

Роговец А.В., Беляев Б.И., Катковский Л.В.,
Казак А.А., Курикина Т.М., Цикман И.М.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СПЕКТРАЛЬНО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КАЛИБРОВОК ОПТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Научно-исследовательское учреждение
«Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко»
Белорусского государственного университета (НИИПФП БГУ),
Минск, Беларусь

РАССМАТРИВАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ВОПРОСЫ:

- Лабораторные калибровки спектрометрической аппаратуры, методики расчета спектральной чувствительности приборов;
- Аппаратура и методики наземных и авиационных полигонных измерений для обеспечения полетных калибровок спутниковых систем.



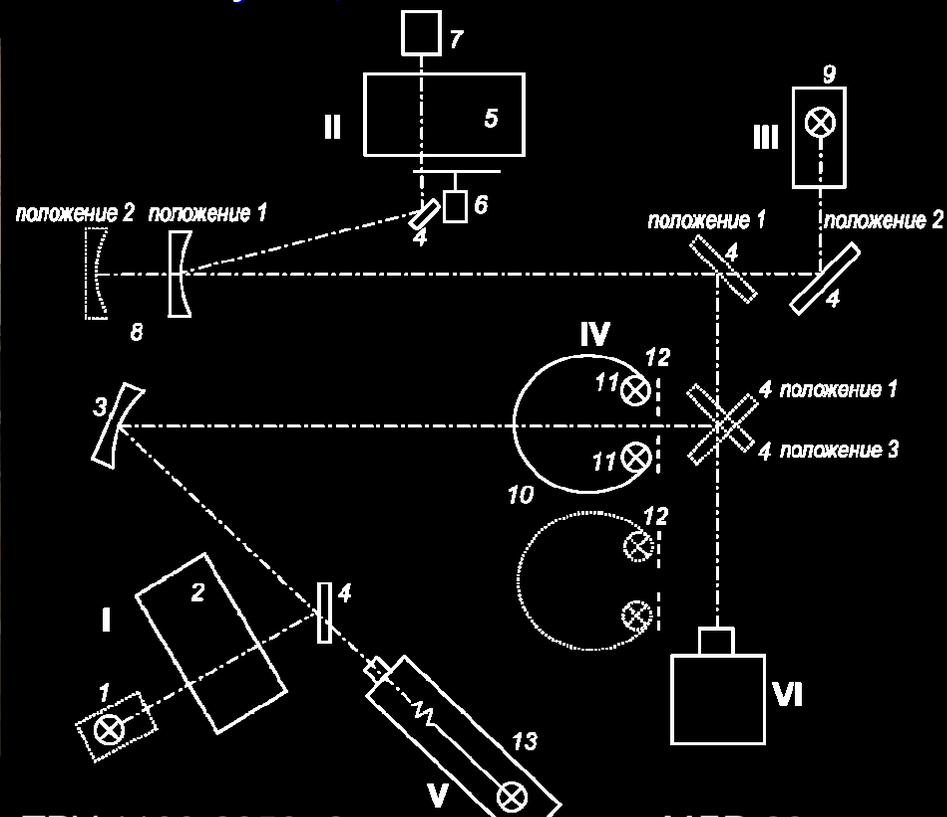
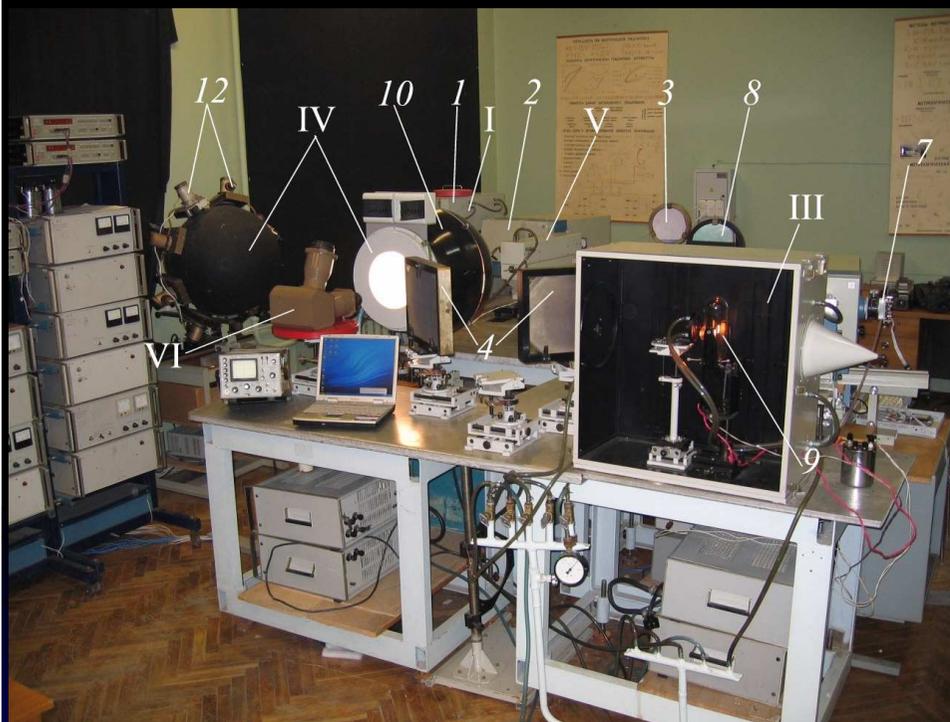
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС "КАМЕЛИЯ-М"

аккредитован в Госстандарте РБ как калибровочная лаборатория
НИИФП БГУ

(аттестат аккредитации № ВУ/112 02.5.0.0012)

Общий вид

Функциональная схема



- I - монохроматический осветитель (1 - лампа ТРУ 1100-2350, 2 - монохроматор МДР-23, 3 - коллиматорное зеркало, 4 - плоские поворотные зеркала);
- II - компаратор спектральной плотности энергетической яркости (5 - монохроматор МДР-23, 6 - модулятор, 7 - блок приемников, 8 - сферическое зеркало);
- III - опорный источник (9 - образцовая светоизмерительная лампа);
- IV - диффузный излучатель (10 - фотометрическая сфера, 11 - лампы КГМ24-150, 12 - калиброванные диафрагмы);
- V - белый осветитель (13 - лампа КГМ12-150);
- VI - калибруемый прибор

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА "КАМЕЛИЯ-М"

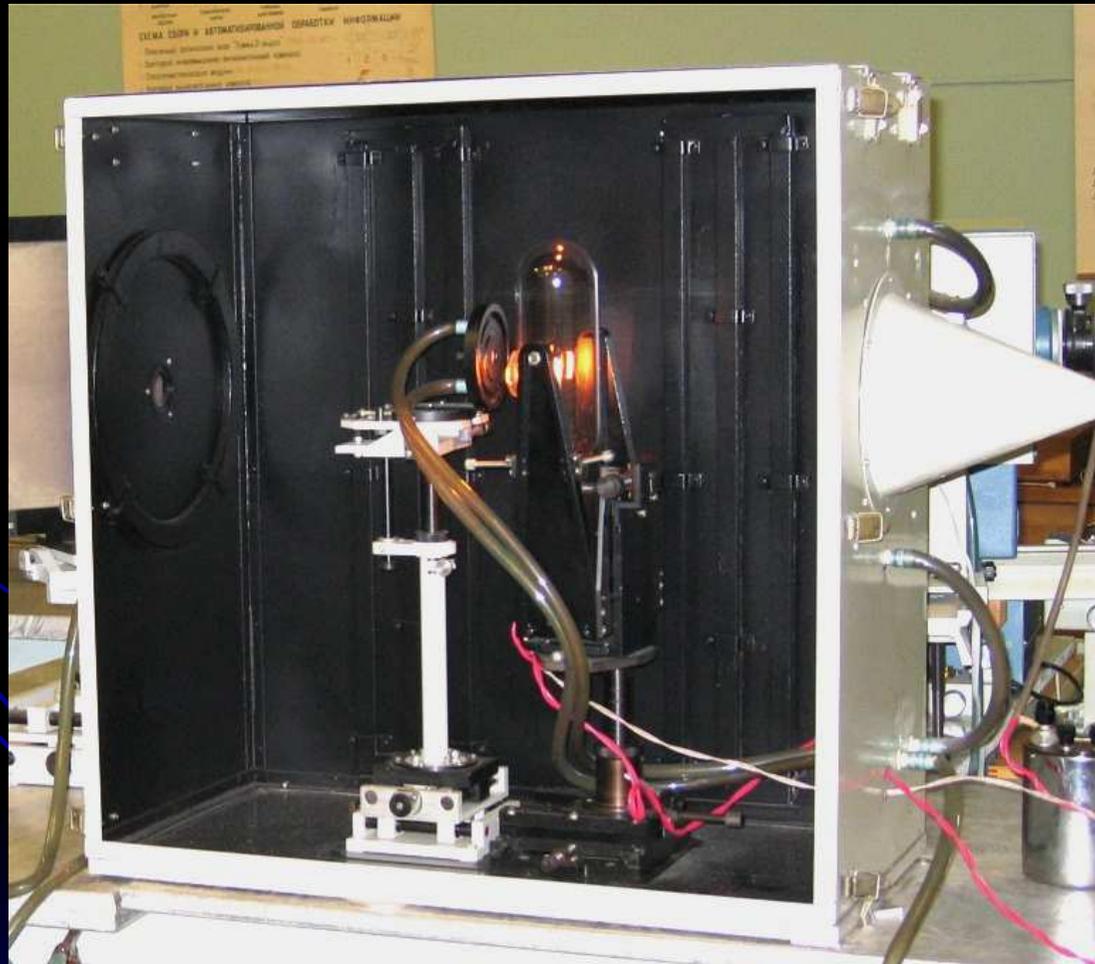
Рабочий спектральный диапазон комплекса, мкм	0,35÷2,5
Диапазон воспроизводимых комплексом абсолютных значений СПЭЯ (для $\lambda=0,7\text{мкм}$), Вт/м ² ·мкм·ср	$3,5 \cdot 10^{-5} \div 1,7 \cdot 10^{-1}$
Расширенная неопределенность измерения абсолютных значений СПЭЯ, не более, %	5
Потребляемая мощность не более, кВт	5
Напряжение питания, В	230±10%



