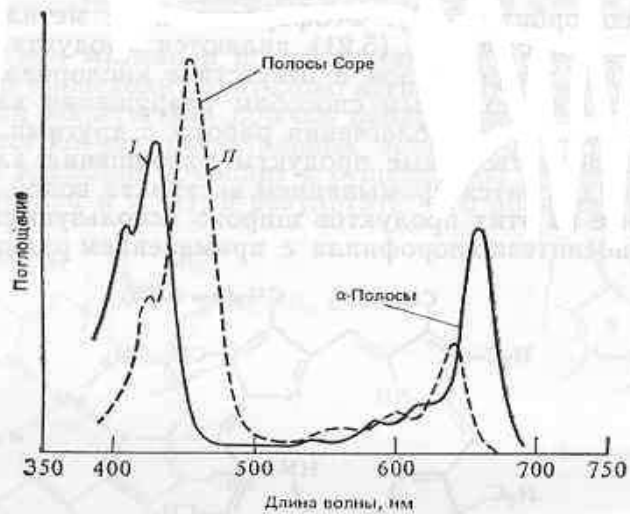


Линия Кислорода 762,1 нм просто бросается в глаза, но можно идентифицировать и еще несколько главных фраунгоферовых линий: Водорода - 486,1 нм и 658,3 нм; серию неразличимых между собой линий Магния - 516,7 нм, 517,3 нм, 518,4 и Железа - 616,7 нм, 516,9 нм; Железа - 527 нм; Натрия - 589,0 нм; Кислорода - 687 нм, 718,5 нм, 762,1 нм.

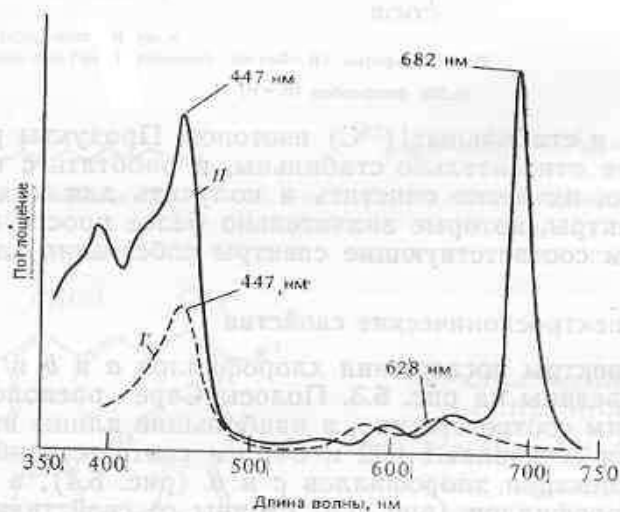
Обозначение линии	Длина волны в мкм	Химический элемент
<i>A</i>	0,761	O
<i>B</i>	0,687	O
<i>C</i>	0,656	H α
<i>D</i>	0,589	Na
<i>E</i>	0,527	Fe
<i>F</i>	0,486	H β
<i>G</i>	0,431	Ca
<i>H₁</i>	0,397	Ca
<i>H</i>	0,393	Ca

Хлорофилл – основной пигмент фитопланктона, обеспечивающий характерную форму спектра отражения вегетирующей растительности

Хлорофиллы - зеленые пигменты растений, с помощью которых они улавливают энергию солнечного света и осуществляют процесс фотосинтеза. В состав молекулы хлорофилла входит магний и азот, железо является обязательным катализатором этого процесса. В клетке молекулы хлорофиллов сосредоточены в хлоропластах. Существует несколько типов хлорофиллов (*a, b, c, d*), отличающихся системой связей и заместителями. Высшие растения и водоросли содержат в качестве основного пигмента хлорофилл *a*, а в качестве сопровождающих дополнительных - хлорофилл *b* (высшие растения и зелёные водоросли), хлорофилл *c* (бурые и диатомовые водоросли), хлорофилл *d* (красные водоросли).



Спектры поглощения света хлорофиллом *a* (I) и хлорофиллом *b* (II) в диэтиловом эфире.



Спектры поглощения света хлорофиллом *c* (I) и хлорофиллом *d* (II) в диэтиловом эфире.

Спектры поглощения хлорофиллов *a* и *b* имеют полосы поглощения при 430 и 455 нм, а также при 662 и 641 нм, соответственно. Главные свойства спектров хлорофиллов *c* и *d* сходны со свойствами спектров хлорофиллов *a* и *b*, однако максимумы поглощения их спектров различаются.

Общие представления о формировании линий и полос поглощения солнечного излучения различными средами (объекты атмосферы и земной поверхности)

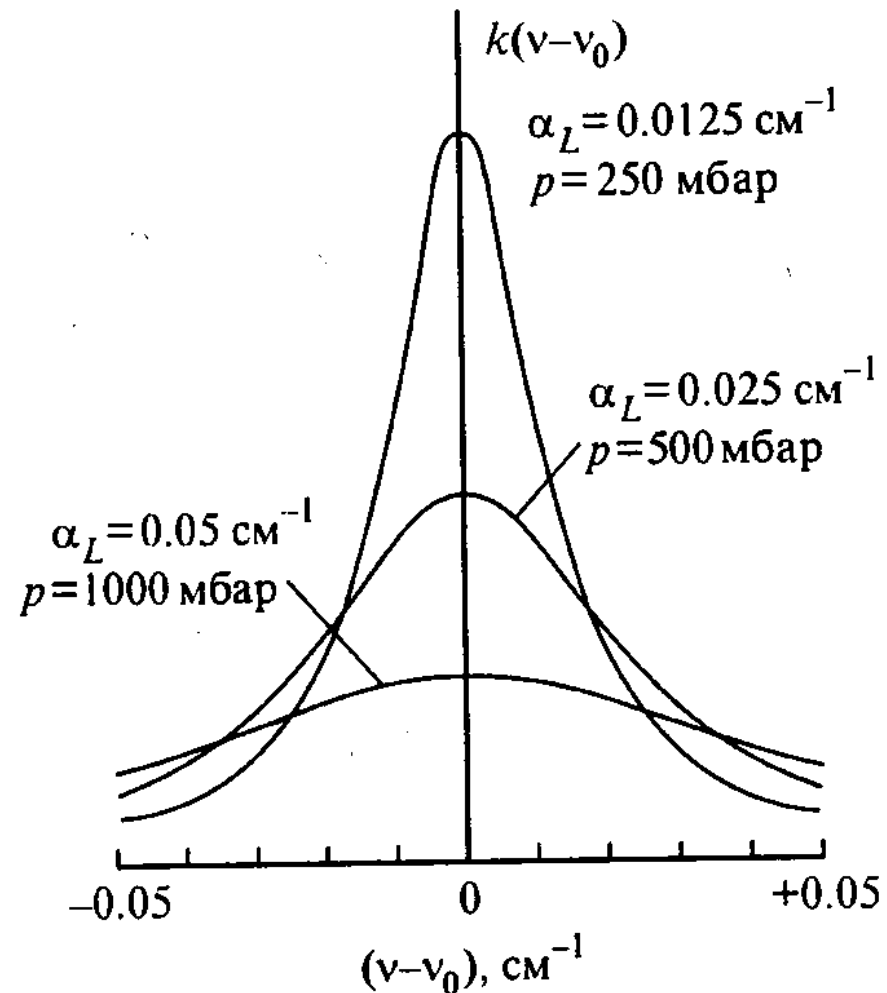
Фотоны солнечного излучения, действуя на среду, могут приводить к ускорению электронов (возникают электронные переходы и полосы в ультрафиолетовой области спектра), к колебаниям или вращению молекул (колебательно-вращательные переходы и линии в видимой и ближней инфракрасной области спектра).

