

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА КОМПЛЕКСА МНОГОЗОНАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ (КМСС)

А.С. Василейский², Б.С. Жуков¹, С.Б. Жуков²,
А.Н. Куркина², И.В. Полянский¹

¹ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва

² Автономная некоммерческая организация — АНО «Космос-НТ», Москва

Относительная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС), который будет установлен на КА «Метеор-М» № 1, проводилась путем регистрации темнового сигнала и методом съемки интегрирующей сферы при различных временах экспозиции. По полученным результатам для каждого элемента ПЗС в каждом канале определялись: среднеквадратическая величина шума, диапазон линейности, темновой сигнал и относительный коэффициент чувствительности, который далее использовался для расчета абсолютного коэффициента чувствительности по результатам абсолютной градуировки центральной группы элементов. Исследована зависимость этих параметров от температуры и коэффициента усиления сигнала. Результаты калибровки КМСС сохранялись в файлах радиометрической калибровки, которые будут использоваться для радиометрической коррекции видеоданных спутниковых съемок.

Relative radiometric calibration of the Satellite Multispectral Imaging System (KMSS), which will be installed on the Meteor-M Nr. 1 spacecraft, was carried out using dark signal measurements and integration sphere imaging at various exposure time. This allows calibration of the RMS noise amplitude, response linearity interval, dark signal and the relative sensitivity coefficient for all CCD elements in all KMSS channels and to calculate their absolute sensitivity coefficient using absolute calibration of a group of central CCD elements. These characteristics were investigated as functions of the both temperature and amplification coefficient. The calibration results are stored in the radiometric calibration files for further radiometric correction of the satellite images.

1. Задачи и особенности калибровки камер КМСС

В состав комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М» № 1 входят две трехзональ-

ные камеры МСУ-100 с фокусным расстоянием 100 мм и одна трехзональная камера МСУ-50 с фокусным расстоянием 50 мм [1]. Спектральные зоны МСУ-100 (535...575, 630...680 и 700...900 нм) оптимизированы для исследований суши, а спектральные зоны МСУ-50 (370...450, 450...510 и 580...690 нм) — для исследований океана.

Задача радиометрической калибровки КМСС — установление связи между цифровыми сигналами $DN(x)$, регистрируемыми элементарными детекторами x в спектральных каналах каждой камеры КМСС, и значениями зональной яркости $B(x)$. Зональная яркость является средневзвешенным значением спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) $B(x, \lambda)$, где в качестве весовой функции используется функция спектральной чувствительности (ФСЧ) канала $S(x, \lambda)$:

$$B(x) = \frac{\int S(x, \lambda) B(x) d\lambda}{\int S(x, \lambda) d\lambda}. \quad (1)$$

Предполагается, что форма ФСЧ одинакова для всех элементарных детекторов одного канала.

При условии линейности характеристики свет — сигнал в рабочем диапазоне ПЗС $DN(x)$ и $B(x)$ связаны соотношением:

$$DN(x) = \int S(x, \lambda) B(x, \lambda) d\lambda + DC(x) = c(x) B(x) + DC(x), \quad (2)$$

где $DC(x)$ — темновой сигнал; $c(x)$ — абсолютный коэффициент чувствительности элементарного детектора x , который определяется как

$$c(x) = \int S(x, \lambda) d\lambda. \quad (3)$$

При калибровке камер МСУ-50/100 учитывались их следующие технические и конструктивные особенности:

- Темновой сигнал чувствительных элементов ПЗС может меняться со временем из-за изменений температуры и некоторой нестабильности электроники. Для обеспечения возможности учета этих изменений конструкция используемых ПЗС-линеек включает набор так называемых «темновых» детекторов, представляющих собой элементарные детекторы, полностью

идентичные остальным (так называемым «световым» или «рабочим»), но закрытые светонепроницаемым экраном. Измерение сигналов, генерируемых темновыми детекторами, позволяет оценивать для каждой строки изображения изменение темновых сигналов световых детекторов.