Калибровка
Целевой
аппаратуры
Белорусского
Космического
Аппарата
на комплексе
«Камелия-М»

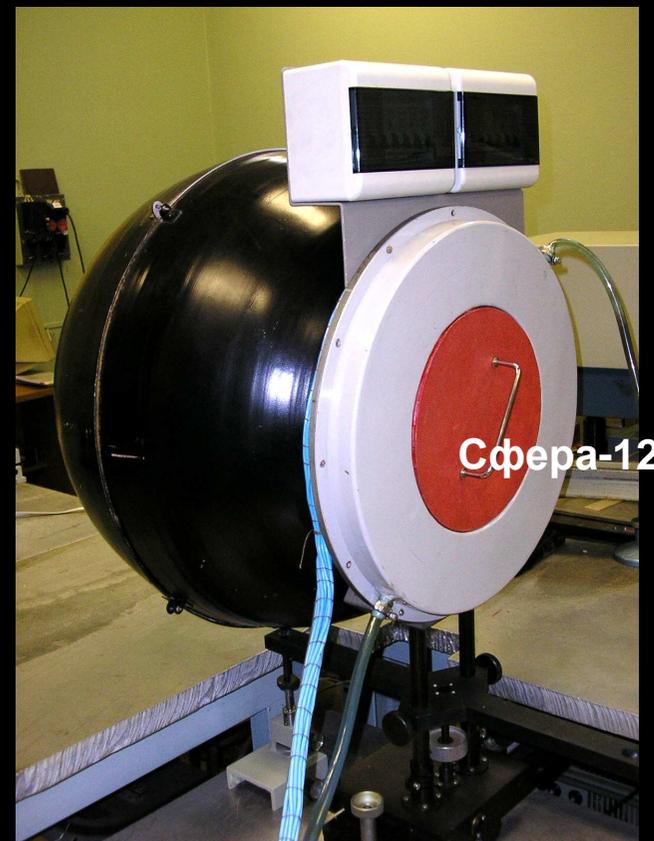
РАБОЧИЙ ЭТАЛОН

Образцовый осветитель (рабочий эталон - РЭ) предназначен для воспроизведения и передачи спектральной плотности энергетической яркости монохроматическому, диффузному и белому осветителям. Он представляет собой водоохлаждаемый светонепроницаемый кожух, в котором установлена образцовая светоизмерительная лампа (ОСИ) ТРУ1100-2350, откалиброванная по СПЭЯ



ДИФFUЗНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

предназначен для создания потока излучения сплошного спектра с известным спектральным распределением

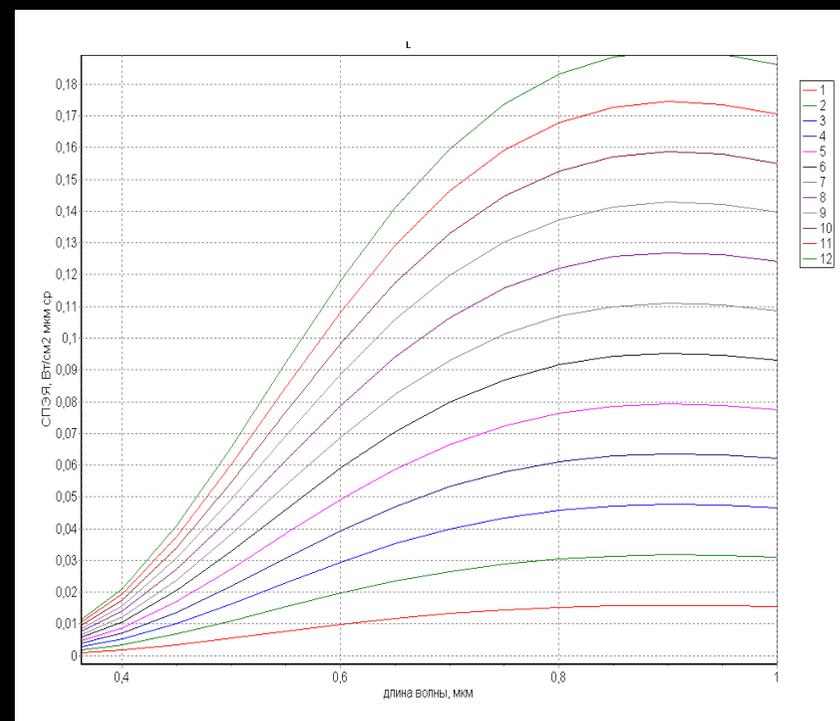
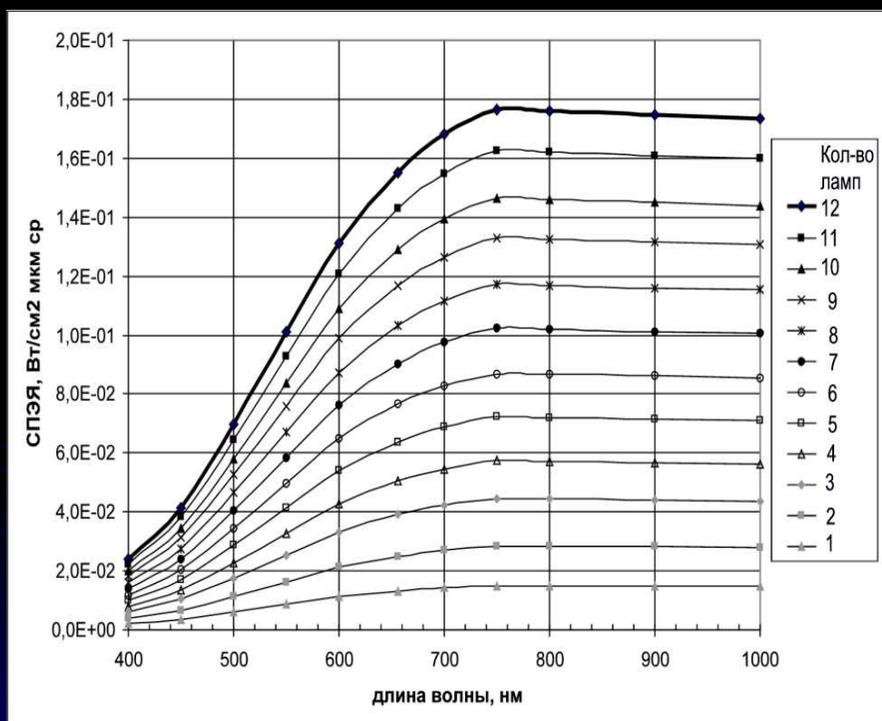


Каждая диффузный излучатель включает в себя:

- протяженный диффузный излучатель в виде неполной фотометрической сферы; с выходным отверстием диаметром 240 мм;
- осветители сферы (8/12 шт.) с лампами КГМ24-150/250;
- цифровые вольтметры В7-34;
- меры сопротивления образцовые Р-310;
- блоки питания СНП-40 (8/12 шт).

СПЕКТР ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ 0,4 -1,1 МКМ

$$L_{\lambda}(T, W_{\text{уё}}, \eta, N, D, f, \rho_{\lambda}) = \frac{\eta W_{\text{уё}} N \rho_{\lambda}}{\pi^2 D^2 \lambda^5 \sigma T^4 (1 - \rho_{\lambda} (1 - f))} \frac{c_1}{\exp(c_2 / \lambda T) - 1}$$



Экспериментальные (слева) и теоретические (справа) кривые СПЭЯ для различного количества ламп $N=1, \dots, 12$ (кривые 1, ..., 12) при следующих параметрах: $W_{\text{уё}}=250\text{Вт}$; $T=3200\text{К}$; $\eta=1$; $D=60\text{см}$, $f=0,04$; $\rho_{\lambda}=0,78$

СПЕКТРОРАДИОМЕТРЫ НА ОБЛАСТЬ СПЕКТРА 0,35 – 1,05 МКМ



Спектрорадиометр MC-08



Спектрорадиометр MC-09



Спектрорадиометр MC-10

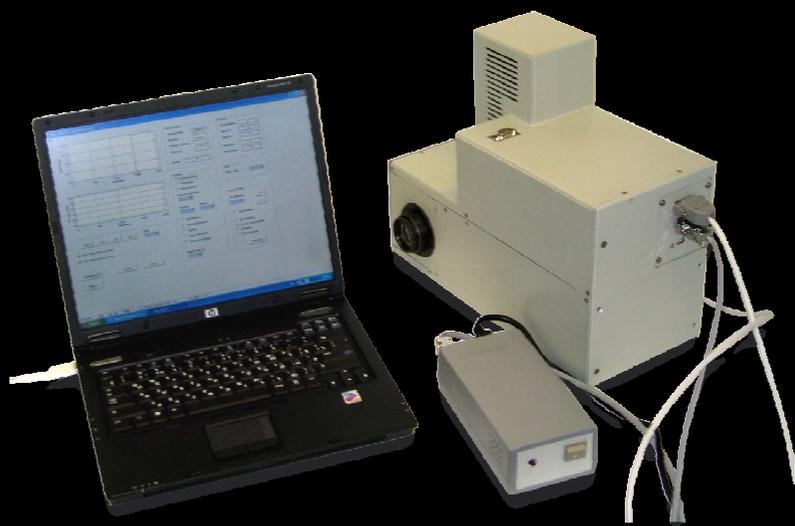


Спектрорадиометр MC-11
(входит в состав фотоспектральной системы ФСС)

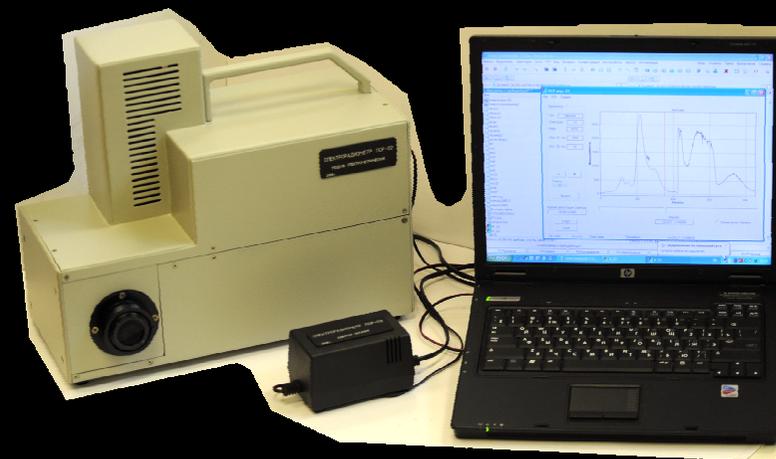


Спектрорадиометр MC-12

СПЕКТРОРАДИОМЕТРЫ НА ОБЛАСТЬ СПЕКТРА 0,35 – 2,5 МКМ



Полевой спектро радиометр ПСР-01



Полевой спектро радиометр ПСР-02



Переносной высокоточный спектро радиометр ПВС

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ КАЛИБРОВОК

1. Измерение спектрального диапазона.