При таких взаимодействиях с падающими фотонами молекулы соединений атмосферного воздуха рассматриваются как твердое тело с определенным моментом инерции и тремя главными осями инерции молекул. Известны 4 группы молекул (линейные: CO_2 , CO , O_2 , N_2 ; симметричный волчок: NH_3 , C_2H_6 ; сферический волчок: CH_4 ; асимметричный волчок: H_2O , O_3).

Коэффициент поглощения излучения соответствующими соединениями на частоте ν описывается лоренцовским контуром спектральных линий:

$$k_\nu = (S/\pi) \left\{ \alpha / [(\nu - \nu_0)^2 + \alpha^2] \right\}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} k_\nu d\nu = S,$$

S - интенсивность линии, α - ее полуширина, ν_0 - резонансная частота.

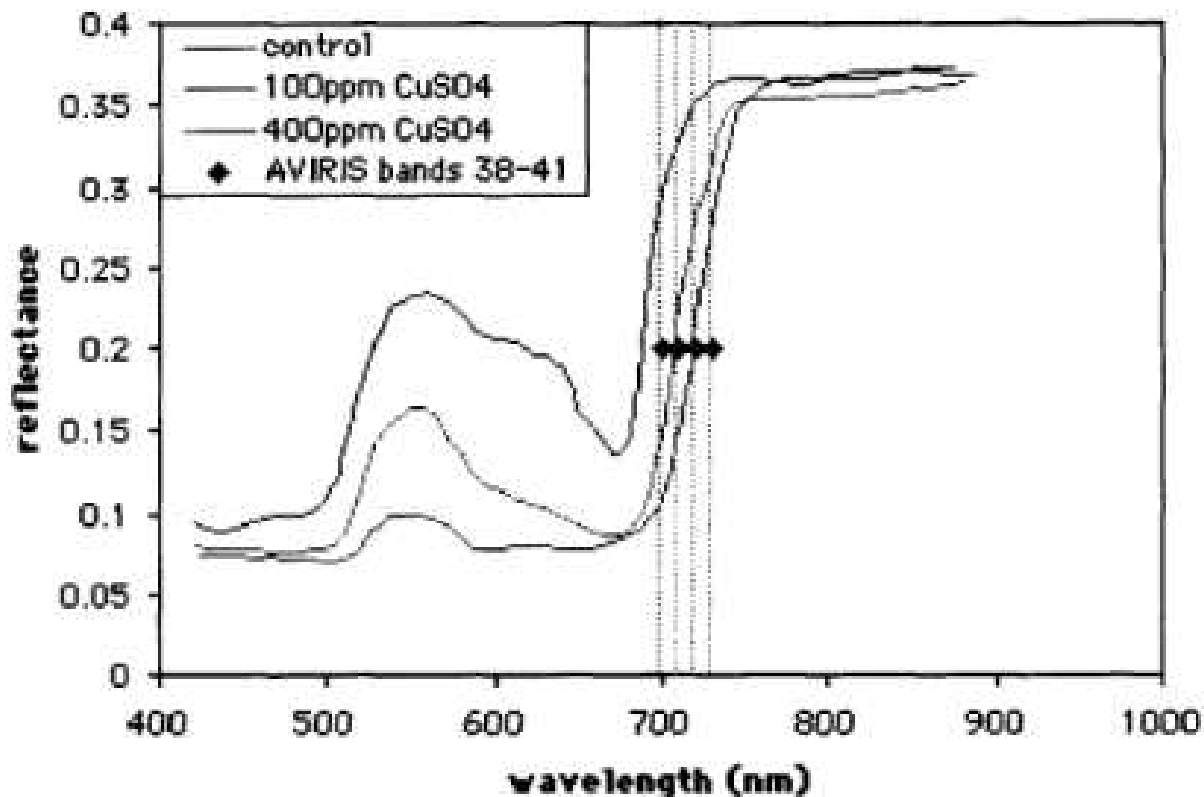


В атмосфере Земли линии могут уширяться за счет:

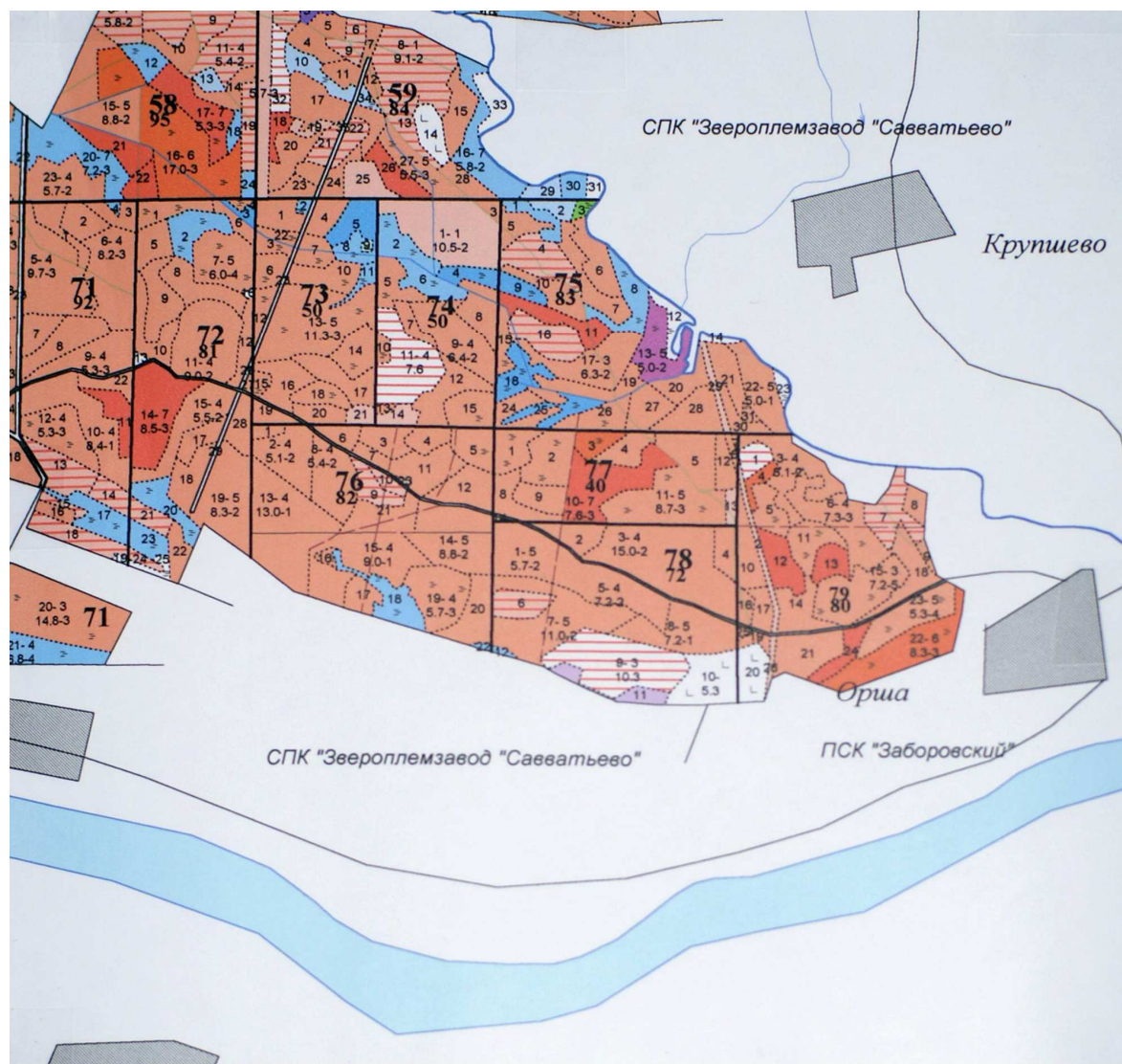
- затухания колебаний осцилляторов в результате потери энергии при излучении (называется естественным уширением);
- возмущений вследствие столкновений между поглощающими молекулами и между поглощающими и непоглощающими молекулами;
- эффекта Доплера, возникающего из-за различий в тепловых скоростях движения атомов и молекул.