- При существенном повышении уровня темнового сигнала канала в полете возможно его уменьшение до оптимального уровня путем использования напряжения смещения, отличного от установленного при калибровке. При этом темновой сигнал для всех элементарных детекторов канала смещается на одну и ту же величину. Анализ сигналов темновых детекторов позволяет учесть и это смещение. При калибровке напряжение смещения устанавливается как функция коэффициента усиления.
- Линейный ПЗС-приемник, используемый в МСУ-50/100, снабжен двумя выходными регистрами с чередованием считывания накопленных элементарными детекторами сигналов. При этом образуются две группы элементарных детекторов («четные» и «нечетные»), обладающие существенно различающимися характеристиками по темновому сигналу и чувствительности. Это приводит к необходимости раздельной обработки сигналов, зарегистрированных «четными» и «нечетными» детекторами.

2. Процедуры калибровки

Методика радиометрической калибровки КМСС, включающая спектральную калибровку, измерения по интегрирующей сфере и абсолютную калибровку по эталонной лампе, описана в работе [2]. В данной работе рассматриваются следующие процедуры калибровки КМСС:

- анализ шумовых характеристик;
- калибровка темнового сигнала;
- проверка линейности характеристики свет-сигнал;
- калибровка относительного коэффициента чувствительности;
- расчет абсолютного коэффициента чувствительности.

При этом использовались результаты спектральной и абсолютной калибровки выбранного участка ПЗС-линеек (см. статью* в настоящем сборнике, с. 549).

Анализ шумовых характеристик

Проверка шумовых характеристик каналов осуществлялась по вариациям сигнала темновых изображений. С этой целью при фиксированных значениях параметров (температура, коэффициент усиления, напряжение смещения) получались изображения размером $N = 1000$ строк. Величина шума элементарного детектора x характеризовалась его среднеквадратической амплитудой:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_y (I(x, y) - \bar{I}(x))^2},$$

где $I(x, y)$ — изображение; x — номер детектора (т. е. номер столбца изображения); y — номер строки изображения; $\bar{I}(x) = \sum_y I(x, y) / N$ — средний сигнал детектора.

При коэффициенте усиления $k = 1$ среднеквадратическая амплитуда шума элементарных детекторов не превышала 0,5, причем не выявлено ее систематической зависимости от температуры (коэффициент усиления указывается в линейных единицах). Не выявлено также зависимости величины шума от времени экспозиции. Все это говорит о том, что наблюдаемый шум не имеет теплового характера, а формируется в электронных цепях считывания сигнала ПЗС.

Зависимость величины шума от коэффициента усиления представлена на рис. 1 (здесь и ниже для иллюстрации используются результаты, полученные в канале 1 одной из камер МСУ-100). Указанная зависимость близка к линейной, за исключением флуктуаций при небольших значениях k , которые можно объяснить квантованием сигнала.

Шумовые характеристики темновых детекторов аналогичны световым. Однако для темновых детекторов представляет интерес не столько шум отдельных детекторов, сколько

* Ваваев В.А., Ваваев М.В., Полянский И.В. Радиометрическая градуировка комплекса многозональной съемки (КМСС).

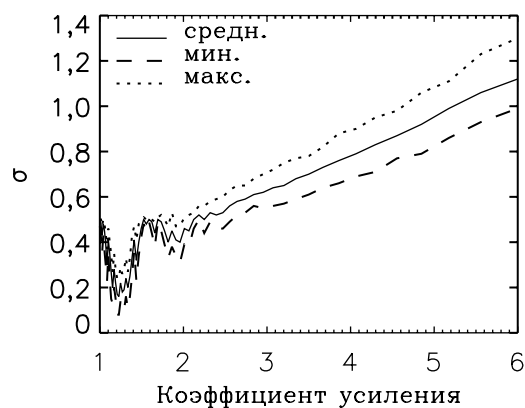


Рис. 1. Зависимость среднего, минимального и максимального значения среднеквадратической амплитуды шума элементарных детекторов от коэффициента усиления

флуктуации их среднего сигнала, поскольку именно он используется при радиометрической коррекции изображений. За счет усреднения флуктуации среднего сигнала темновых детекторов не превышает 0,2.

Калибровка темнового сигнала

Темновой сигнал элементарных детекторов определялся по изображениям, полученным при закрытом объективе камеры, путем усреднения по $N = 1000$ строкам.

Зависимости темнового сигнала от времени экспозиции не выявлено, что свидетельствует о том, что он, в основном, формируется в электронных цепях считывания сигнала ПЗС, а вкладом эффекта тепловой генерации заряда в ПЗС можно пренебречь. Можно отметить небольшой рост темнового сигнала при повышении температуры, который, однако, не превышал 1 градации сигнала при $k = 1$.