2. Определение спектрального разрешения

3. Определение энергетических характеристик

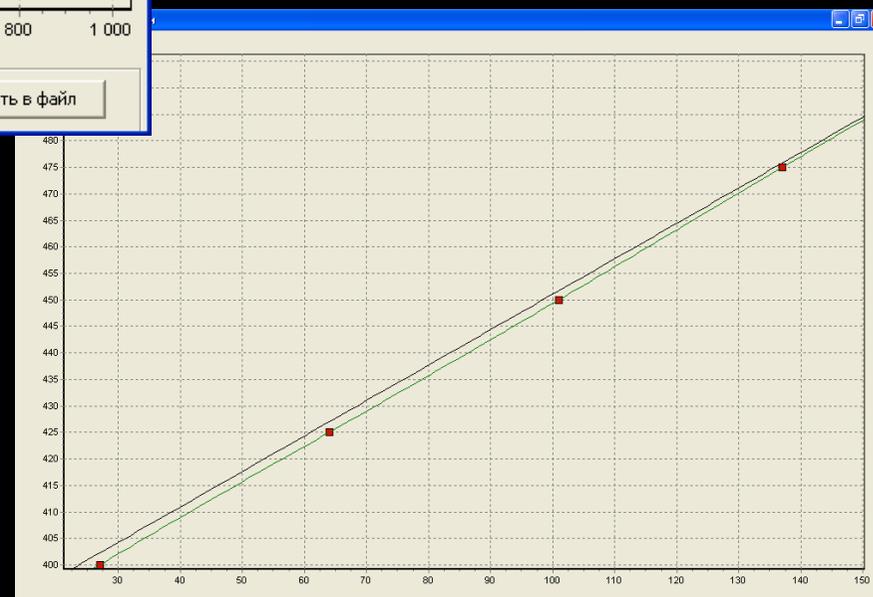
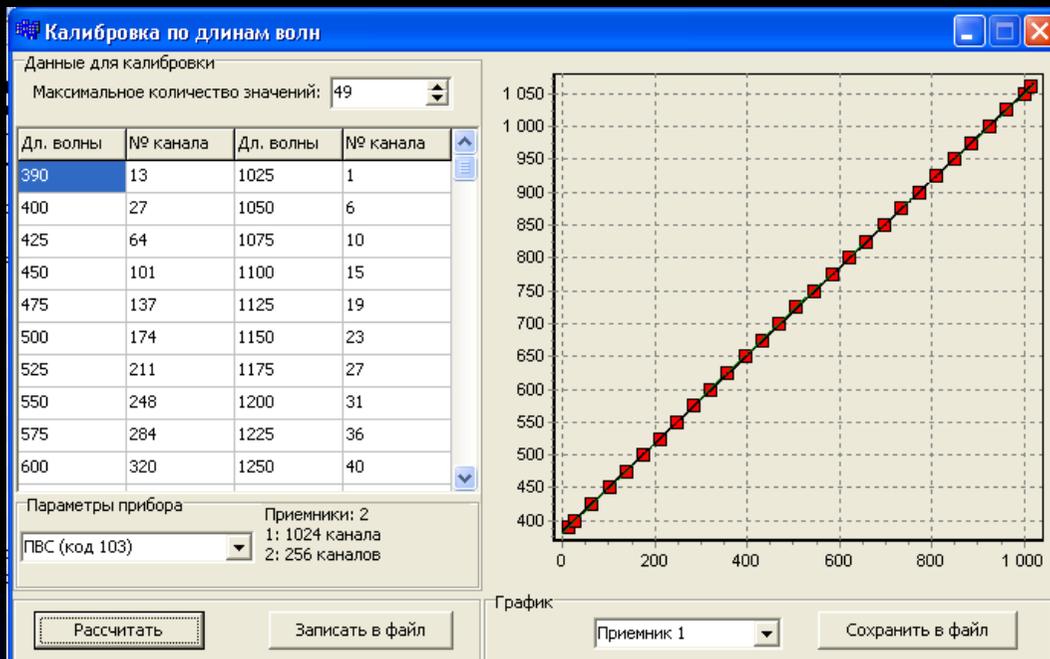
3.1. Определение пороговой СПЭЯ и сигнала насыщения

3.2. Определение динамического диапазона

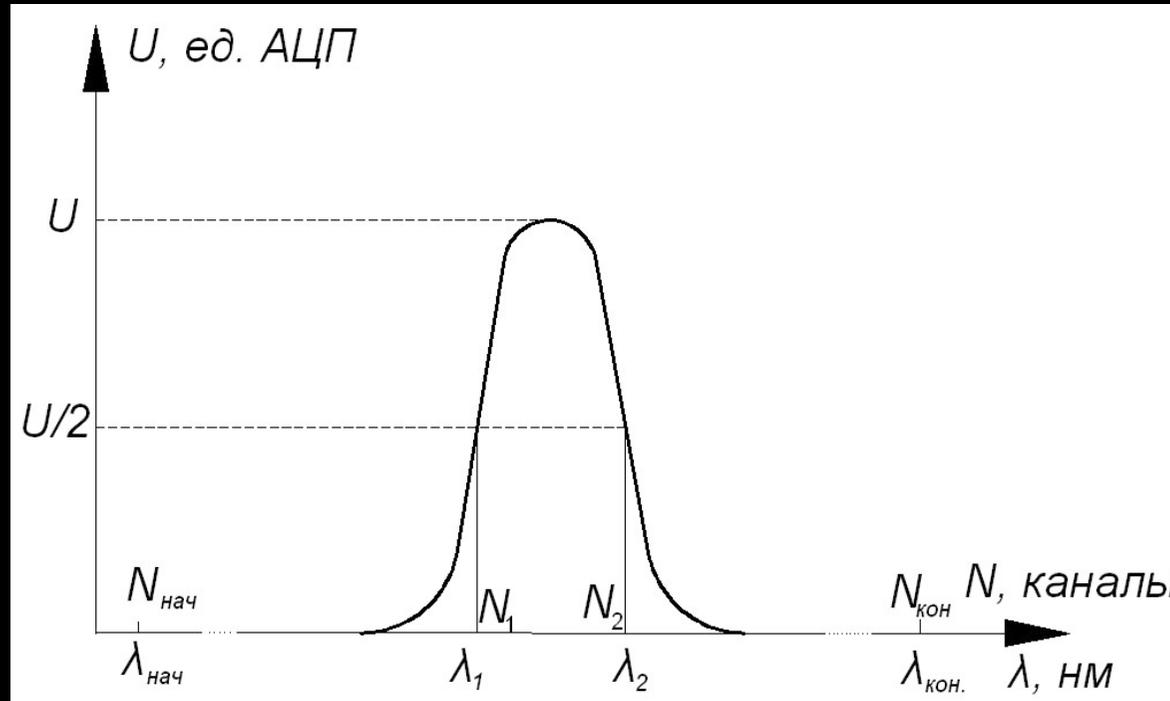
3.3. Определение спектральной чувствительности

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

Измерения проводятся при помощи монохроматора МР-23 с коллиматором.



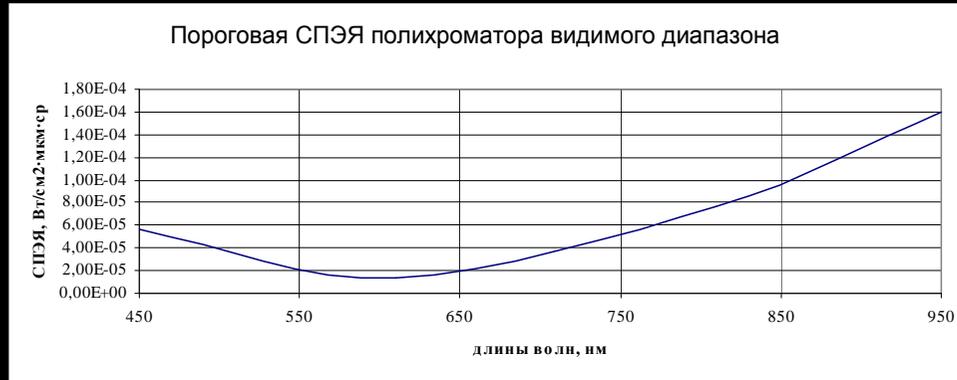
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ



Спектральное разрешение

$$\Delta\lambda = (N_2 - N_1) \frac{\lambda_{\hat{e}\hat{i}\hat{i}} - \lambda_{\hat{i}\hat{a}\hat{\div}}}{N_{\hat{e}\hat{i}\hat{i}} - N_{\hat{i}\hat{a}\hat{\div}}}$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОЙ СПЭЯ, СИГНАЛА НАСЫЩЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА



Пороговая СПЭЯ:

$$L_{\min}(\lambda_{\tilde{n}\delta}) = k_{\min} L_{\lambda_{\tilde{n}\delta}}^{c\hat{o}}$$

Сигнал насыщения:

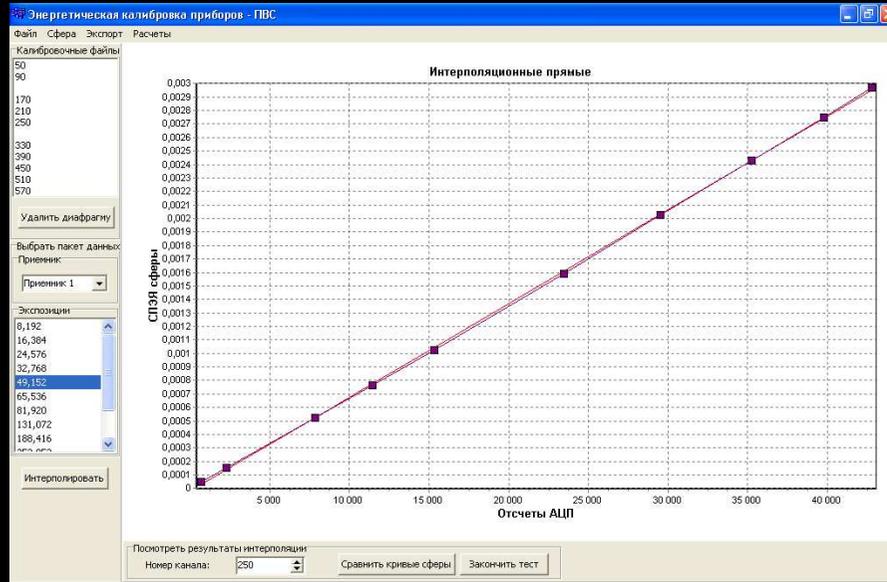
$$L_{\max}(\lambda_{\tilde{n}\delta}) = k_{\max} L_{\lambda_{\tilde{n}\delta}}^{c\hat{o}}$$

Динамический диапазон:

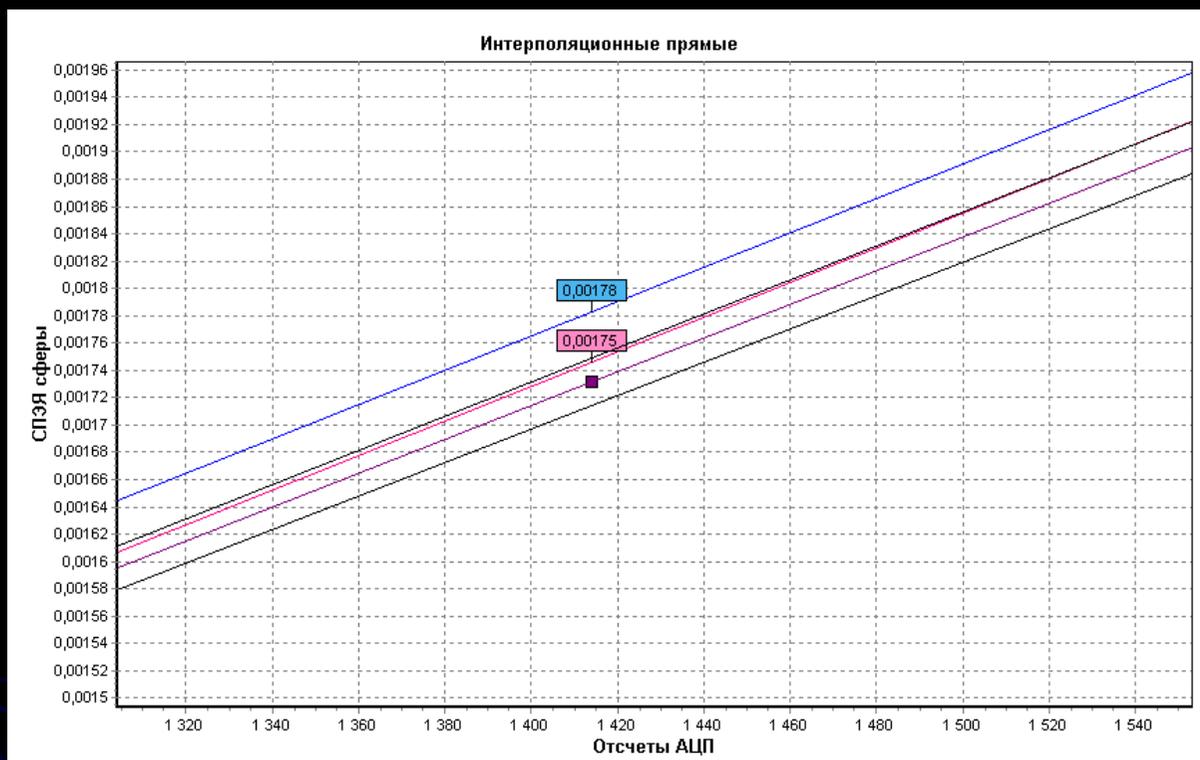
$$D_{\lambda_{\tilde{n}\delta}} = 10 \cdot \lg \frac{L_{\max}(\lambda_{\tilde{n}\delta})}{L_{\min}(\lambda_{\tilde{n}\delta})}$$



ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА АБСОЛЮТНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ



ВЫБОР АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ



- ax и ax^2+bx
- $ax+b$
- исходная кривая
- границы 1%-ного интервала

$$S_{\lambda} = \frac{1}{n_{\bar{a}}} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{\bar{U}_{\lambda,i}}{L_{\lambda,i}}$$

абсолютная
спектральная
чувствительность

Функция $ax+b$ наилучшим образом аппроксимирует кривую зависимости измеряемой СПЭЯ диффузного излучателя от величины выходного сигнала в отсчетах АЦП.

Расчет неопределенностей измерений

- Расчет оценки неопределенности измерений выходного сигнала выполняется по формуле:

$$u(\bar{V}_{\lambda,j}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V_{\lambda,j}^i - \bar{V}_{\lambda,j})^2}$$

$V_{\lambda,j}^i$ - значение выходного сигнала в отдельном измерении для фиксированных λ и j , n – количество измерений в серии

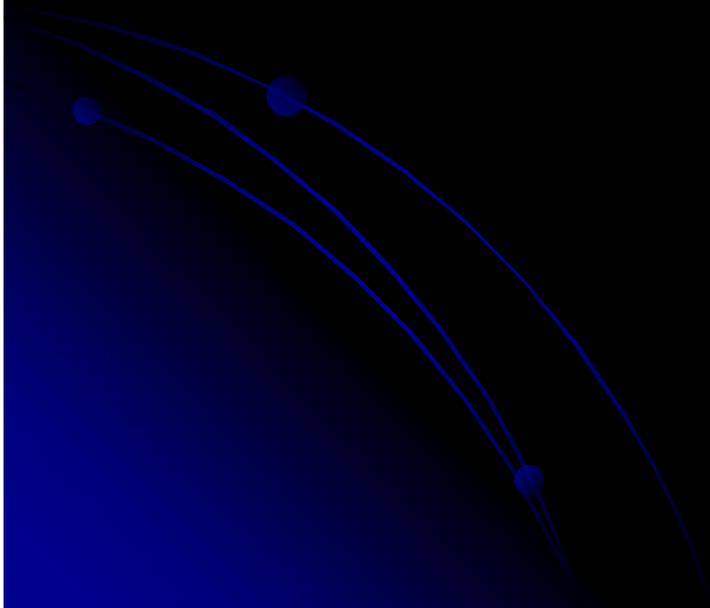
- Суммарная стандартная неопределенность рассчитывается по формуле:

$$u_{\Sigma}(S_{\lambda}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(C_{1,j}^2 \cdot u^2(\bar{V}_{\lambda,j}) + C_{2,j}^2 \cdot u^2(L_{\lambda,j}) \right)}$$

$C_{1,j}$ и $C_{2,j}$ - коэффициенты чувствительности

$u(L_{\lambda,j})$ - неопределенность измерения СПЭЯ фотометрической сферы

АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ НАЗЕМНЫХ И АВИАЦИОННЫХ
ПОЛИГОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ.



В настоящий момент в СНГ имеются следующие полигоны-стационары:

Шацкие озера (Украина-Польша)

Курский (Россия)

Гаханы (Иркутская область),

Скрипаевский (Украина)

Западная Березина (Беларусь) - проектируется

Гомельский (Беларусь) – проектируется

и др.

Полигон «Западная Березина» создается в рамках программы Союзного государства «Космос-НТ» – «Полетные калибровки». Создание полигона необходимо для проведения калибровки Белорусского космического аппарата (БКА).

Основной задачей полигона является получение данных для проведения калибровки оптической аппаратуры БКА в видимом и ближнем ИК диапазоне длин волн. Высокое пространственное разрешение БКА позволит задавать относительно небольшие размеры калибровочных участков на полигоне. На полигоне планируется проводить синхронные измерения на как минимум двух уровнях – наземном и авиационном.

АЭРОФОТОСЪЕМКА ПОЛИГОНА
«ЗАПАДНАЯ БЕРЕЗИНА»
2009 г. (разрешение 30 см)