Возможности нанодиагностики состояния растительности

Поглощение в длинноволновой ветви полосы хлорофилла, накладываясь на континуум спектральной отражательной способности, может достигать насыщения в таком «равновесном состоянии» системы. При возникновении стрессовой ситуации (за счет дефицита увлажнения, загрязнений почвы и т.п.) и появлении признаков завядания должно резко проявляться поглощение в центре полосы (область максимума поглощения). Следствие – «голубое смещение» всего на 1-2 нанометра максимума отражательной способности растительности.



Пример (Chang and Collins, *Economical Geology*, 1983) рассмотрения приложений одной из первых специализированных систем дистанционной гиперспектрометрии: аппарата «Самолетный видеоспектрометр видимой и инфракрасной области» (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer/AVIRIS); более 100 спектральных каналов в области длин волн 0.4-2.5 мкм. Можно видеть смещение спектра травы сорго для данных каналов 38-41 аппаратуры AVIRIS (отношение сигнал/шум аппаратуры достигает нескольких сотен в этой области спектра) на единицы нанометра от контрольного примера влево при внесении на контрольном участке в почву 100 и 400 частей на миллион по объему медного купороса, соответственно.



Пример отображения данных наземных лесотаксационных обследований территории.

Даются подробные наземные описания отдельных выделов для кварталов 75-79.

Четыре характерные цифры внутри выделов характеризуют номер выдела

характеризуют номер выдела, возраст древостоя, площадь выдела, бонитет (качество древесины), соответственно.

Для каждого выдела сосняки отображены коричневым цветом (более возрастной состав древостоев имеет более темный цвет), ельники – фиолетовым цветом,

березняки – синим цветом, болота – зеленым цветом,

вырубки обозначены горизонтальными цветными полосами.

Данные наземных лесотаксационных обследований содержат информацию:

KZEM - тип произрастания леса (лк-лесокультуры)

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)

Q - плотность произрастания

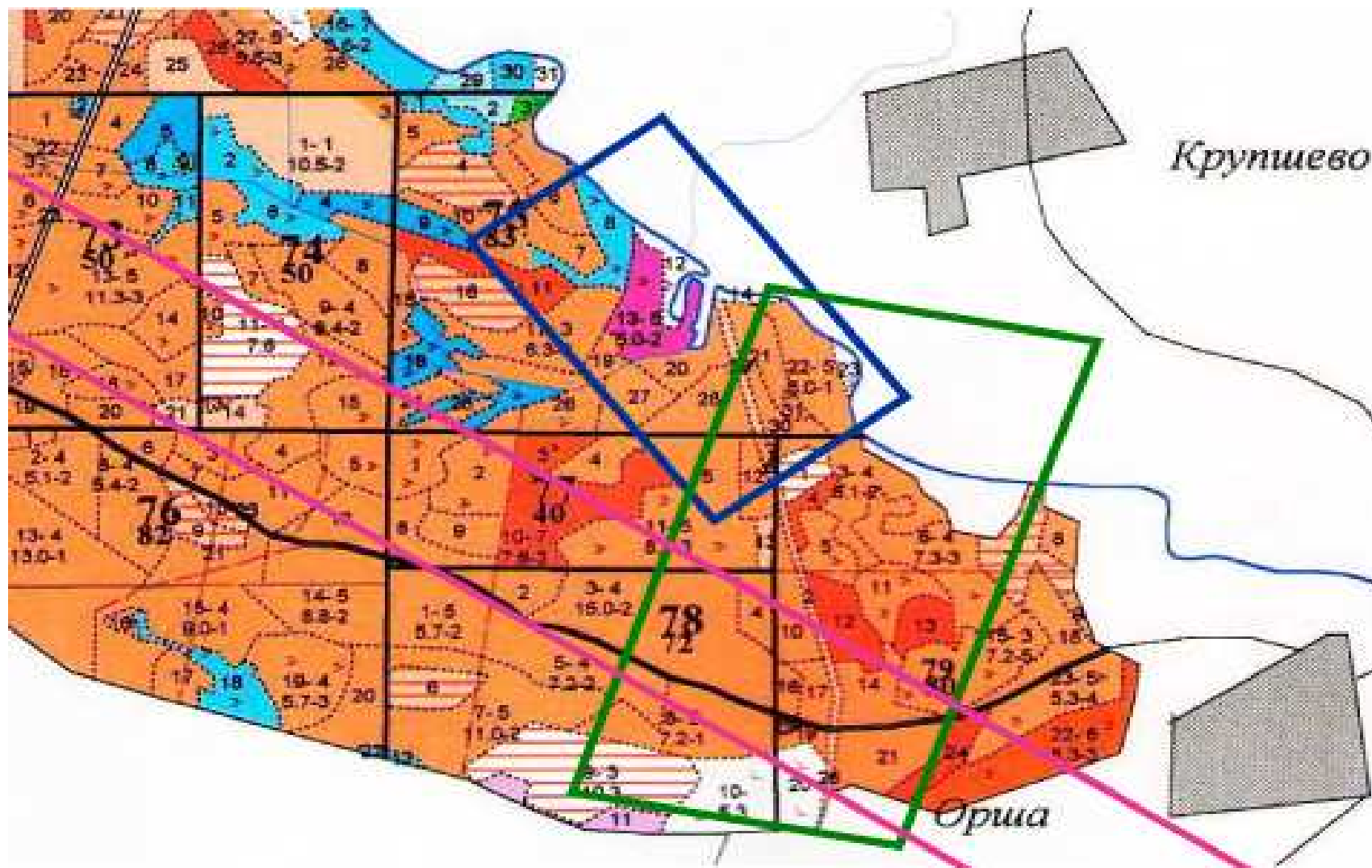
TL - тип леса по травяному покрову: СФ-сфагновый; ДМ-долгомошник
ЧЕР-черничник; БР-брусничник; ПРЧ-приручьевой;

