

УТОЧНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПРИВЯЗКИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ ФОТОСПЕКТРАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В. Г. ШУКАЙЛО¹, Л. В. КАТКОВСКИЙ²

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

²НИИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрен метод относительной пространственной привязки изображений и спектров, регистрируемых с борта Международной космической станции с помощью фотоспектральной системы, разработанной в научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ по заказу ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С. П. Королева и Института географии РАН в 2010 г. Представлен созданный метод минимизации неточностей в относительной пространственной привязке спектров и изображений, регистрируемых с помощью модулей спектрорадиометра и регистрации изображения, которые являются результатом случайных процессов. Метод основан на том, что средняя яркость пикселей изображения модуля регистрации изображения по всем пространственным пикселям в пределах щели модуля спектрорадиометра и его средняя яркость по длинам волн (спектральным каналам модуля спектрорадиометра) в пределах каждого из каналов R , G , B равны между собой (с учетом неоднородной угловой чувствительности модуля спектрорадиометра и спектральных чувствительностей модуля регистрации изображений в каналах цветности), поскольку относятся к одному и тому же участку подстилающей поверхности. Разработанный метод позволяет найти положение щели спектрометра модуля спектрорадиометра на изображении модуля регистрации изображения, более соответствующее сигналу модуля спектрорадиометра, которое и является истинным.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; спектральный анализ; изображение; предварительная обработка спектров и изображений; пространственная привязка спектров и изображений.

ADJUSTMENT OF SPATIAL REFERENCING AND PRE-PROCESSING OF SPECTRA AND IMAGES RECORDED BY PHOTOSPECTRAL SYSTEM FROM THE ISS

V. G. SHUKAILA^a, L. V. KATKOVSKY^b

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

^bA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Kurchatova street, 7, 220045, Minsk, Republic of Belarus

Образец цитирования:

Шукайло В. Г., Катковский Л. В. Уточнение пространственной привязки и предварительной обработки спектров и изображений, регистрируемых фотоспектральной системой с борта Международной космической станции // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 1. С. 41–48.

For citation:

Shukaila V. G., Katkovsky L. V. Adjustment of spatial referencing and pre-processing of spectra and images recorded by Photospectral system from the ISS. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 1. P. 41–48 (in Russ.).

Авторы:

Валентин Геннадьевич Шукайло — аспирант кафедры физической информатики и атомно-молекулярной физики физического факультета. Научный руководитель — Л. В. Катковский.

Леонид Владимирович Катковский — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией дистанционной фотометрии.

Authors:

Valiantsin Shukaila, postgraduate student at the department of physical informatics and atomic and molecular physics, school of physics.

valiantsinshukaila@gmail.com

Leonid Katkovsky, doctor habilitatus of physics and mathematics, docent; head of the laboratory of remote photometry. katkovskyl@gmail.com

This paper describes the method of joint positioning the projection of spectroradiometer module entrance slit on the image recorded by the image recording module of the photospectral system designed for the joint registration of spectra and images of the Earth's surface from the ISS developed in Scientific Research Institute of Applied Physical Problems by request of JSC RSC «Energia» and the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences in 2010. It also describes a new method for verifying the position of the projection of spectroradiometer module entrance slit on the image recorded by the image recording module which can have inaccuracies in the relative spatial referencing that are results of random processes. Method is based on the fact that the average brightness of the pixels of the image within the projection of spectroradiometer entrance slit and the average brightness of image recording module signal by wavelengths (spectral channels of spectroradiometer) within each of the channels *R*, *G*, *B* are equal (taking into account the non-uniform angular sensitivity of the spectroradiometer and spectral sensitivity of image recording module chrominance channels), because they are attributed to the same portion of the underlying surface. The developed method allows to find the position of the projection of MS entrance slit on MRI image that is more appropriate to signal of spectroradiometer, which is real.

Key words: remote sensing; spectral analysis; image; spectra and image preprocessing; spectra and image spatial referencing.