Средства для проведения многоуровневых измерений участков полигона

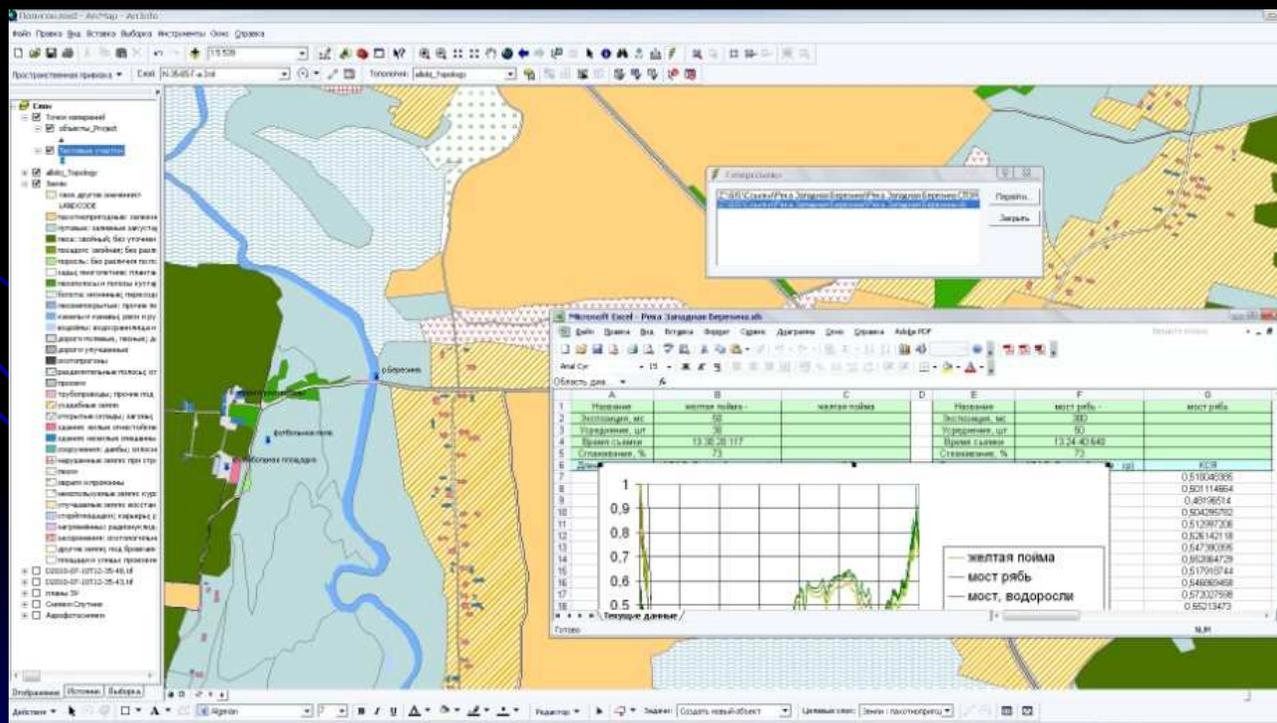
1. Спектрорадиометры серии МС



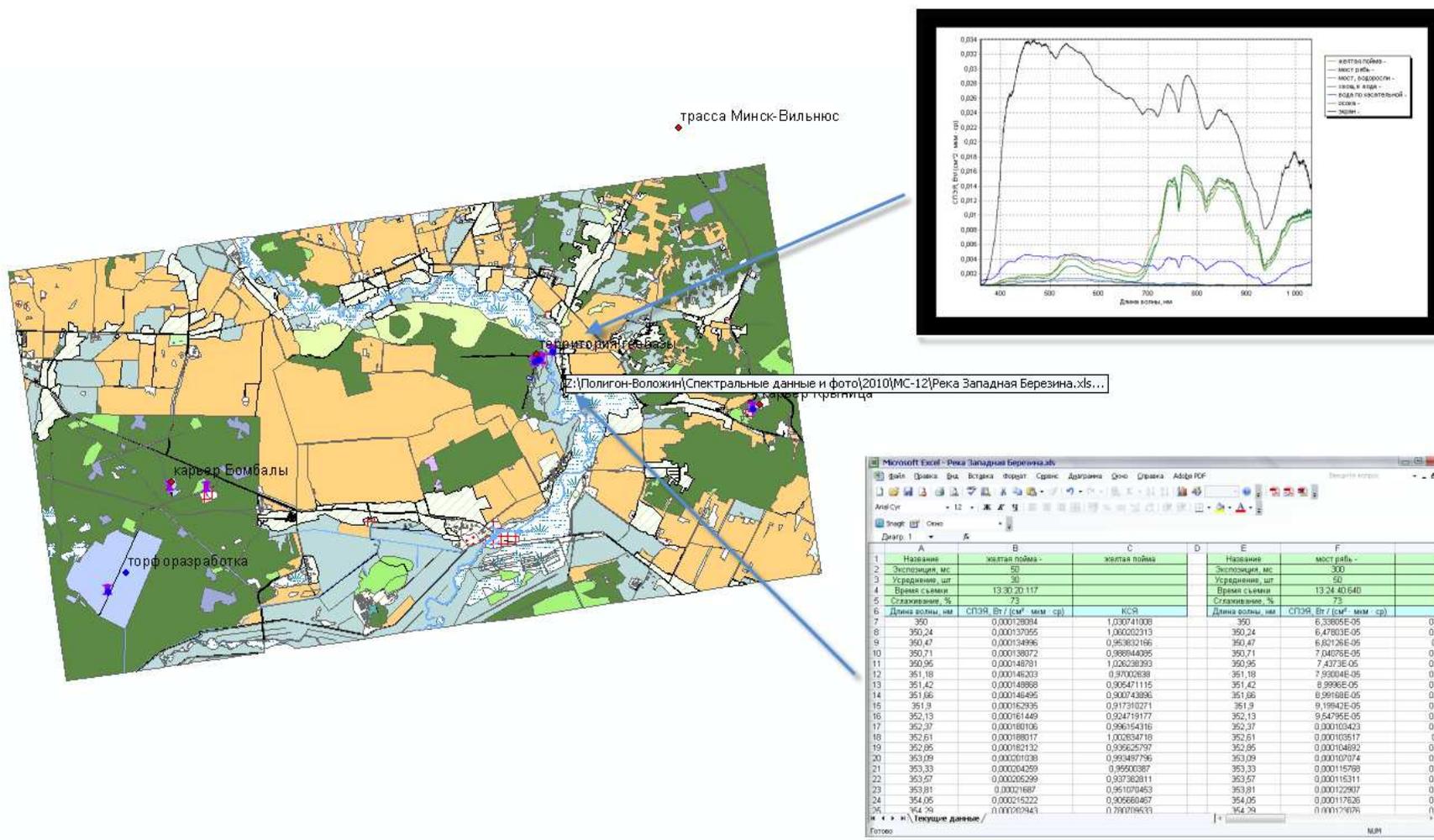
2. Авиационная система контроля зон чрезвычайных ситуаций и последствий от них (АСК-ЧС)



3. Фотоспектральная система (ФСС)



ГИС и база спектральных данных наземных измерений тестовых участков подспутникового полигона «Западная Березина»



Дешифрирование видов и подвидов земель Подспутникового полигона "Западная Березина"

Виды и подвиды земель выделены в соответствии с Кодексом Республики Беларусь о земле от 23.07.2008 №425-3

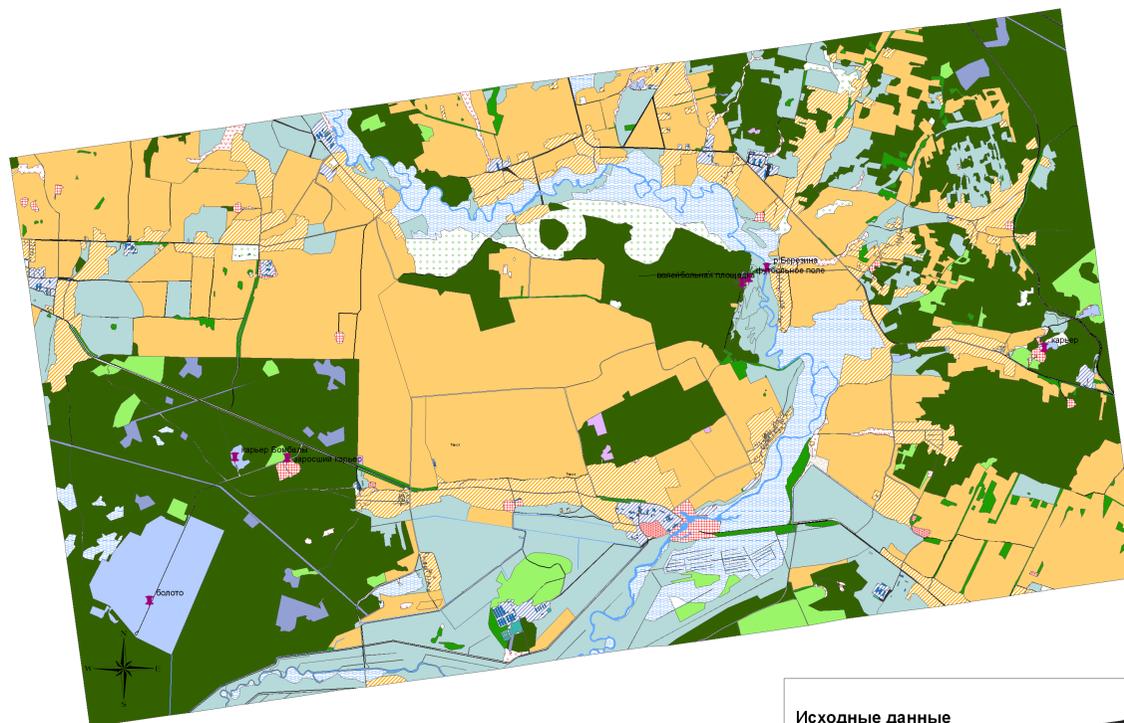
Условные обозначения

✦ Тестовые участки

Земли

Виды и подвиды земель

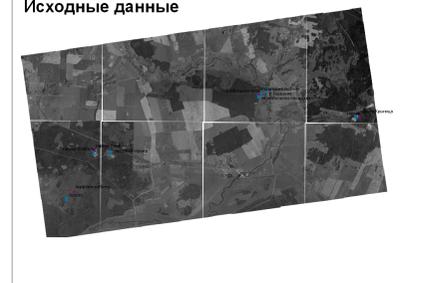
-  пахотнопригодные: пахотные; залежные
-  луговые: суходольные; заливные; заболоченные
-  леса: хвойный; лиственный; смешанный
-  посадки: хвойная; лиственная; смешанная
-  поросль: лиственная; смешанная; хвойная
-  сады; многолетние: плантации;
-  лесополосы и полосы кустарников
-  болота: низинные; переходные; верховые
-  лесонепокрытые: гари; вырубки
-  водотоки: реки и ручьи; каналы и каналы
-  водоемы: озёра; водохранилища и пруды
-  дороги улучшенные
-  дороги: полевые, лесные; просёлочные
-  скотопрогоны
-  откосы; кюветы; обочины
-  просеки
-  трубопроводы; мосты, путепроводы, эстакады
-  усадебные земли
-  открытые склады; загоны
-  здания жилые
-  здания нежилые
-  сооружения
-  нарушенные земли
-  пески
-  овраги и промоины
-  неиспользуемые земли
-  улучшаемые земли: восстановление плодородия; мелиорация
-  сторилплощадки; карьеры; разработки торфа и сапропелей; отвалы и терриконы
-  свалки
-  захоронения: скотомогильники; кладбища
-  другие земли; под бровками



Координаты	вершин	полигона
ВЛ: 54 08 51.45 N	26 15 48.28 E	
ВП: 54 09 57.02 N	26 28 14.64 E	
НЛ: 54 04 57.72 N	26 16 48.37 E	
НП: 54 06 03.01 N	26 29 13.23 E	