D - диаметр, см

H - высота, м

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

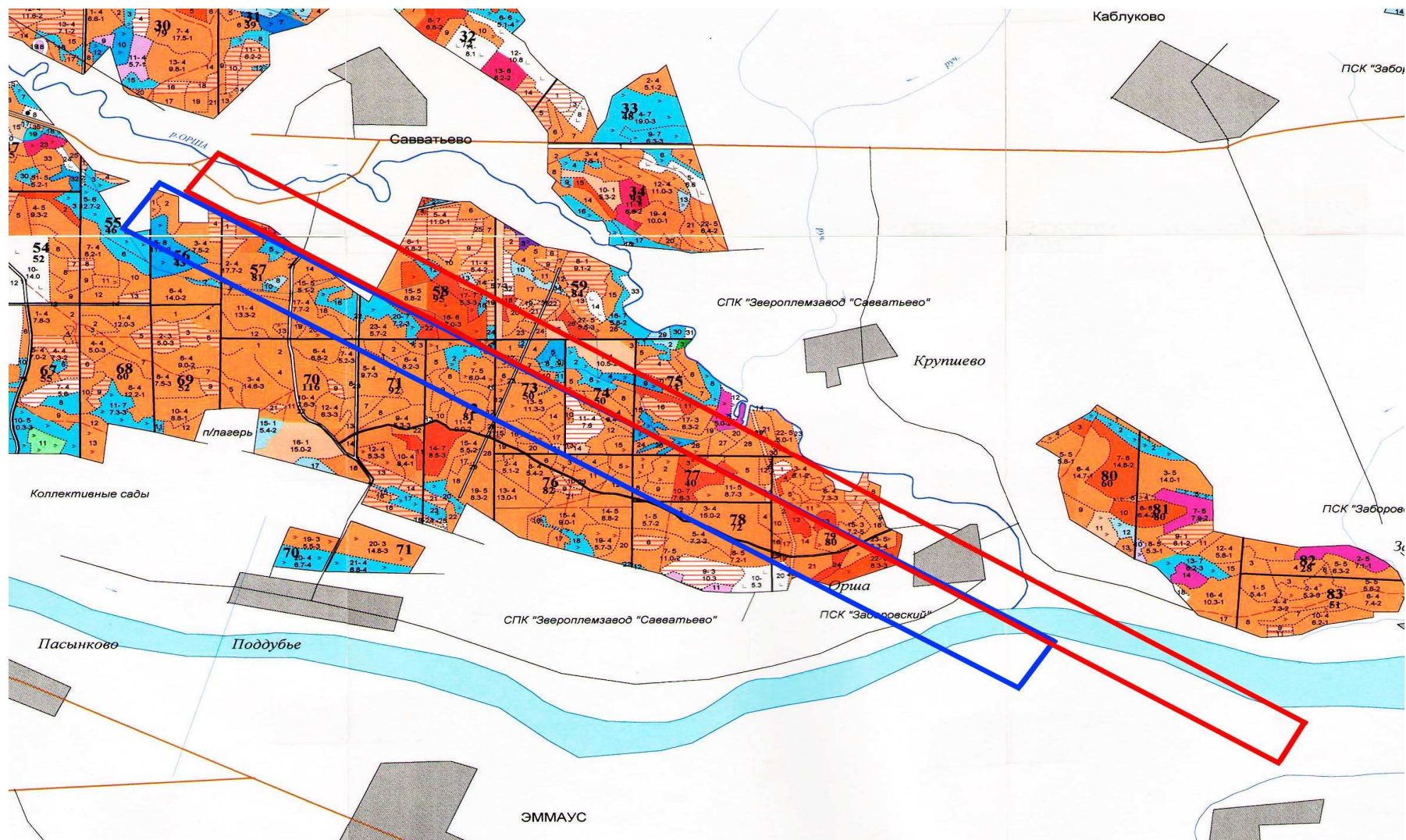
Три примера привязки данных летных испытаний гиперспектрометров и наземных лесотаксационных обследований территории. Рамка зеленого цвета – первая версия на дату съемки 30.09.2007 г.; рамка синего цвета – вторая версия (дата 20.09.2008 г.); рамка красного цвета (дата 16.08.2009 г.)



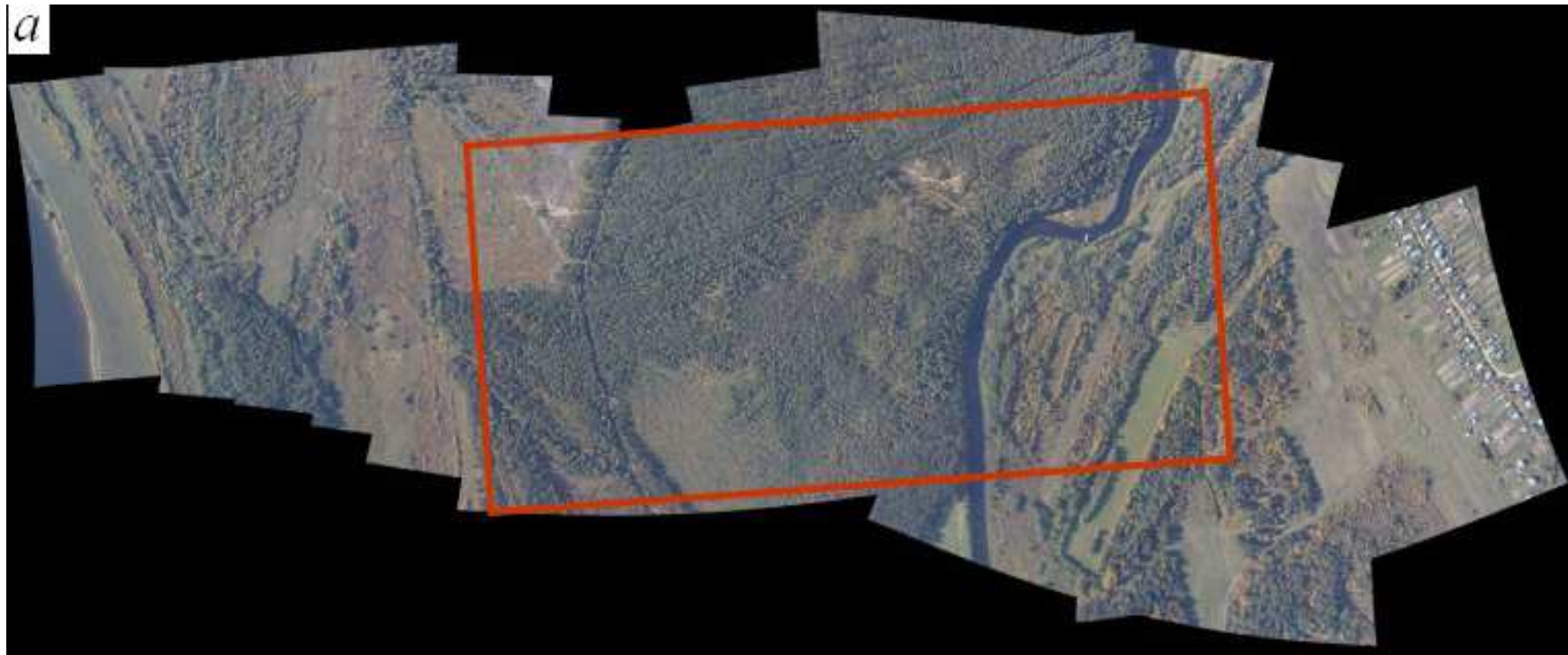
Фрагмент физико-географической карты тестовой территории с двумя выделенными треками 2009 г.



Два тестовых трека 2009 года на карте наземной лесотаксации



Аэрофотоснимок выбранной территории, на которой проводились испытания исходной версии гиперспектрметра (дата съемки 30.09.2007 г.) с рамкой, в пределах которой ниже будут показаны результаты распознавания образов объектов