Зависимость величины темнового сигнала от коэффициента усиления k представлена на рис. 2. Несмотря на частичную компенсацию эффекта изменения k путем подбора напряжения смещения, наблюдается значительный рост темнового сигнала с увеличением k . Указанная зависимость носит «пилообразный» характер, связанный с выбором раз-

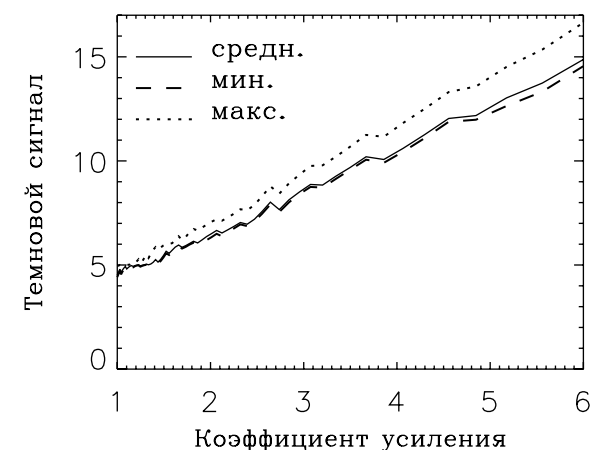


Рис. 2. Зависимость средней, минимальной и максимальной величин темнового сигнала элементарных детекторов от коэффициента усиления

личных напряжений смещения при разных коэффициентах усиления.

Разброс значений темнового сигнала элементарных детекторов существенно меньше 1 градации сигнала при $k = 1$ и увеличивается до 2 градаций сигнала при $k = 6$.

Средний сигнал темновых детекторов определялся усреднением темнового изображения по 40 детекторам отдельно для «четных» и «нечетных» детекторов.

Сигнал темновых детекторов можно использовать для коррекции зависимости темнового сигнала световых детекторов от коэффициента усиления и напряжения смещения. Для этого рассмотрим следующую модель формирования темнового сигнала:

$$DC(x, k) = ak(U(x) + \Delta U(x)), \quad (4)$$

где $U(x)$ — напряжение, считываемое с элемента x ПЗС; $\Delta U(k)$ — напряжение смещения, устанавливаемое в зависимости от коэффициента усиления k ; a — константа, связывающая напряжение на входе АЦП с цифровым сигналом на его выходе.

Аналогичным образом, средний сигнал темновых детекторов DC_{dark} описывается выражением

$$DC_{dark}(k) = ak(U_{dark} + \Delta U(k)).$$

Путем перехода к разности темновых сигналов световых и темновых элементов исключается влияние напряжения смещения $\Delta U(k)$:

$$DC(x, k) - DC_{dark}(k) = ak(U(x) - U_{dark}).$$

В частности, при некотором выбранном опорном коэффициенте усиления $k = k_d$ имеем

$$DC(x, k_d) - DC_{dark}(k_d) = ak_d(U(x) - U_{dark}).$$

Используя последние два выражения, получаем

$$DC(x, k) = \frac{k}{k_d} (DC(x, k_d) - DC_{dark}(k_d)) + DC_{dark}(k). \quad (5)$$

В рамках этой модели темновой сигнал световых элементов при коэффициенте усиления k может быть оценен по их темновому сигналу при коэффициенте усиления k_d и сигналам темновых элементов. В качестве k_d выбрано значение 1,588, которое близко к среднему используемому при реальной съемке значению коэффициента усиления.

Ошибки данной модели показаны на рис. 3. Средняя величина этой ошибки существенно меньше 0,1 градации сигнала. Максимальное значение ошибки, которое наблюдается на небольшом количестве «дефектных» элементов, не превышало 0,5 градации сигнала. Поскольку ошибки модели сопоставимы с уровнем шума, достаточно сохранить в калибровочных файлах значения темнового сигнала элементов только для выбранного значения k_d и далее использовать соотношение (5) для их оценки при произвольном значении коэффициента усиления и напряжения смещения.