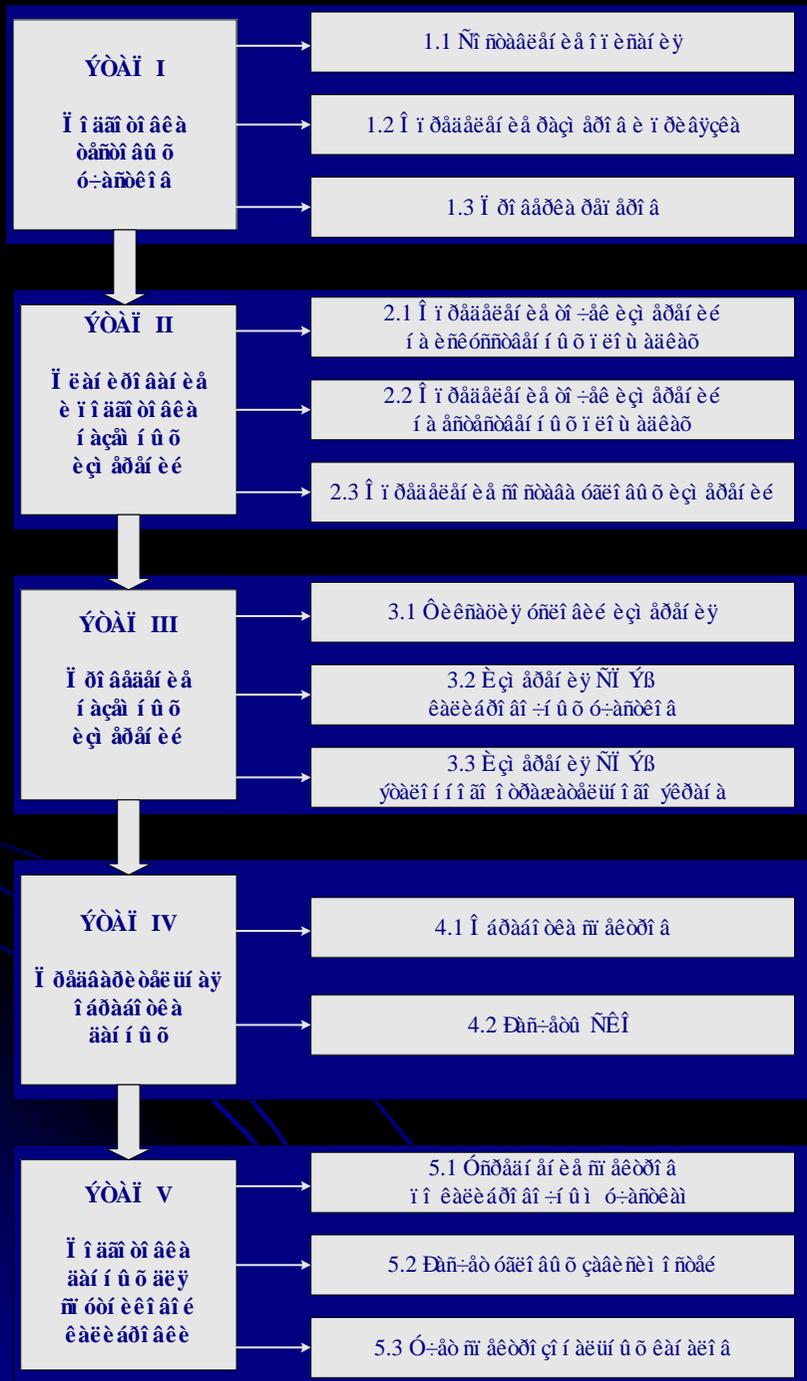
Площадь полигона 13.8*7.4=102.12 кв.км

Исходные данные



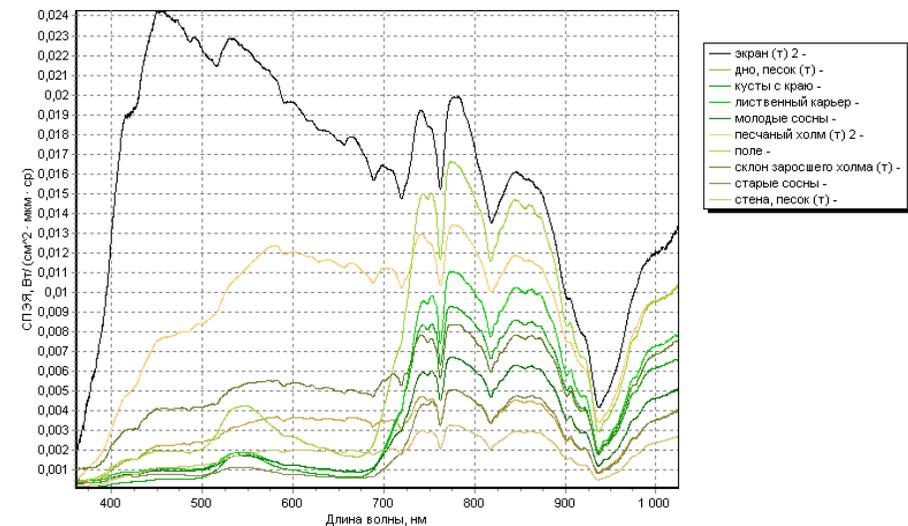
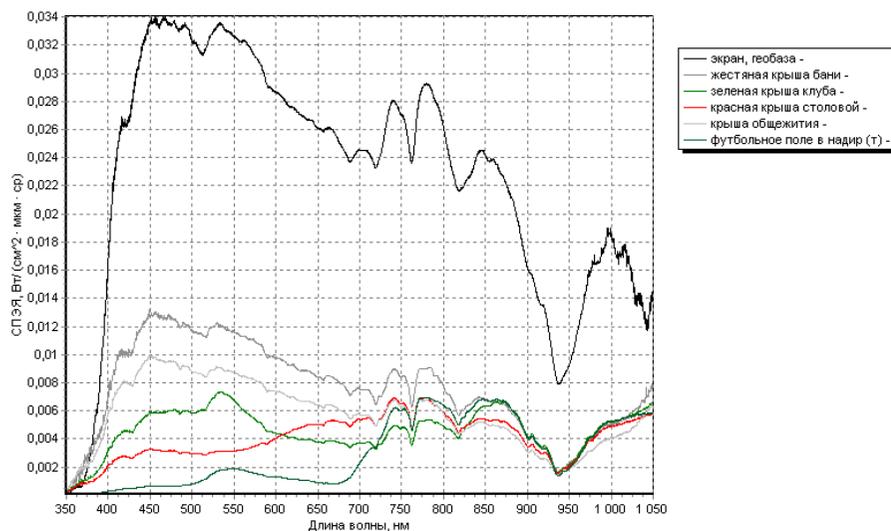
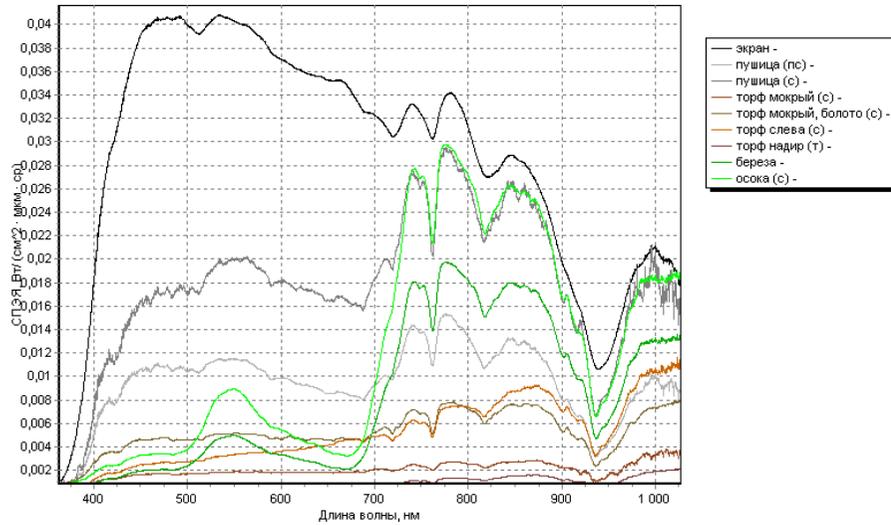
Площади различных видов земель территории полигона

Класс	Площадь, км ²	Доля, %
пахотнопригодные	31,22	30,78
леса	30,03	29,61
луговые	14,46	14,26
дворы	8,64	8,52
болота	5,52	5,44
разработки и стройплощадки	1,93	1,90
многолетние	1,71	1,68
дороги	1,44	1,42
посадки	1,40	1,38
прочие лесопокрытые	1,37	1,35
прочие лесонепокрытые	0,86	0,84
поросль	0,66	0,65
водотоки	0,62	0,61
неиспользуемые земли	0,54	0,53
нарушенные земли	0,41	0,41
неклассифицированные	0,21	0,20
здания	0,15	0,15
захоронения	0,09	0,09
свалки	0,07	0,07
водоёмы	0,04	0,04
сооружения	0,04	0,04
элементы коммуникаций	0,01	0,01
Общий итог	101,42	100,00