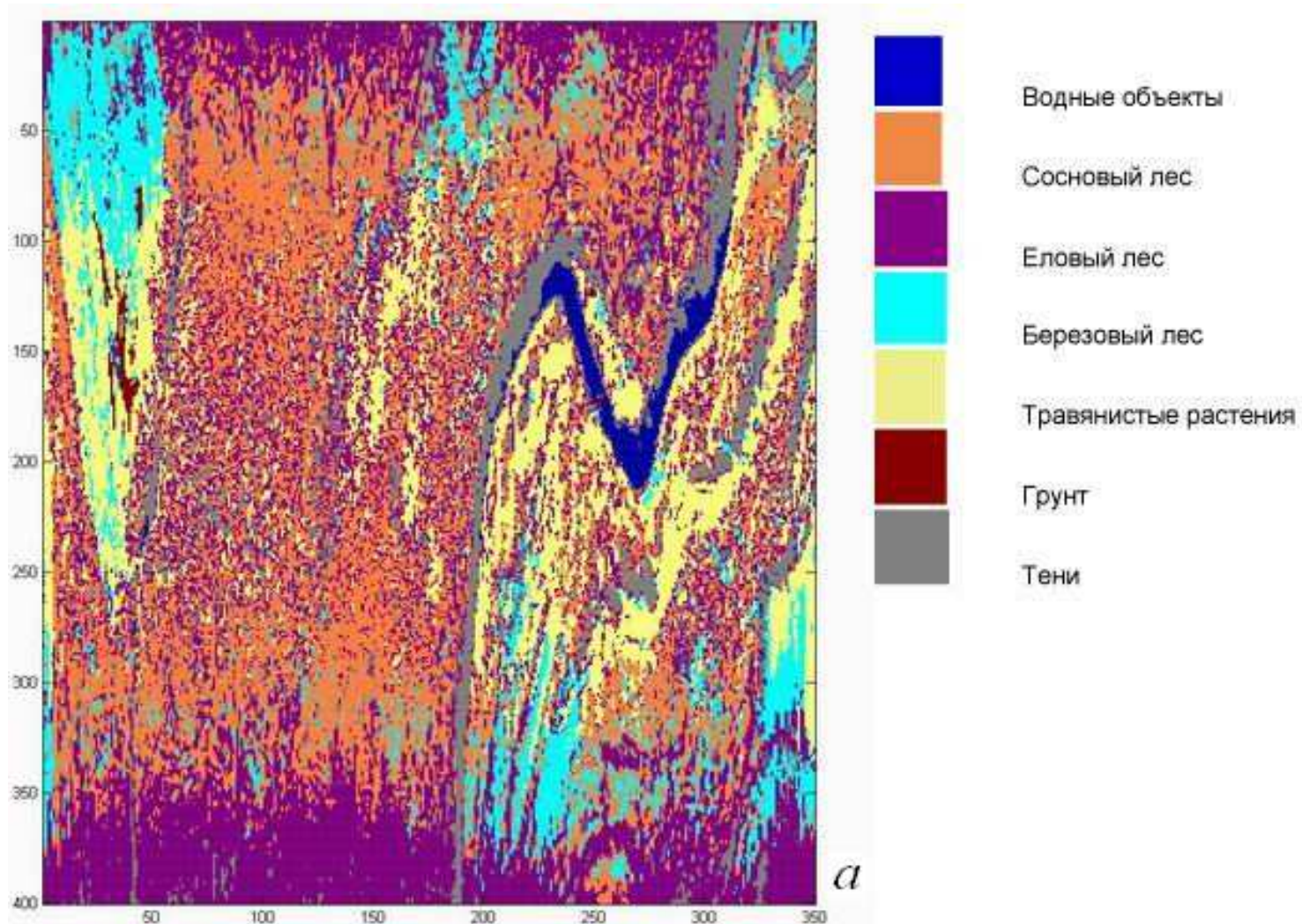
Аэрофотоснимок выбранной территории, на которой проводились испытания усовершенствованной версии гиперспектрметра (дата съемки 20.09.2008 г.) с рамкой, в пределах которой ниже будут показаны результаты распознавания образов объектов

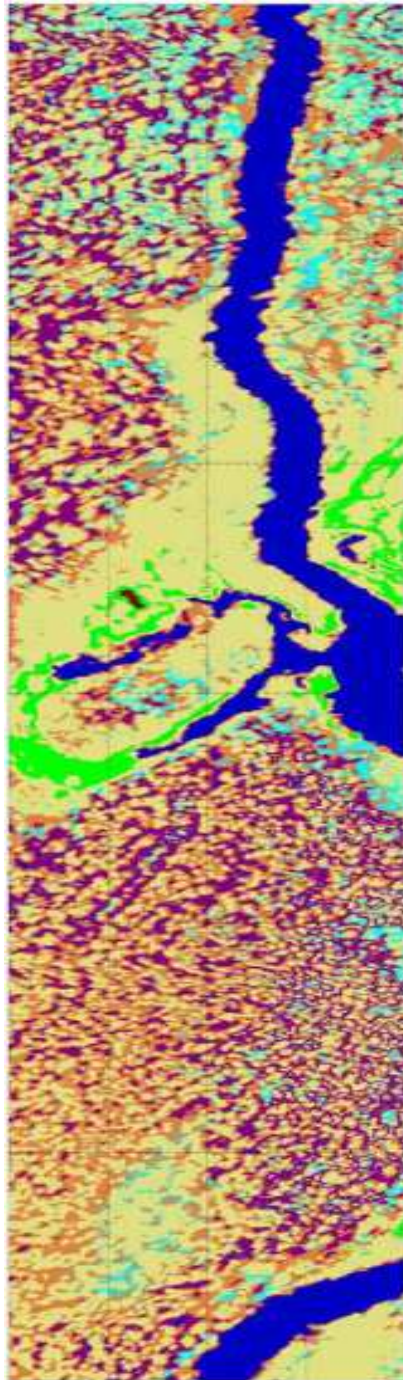


Замечания, касающиеся программного обеспечения обработки данных аэрокосмической гиперспектрометрии

- 1. Стандартные пакеты программ, поставляемые зарубежными фирмами (ERDAS, ENVI и др.) не дают реальных оценок точности решаемых прикладных задач. В частности, оказывается неприменимым предположение о гауссовском характере поканальных гистограмм градаций регистрируемых яркостей (см. примеры ниже).**
- 2. Предлагаемое новое программное обеспечение открывает перспективы не только получения гарантированных оценок точности решаемых задач, но и восстановления количественных параметров состояния для каждого элемента разрешения (в том числе объема зеленой фитомассы для элементов разрешения, относящихся к классу «растительность»).**

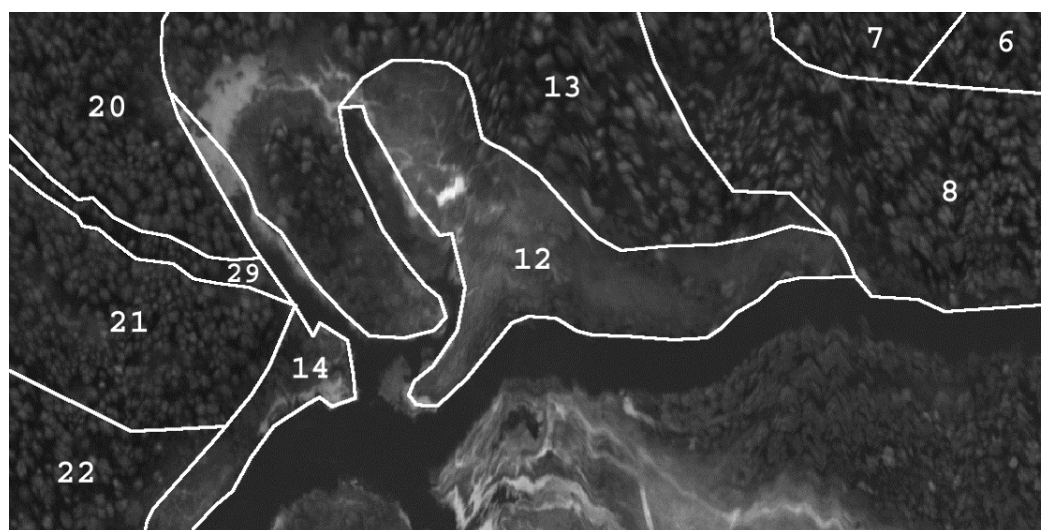
Результаты распознавания объектов по данным начальной версии гиперспектрометра (дата съемки 30.09.2007 г.)