Проверка линейности характеристики свет – сигнал

Проверка линейности характеристики свет – сигнал камер КМСС проводилась путем съемки интегрирующей сферы при трех временах экспозиции (в мс) $\tau_n = 2n$, где $n = 1, 2, 3$ – номер измерения. Усреднение сигналов элементарных детек-

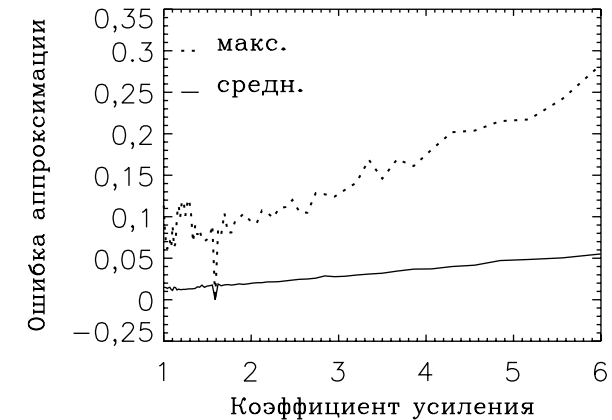


Рис. 3. Средняя и максимальная ошибка аппроксимации темнового сигнала в зависимости от коэффициента усиления

торов проводилось по 1000 строкам. При изменении коэффициента усиления яркость сферы подбиралась так, чтобы при максимальном времени экспозиции сигнал составлял 230...240 градаций.

Относительный коэффициент чувствительности определялся по соотношению (рис. 4)

$$c_{отн} = \frac{I_3 - DC}{3},$$

а коэффициент нелинейности канала – по соотношению

$$\gamma = \frac{\max(\Delta_1, \Delta_2)}{I_3 - DC} \times 100 \%,$$

где I_n – сигнал при времени экспозиции τ_n ; DC – темновой сигнал при том же k ; $\Delta_n = |I_n - \tilde{I}_n|$ – разность реально измеренного сигнала I_n и сигнала \tilde{I}_n , полученного при линейной аппроксимации характеристики свет – сигнал с определенным выше коэффициентом чувствительности $c_{отн}$.

По ТУ КМСС средний коэффициент нелинейности канала не должен превышать 2%. Это условие удовлетворялось для всех камер при $k > 1,3$, а в некоторых случаях – и при меньших коэффициентах усиления.

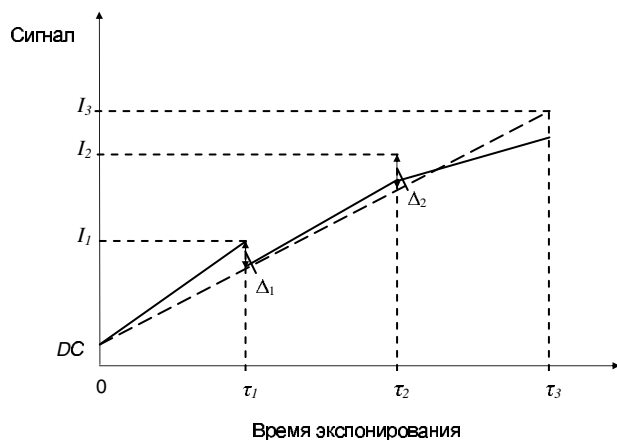


Рис. 4. Определение коэффициентов чувствительности и нелинейности

Калибровка относительного коэффициента чувствительности

Пример зависимости коэффициента чувствительности от номера элементарного светового детектора приведен на рис. 5. Систематический спад чувствительности к краю ПЗС-линейки связан с уменьшением освещенности фокальной плоскости при удалении от оптической оси. Кроме того, заметны флуктуации чувствительности между отдельными элементарными детекторами.

Форму распределения коэффициента чувствительности вдоль ПЗС-линейки можно характеризовать отношением $c_{\text{отн}}(x)/c_{\text{отн}}(0)$, где $c_{\text{отн}}(0)$ — коэффициент чувствительности первого элементарного светового детектора, а зависимость формы от коэффициента усиления — функцией

$$f(x, k) = \frac{c_{\text{отн}}(x)/c_{\text{отн}}(0)}{c_{\text{отн}}^0(x)/c_{\text{отн}}^0(0)}. \text{ Здесь } c_{\text{отн}}^0(x) \text{ — относительный}$$

коэффициент чувствительности при каком-либо фиксированном значении коэффициента усиления, при котором обеспечивается линейность характеристики свет — сигнал. В идеале, если форма распределения коэффициента чувстви-