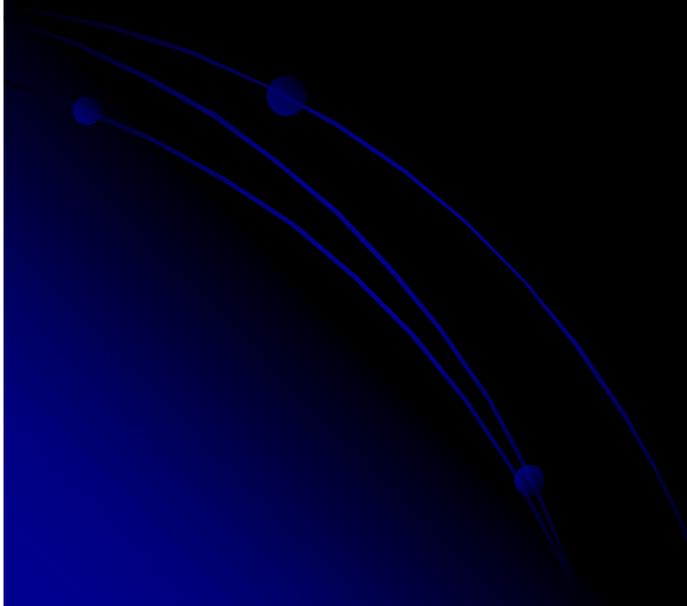
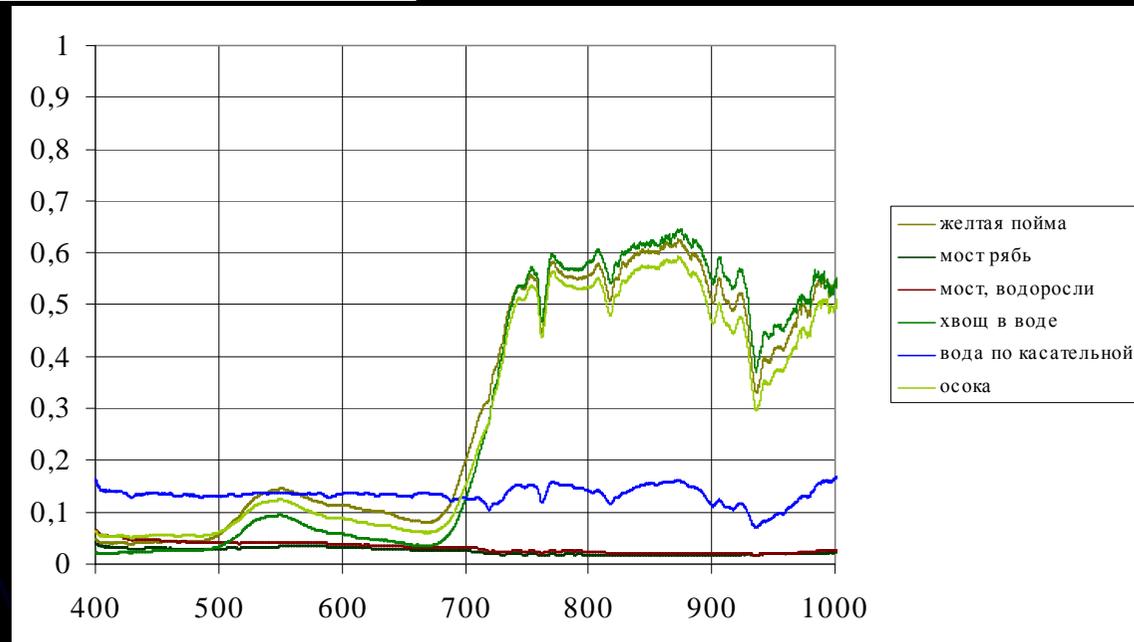
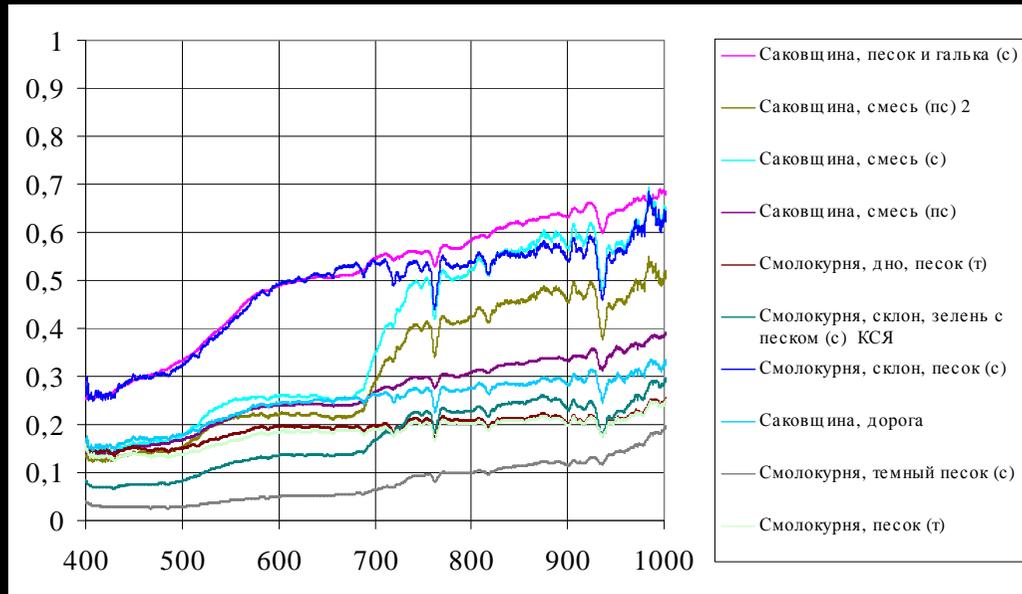


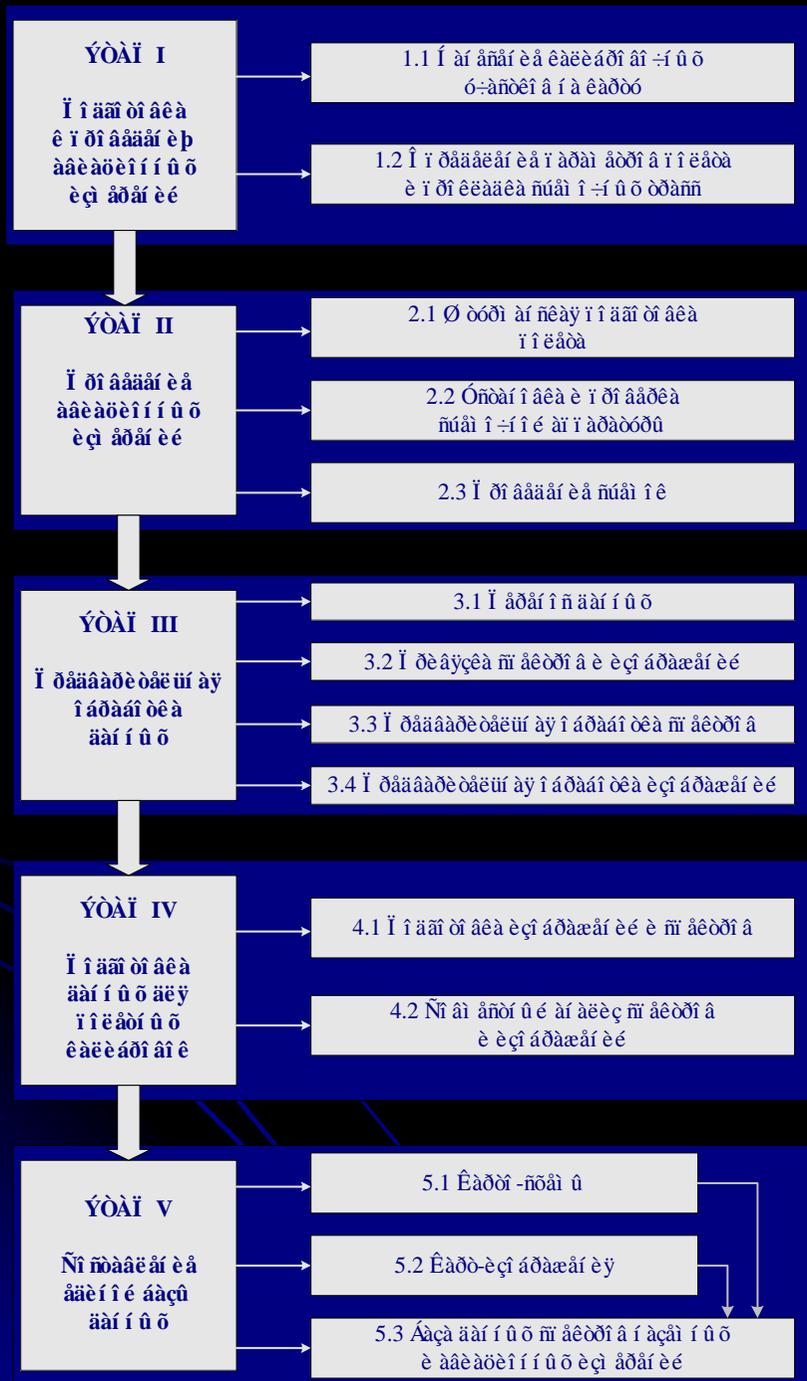
Блок-схема методики наземных измерений характеристик подстилающих поверхностей

Спектры СПЭЯ объектов полигона «Западная Березина» в диапазоне 0,35 - 1,05 мкм, снятых МС-12