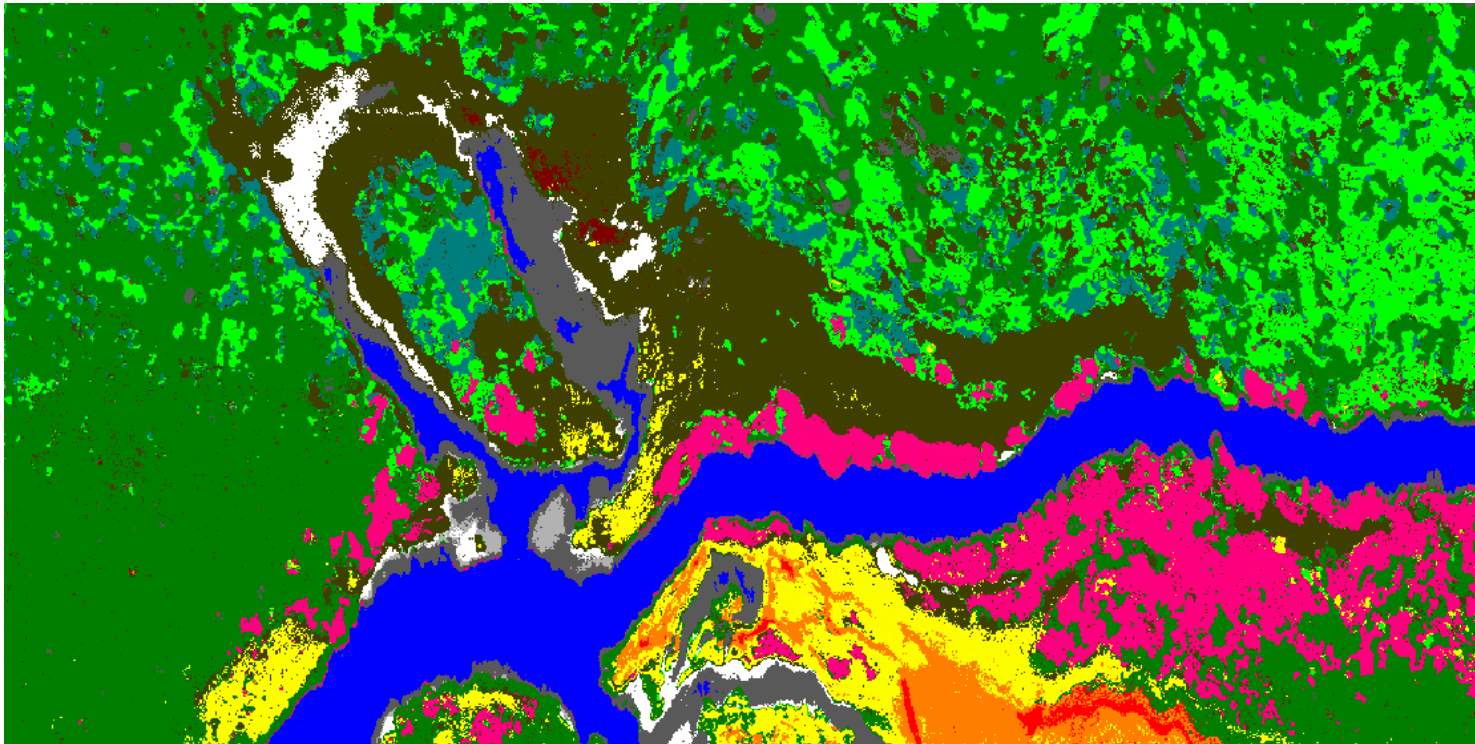





**Результаты
распознавания
объектов по
данным
усовершенствован-
ной версии
гиперспектрометра
(дата съемки
20.09.2008 г.)**

Аэрофотоснимок тестового участка (слева; дата 20.09.2008 г.) и синхронное изображение этого участка со щели гиперспектрального метра (справа) с нанесенными контурами разных типов объектов, включая введенные выше лесные выделы






Классификация природных объектов методом квадратичного дискриминантного анализа






-  - открытые почвогрунты;
-  - открытая водная поверхность;
-  - ряска;





травянистая болотная растительность:

-  - при влиянии открытых почв;
-  - на водной поверхности;
-  - на поверхности суши;

луговая растительность:

-  - более темная;
-  - более светлая;
-  - в угнетенном состоянии;

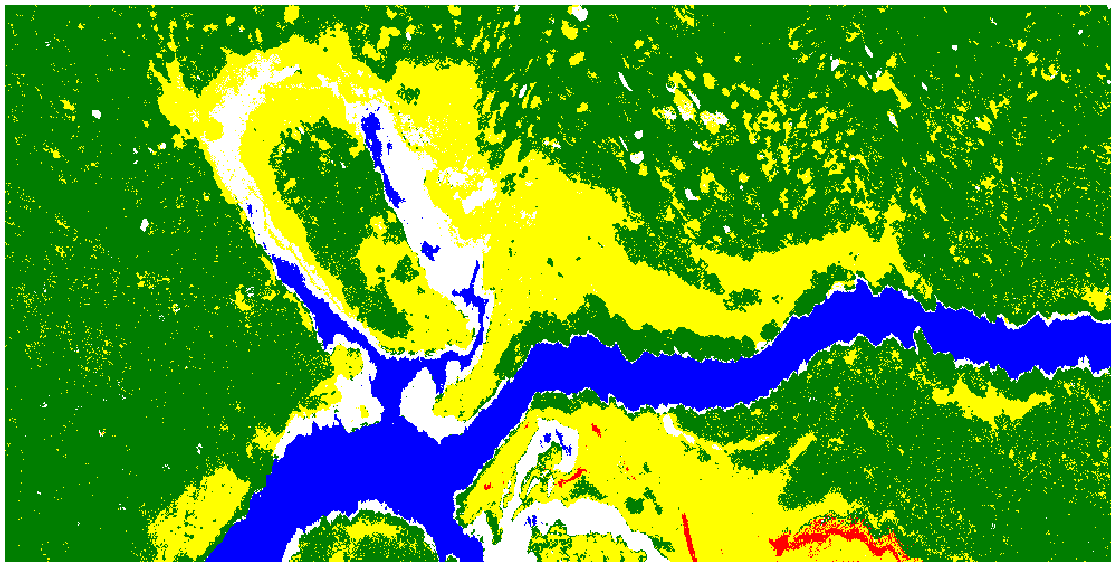
тип леса:

-  - сосна;
-  - ель;
-  - береза и осина;
-  - ольха

Классификация экосистем

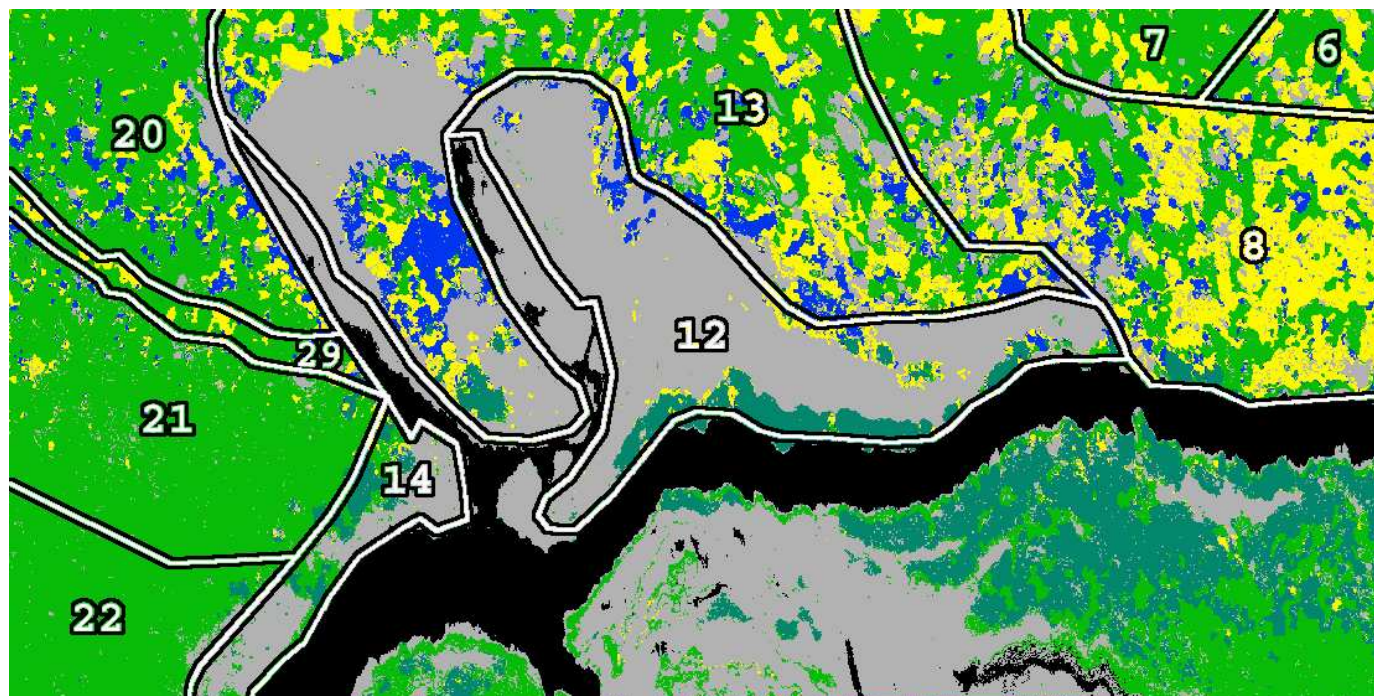


Синхронный
аэрофотоснимок



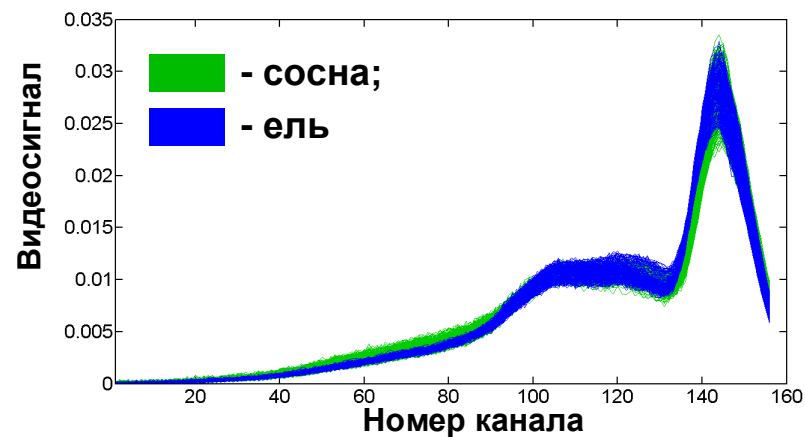
- почвогрунты;
- вода;
- ЭКОСИСТЕМЫ:**
- лесная;
- луговая;
- болотная

Классификация типов лесной растительности



- вода и почвогрунты;
- луговая и болотная растительность;
- сосна;
- ель;
- береза и осина;
- ольха

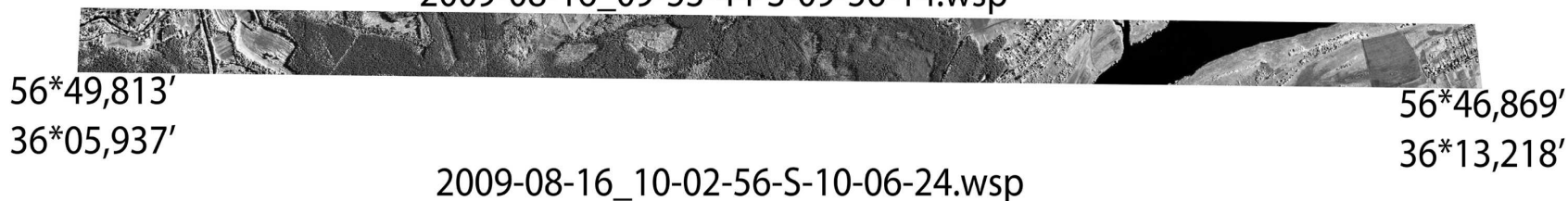
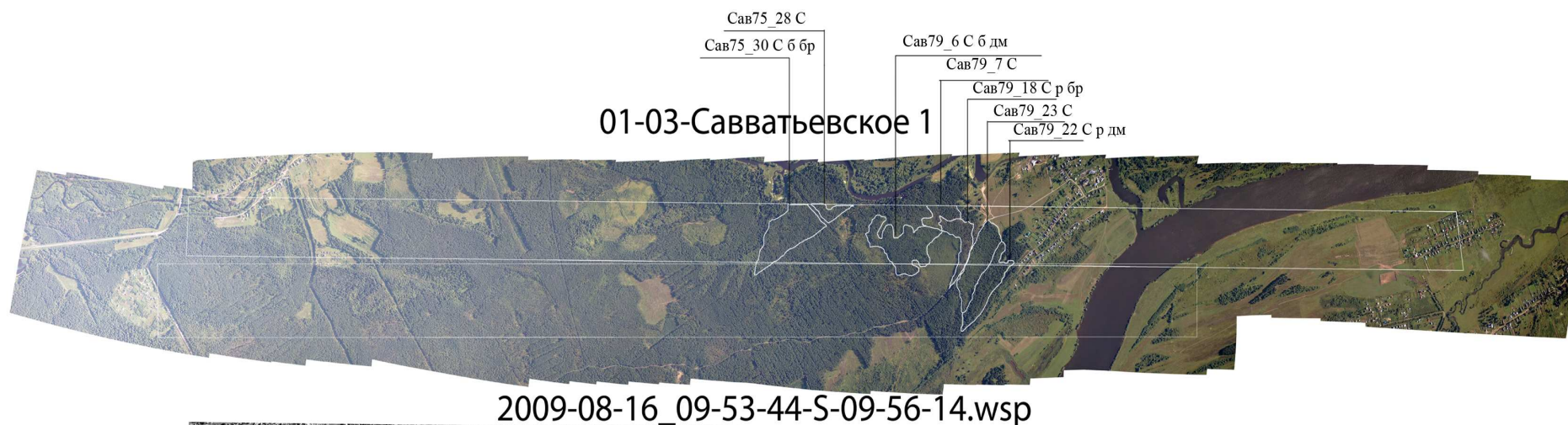
Стандартизованный видеосигнал в различных каналах



Породный состав выделов

Номер выдела	Площадь выдела	Тип межкр. раст.	Породный состав
6	3,30	ЧЕР	4С2ЕЗБ1ОС
7	3,60	ЧЕР	10С
8	3,70	ПРЧ	6Б2Е1С1ОС
13	5,00	ПРЧ	6ЕЗБ1ОЛЧ
20	2,40	ЧЕР	8С2Е
21	2,60	ЧЕР	10С
22	5,00	ЧЕР	8С1Е1Б
29	1,00	ЧЕР	10С

Две выборочные полосы синхронной аэрофотосъемки и данных со щели гиперспектрметра (дата 16.08.2009 г.) с привязкой к отдельным выделам