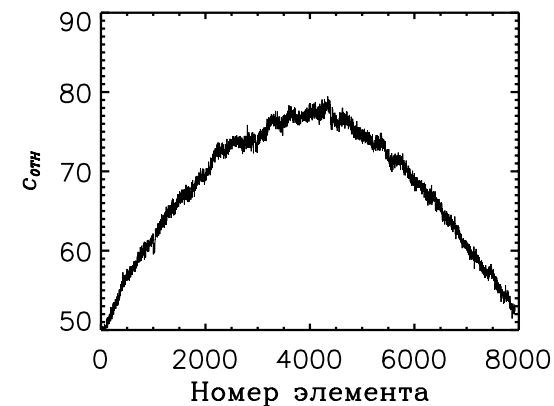


Рис. 5. Зависимость относительного коэффициента чувствительности от номера элементарного детектора при $k = 1,588$

тельности не зависит от коэффициента усиления, функция $f(x, k)$ должна быть равна 1.

На рис. 6 приведены максимальные и минимальные значения этой функции вдоль ПЗС-линейки в зависимости от k , оцененные по той же серии измерений, что и линейность

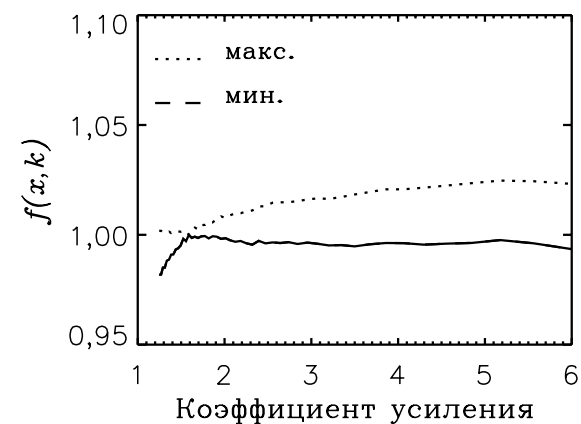


Рис. 6. Зависимость минимальных и максимальных значений функции $f(x, k)$ вдоль ПЗС-линейки от коэффициента усиления; $c_{\text{отн}}^0(x)$ выбрана при $k = 1,588$

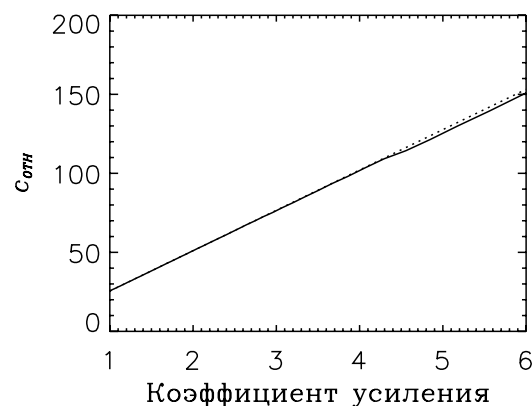


Рис. 7. Зависимость среднего относительного коэффициента чувствительности канала от коэффициента усиления: сплошная линия — измерения, пунктирная линия — пропорциональная зависимость

канала. В летных камерах МСУ-100 при изменении k форма распределения коэффициента чувствительности изменялась не более чем на 3%, а в летной камере МСУ-50 — не более чем на 6 %.

Сделав вывод о незначительной зависимости формы распределения коэффициента чувствительности от k , достаточно проверить зависимость от k среднего коэффициента чувствительности канала. Эти измерения проводились при постоянной яркости интегрирующей сферы. Средний коэффициент чувствительности каналов оказался с хорошей точностью пропорциональным коэффициенту усиления (рис. 7).

Расчет абсолютного коэффициента чувствительности

При известном распределении относительного коэффициента чувствительности переход к распределению абсолютного коэффициента чувствительности осуществляется по результатам абсолютной калибровки чувствительности группы выбранных элементов вблизи центра ПЗС-линеек (см. статью в настоящем сборнике, с. 549). Средний абсолютный ко-

эффициент чувствительности указанных элементов \bar{c}_0 приведен к минимальному времени экспонирования $\tau_0 = 2$ мс и коэффициенту усиления $k_0 = 1$. Распределение абсолютного коэффициента чувствительности для всех элементарных детекторов канала при указанных значениях τ_0 и k_0 находится по соотношению

$$c_0(x) = c_{\text{отн}}(x) \frac{\bar{c}_0}{\bar{c}_{\text{отн}}},$$

где $\bar{c}_{\text{отн}}$ — относительный коэффициент чувствительности, усредненный по тем же элементам, что и \bar{c}_0 .