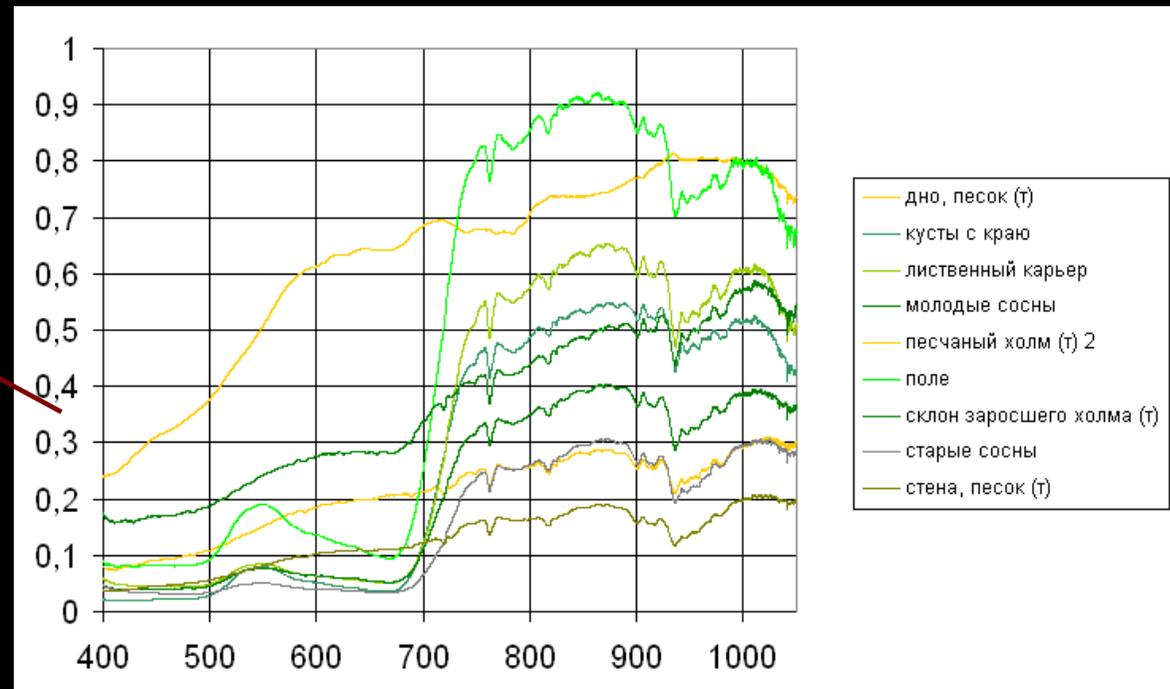
Расчет КСЯ тестовых участков полигона



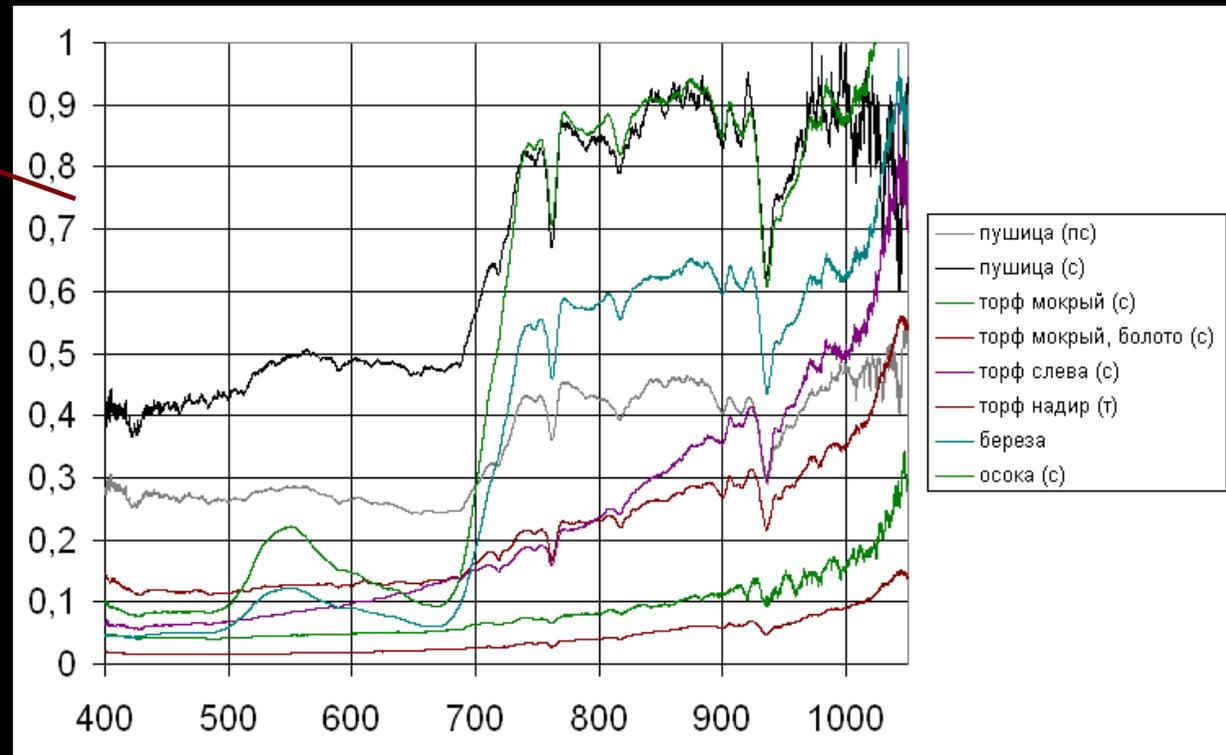
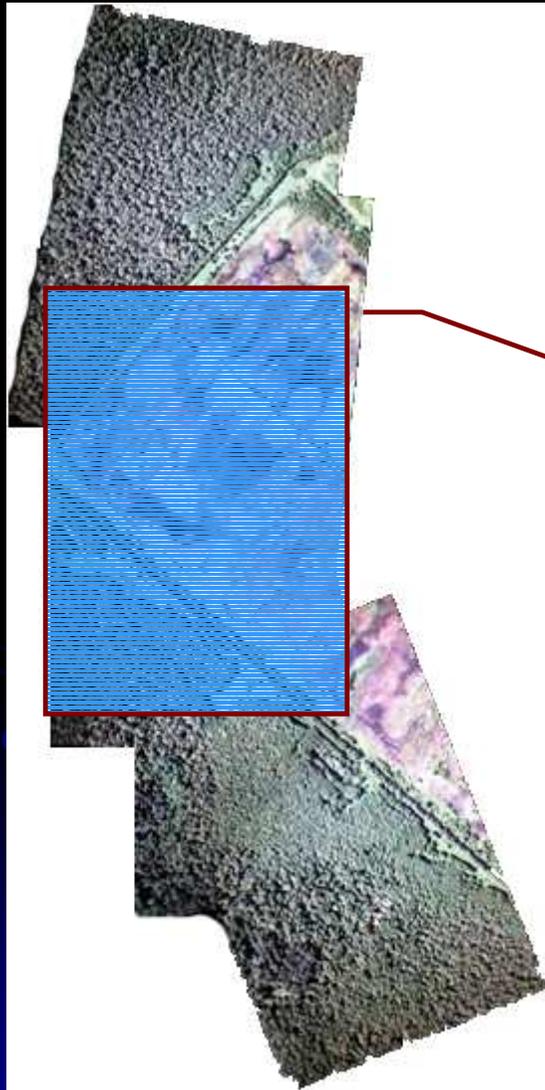


**Блок-схема методики
 авиационных
 измерений
 характеристик
 подстилающих
 поверхностей**

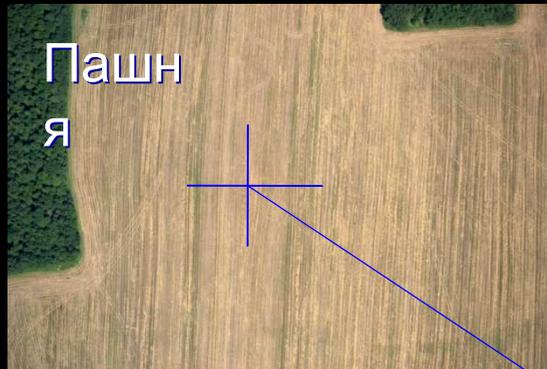
Карьер, данные АСК-ЧС (спектрозональные изображения) и МС-12 (КСЯ)



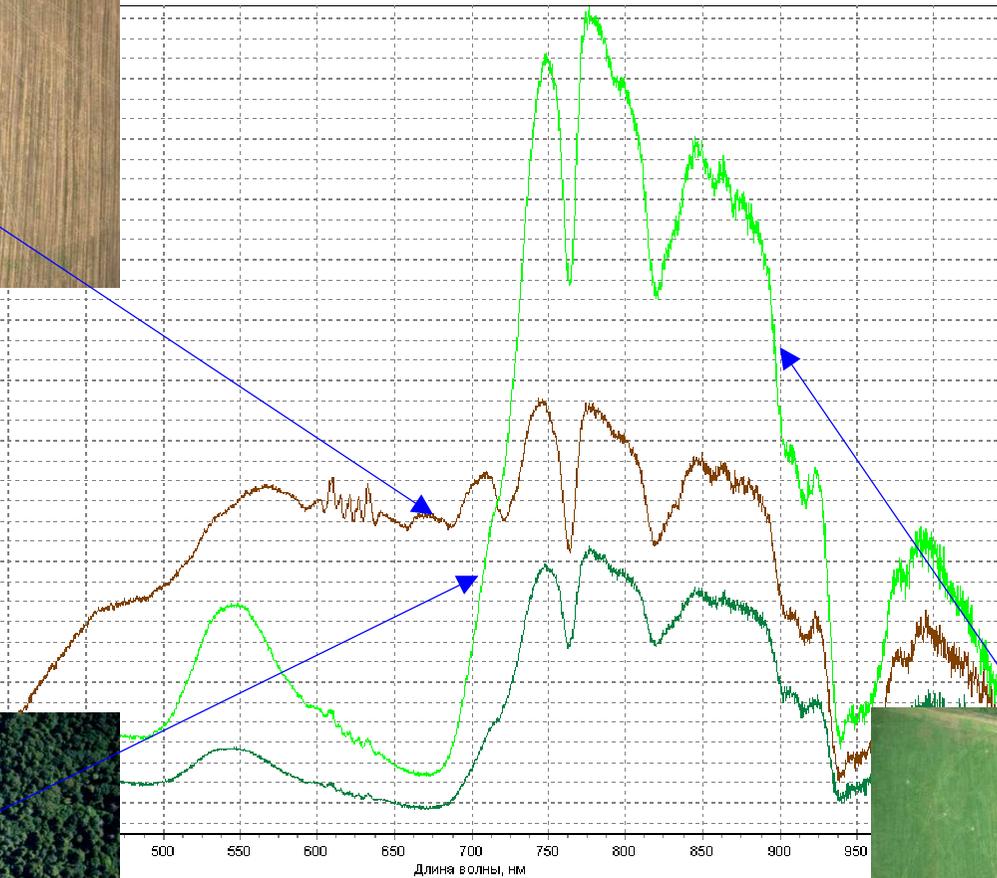
Торфяник, данные АСК-ЧС (спектрозональные изображения) и МС-12 (КСЯ)



Спектры отраженного излучения и изображения различных площадок полигона "Западная Березина", зарегистрированные ФСС



0,0135
0,013
0,0125
0,012
0,0115
0,011
0,0105
0,01
0,0095
0,009
0,0085
0,008
0,0075
0,007
0,0065
0,006
0,0055
0,005
0,0045
0,004
0,0035



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



Телефон: + 375 17 278 04 09

Факс: + 375 17 278 57 26

Е-mail: info@remsens.by

Сайт: remsens.by