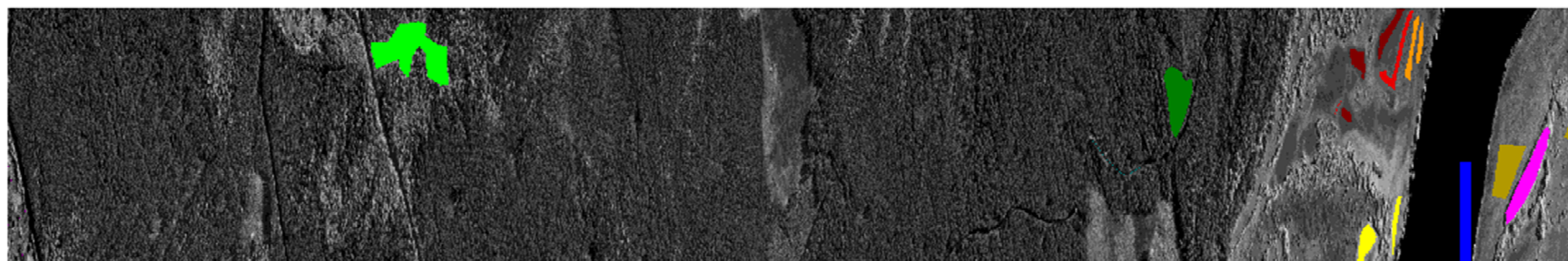
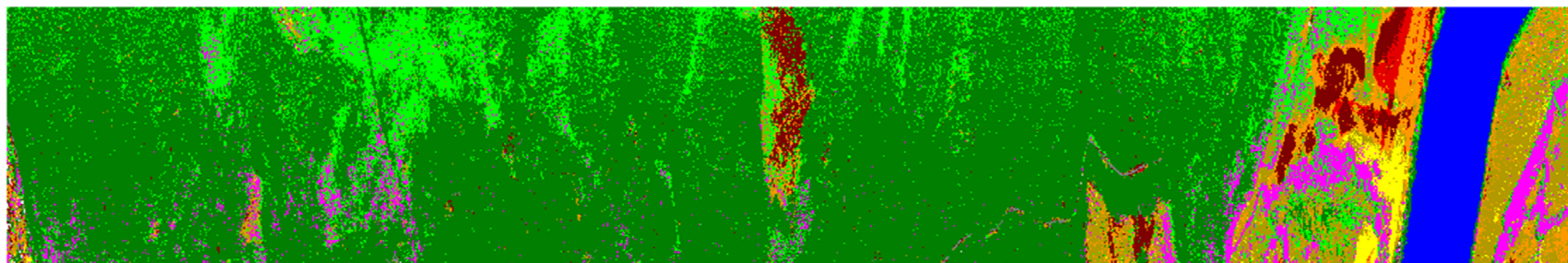


Характеристика выделенных участков на фототреке




Легенда	квартал	выдел	площадь	покров	возраст
Сав75_4 С р бр	75	4	4,5	БР	69
Сав75_7 С б чер	75	7	3,6	ЧЕР	70
Сав75_21 С р чер	75	21	2,6	ЧЕР	90
Сав75_28 С	75	28	4,0	ЧЕР	75
Сав75_30 С б бр	75	30	1,6	БР	70
Сав75_31 С р сф	75	31	0,4	СФ	80
Сав79_6 С б дм	79	6	7,3	ДМ	70
Сав79_7 С	79	7	4,01	БР	69
Сав79_8 С	79	8	1,2	ЧЕР	80
Сав79_18 С р бр	79	18	3,8	БР	55
Сав79_22 С р дм	79	22	8,3	ДМ	120
Сав79_23 С	79	23	5,3	СФ	90

Распознавание образов наблюдаемых объектов по данным гиперспектральной съемки на дату 16.08.2009 г.




Вверху - классификация на основе квадратичного дискриминантного анализа, внизу - элементы разрешения, использованные для обучения





тип леса:

-  - сосна
-  - береза и осина
-  - ольха




луговая растительность:

-  - более темная
-  - более светлая
-  - в угнетенном состоянии

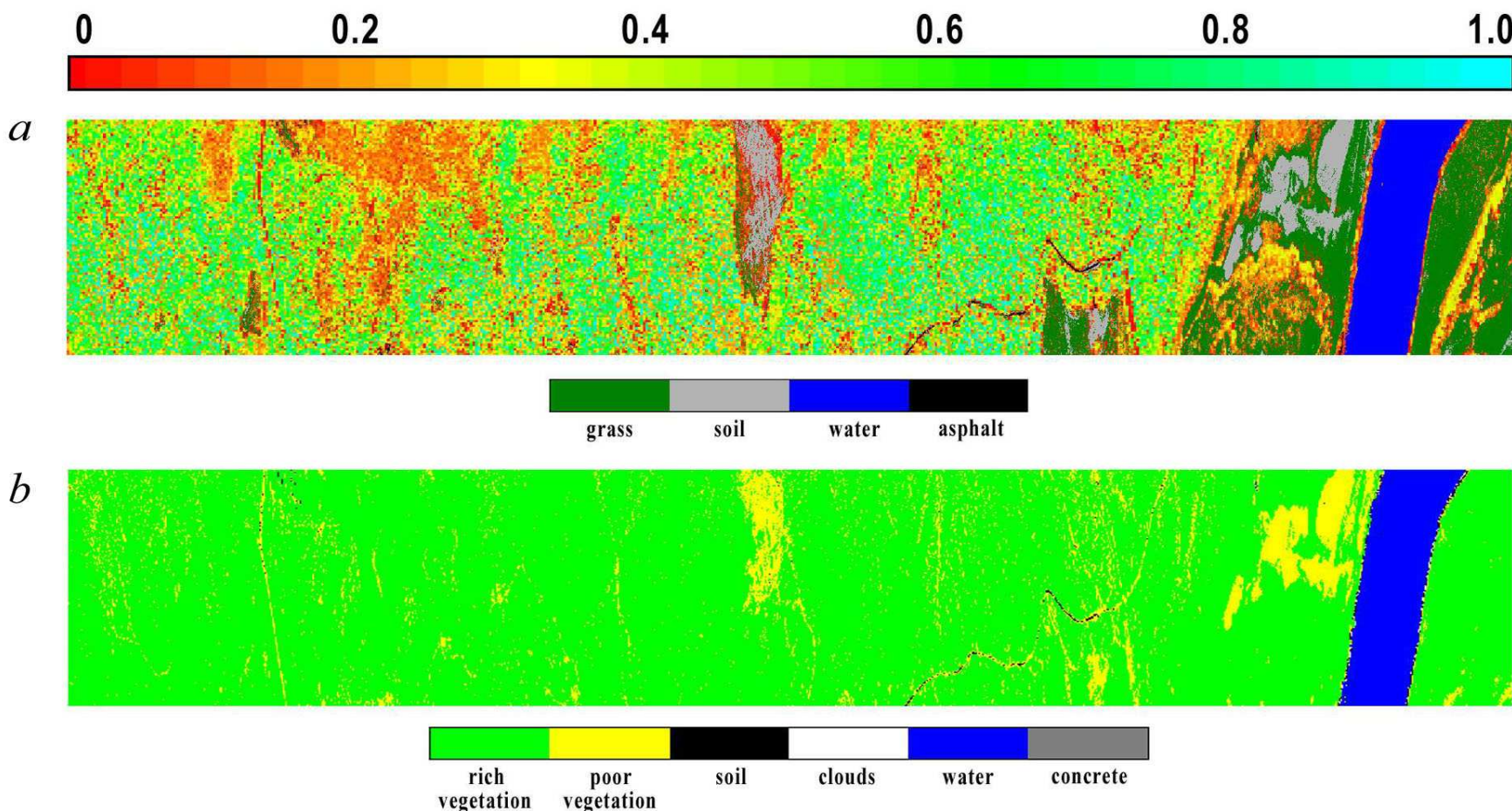
почвогрунты:

-  - подзолистые почвы
-  - песчаные почвы

прочие объекты:

-  - открытая водная поверхность
-  - асфальт
-  - строения

**Новая информационная продукция обработки
выбранного трека (распознавание объектов – шкала
внизу) и поэлементные значения объема фитомассы
растительности (шкала вверху) и отображение данных
этой же матрицы 2000 x 500 элементов в терминах NDVI**



Выводы

- **Разработано уникальное программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования, которое в дополнение к известным процедурам классификации объектов позволяет также проводить поэлементное восстановление параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова.**
- **Показаны примеры обработки гиперкубов данных трех типов гиперспектральной аппаратуры по мере ее летных испытаний на выбранных тестовых участках Тверской области**
- **Перспективы развития соответствующих приложений – в повышении точности распознавания наблюдаемых объектов, различении по данным гиперспектрального аэрозондирования нормального и стрессового состояния растительности, решении специальных задач нанодиагностики объектов природно-техногенной сферы.**