3. Методика радиометрической коррекции видеоданных КМСС

Входной информацией для процедуры радиометрической коррекции являются приборный файл камеры МСУ50/100 и калибровочные файлы [1].

Приборный файл МСУ обрабатывается построчно. Из строк видеоданных КМСС выделяются:

- строки трех зональных изображений $DN(x, y)$;
- время экспонирования τ ;
- коэффициенты усиления k для каждого канала (переводятся в линейные единицы).

Преобразование цифрового сигнала пикселей изображения в абсолютную яркость проводится следующим образом:

$$B(x, y) = \frac{DN(x, y, k) - DC(x, y, k)}{c(x, k, \tau)},$$

где $B(x, y)$ — абсолютная зональная яркость в [Вт/(м²·мкм·ср)] пикселя; $c(x, k, \tau)$ — актуальный (т. е. соответствующий реальным значениям τ и k) коэффициент чувствительности элементов детектора; $DN(x, y, k)$ — актуальный темновой сигнал элементов детектора.

Актуальный коэффициент чувствительности равен

$$c(x, k, \tau) = c_0(x) \frac{k}{k_0} \frac{\tau}{\tau_0},$$

где $c_0(x)$ — калибровочный коэффициент чувствительности (при $k_0 = 1$ и $\tau_0 = 2$ мс).

Актуальный темновой сигнал световых элементов определяется из соотношения (5) по их темновому сигналу при коэффициенте усиления k_d и сигналам темновых элементов DC_{dark} .

Массивы абсолютных коэффициентов чувствительности $c_0(x)$ и темновых сигналов световых и темновых элементов $DC(x, k_d)$ и $DC_{dark}(u, k_d)$ вместе с соответствующими значениями τ_0 , k_0 и k_d входят в состав калибровочных файлов.

Проведенная радиометрическая калибровка камер КМСС позволяет решать задачу определения абсолютной зональной яркости снимаемых объектов по получаемым изображениям с точностью в пределах 10%.

Литература

1. Жуков Б.С., Зиман Я.Л., Полянский И.В., Жуков С.Б., Бекренев О.В., Пермитина Л.И. Предварительная обработка видеоданных комплекса многозональной спутниковой съемки с космического аппарата «Метеор-М». (Статья в настоящем сборнике, с. 530.)
2. Руководство пользователя видеоданными КМСС. КБДУ. 201231.014 РПВ.М.: АНО «Космос-НТ», 2006.

ВОСПОМИНАНИЯ О СОЗДАНИИ И РАБОТЕ В ИКИ САМОЛЕТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (ИЗ ПРЕДЫСТОРИИ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКОГО ОТДЕЛА)

Я.Л. Зиман

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Описана история создания лаборатории для моделирования исследований Земли из космоса на самолетах Ил-14 и Ан-30.

The history of creating a laboratory for simulating Earth research from space on-board the Il-14 and An-30 aircraft is presented.

Хочу представить эмоционально-развлекательное воспоминание из предыстории нашего оптико-физического отдела.

При образовании ИКИ в нем не были предусмотрены исследования Земли. Однако почти четыре десятилетия тому назад в Институте, кроме традиционных астрофизических, планетных и плазменных космических исследований, было открыто направление исследований Земли из космоса. Основным инициатором развертывания в институте этих исследований был зам. директора института Ю.К. Ходарев. Положительно к ним отнесся и директор института, академик Г.И. Петров.

Проведение исследований Земли было возложено на отдел, возглавляемый В.В. Андриановым, в который из нашего коллектива были переведены Генрих Аванесов, Юрий Чесноков, Борис Дунаев. Я же был назначен зав. сектором самолетного моделирования исследований Земли из космоса, который был сформирован в комплексном отделе, руководимом Ю.К. Ходаревым.

Прибориста В.В. Андрианова не вдохновили методические проблемы исследования Земли, а серьезные приборные разработки он не спешил разворачивать, мотивируя это отсутствием целевого финансирования. Меня же и всех моих друзей — Г. Аванесова, Ю. Чеснокова и Б. Дунаева — идея самолетного моделирования увлекла, и мы, засучив рукава, стали из подручных средств «клепать» самолетные приборы.