Фотоспектральная система (ФСС), предназначенная для совместной регистрации спектров и изображений земной поверхности с борта Международной космической станции (МКС), была разработана в научно-исследовательском учреждении «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ по заказу ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С. П. Королева и Института географии РАН в 2010 г. С июля этого же года она работает на борту МКС по программе космического эксперимента «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф», шифр «Ураган» [1–3].

Данная ФСС состоит из двух модулей: модуля регистрации изображения (МРИ) и модуля спектро радиометра (МС). Измеренные спектро радиометром спектры представляют собой абсолютные значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм с шагом по спектру менее 1 нм и со спектральным разрешением не хуже 3–5 нм. Данные МРИ представляют собой изображения в формате RAW в трех цветовых каналах *R*, *G*, *B* с разрядностью 16 бит [1–3].

Главная особенность системы в том, что пространственное разрешение регистрируемых изображений значительно отличается от пространственного разрешения регистрируемых спектров. При съемке с борта МКС один кадр цветного изображения охватывает площадку $\sim 35\,000 \times 25\,000$ м с пространственным разрешением не хуже 10 м (проекция пикселя на поверхность Земли), тогда как проекция входной щели спектро радиометра на поверхность Земли имеет размер, по принятым ранее оценкам, $\sim 50 \times 6000$ м [1–3]. Этим определяются особенности предложенной совместной обработки получаемых спектров и изображений, цель которой – увеличение информативности данных ФСС за счет спектральной декомпозиции измерений спектро радиометра и их последующей интерполяции на все цветное изображение [1–3].

Модуль спектро радиометра ориентирован в пространстве так, что его щель располагается вдоль длинной стороны кадра, которая, в свою очередь, ориентирована вдоль направления вектора скорости станции. Последовательность изображений получается в режиме трассовой съемки за счет движения МКС по орбите с перекрытием соседних кадров 10–30 %. Для каждого изображения спектро радиометр регистрирует три спектра с фиксированными временными интервалами между ними. Примерное взаимное положение кадров МРИ и спектро метрируемых участков МС при трассовой съемке в нади́р представлено на рис. 1. Смещение кадров по вертикали обусловлено как суточным вращением Земли и наклонением орбиты, так и возможными отклонениями ориентации длинной стороны кадра от вектора скорости станции [1–3].

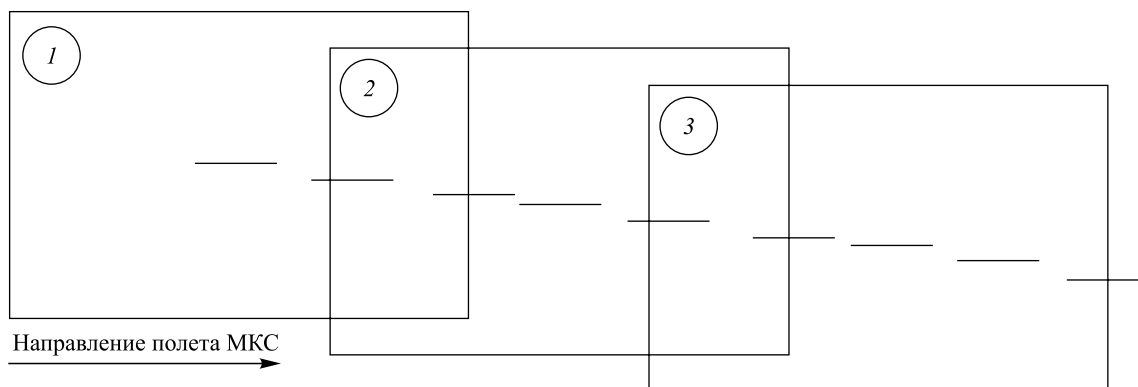


Рис. 1. Взаимное расположение трех последовательных изображений (прямоугольники 1, 2, 3) и областей спектро метрирования (отрезки – проекции щели на Землю) при съемке ФСС в нади́р с борта МКС

Взаимная ориентация жестко фиксированных относительно друг друга оптических осей МРИ и МС определялась во время проведения наземных лабораторных калибровок ФСС и корректировалась по результатам специального эксперимента «Калибровка по Луне» [4].

Далее, для пространственной привязки спектральных данных к изображениям (при известном взаимном положении оптических осей МС и МРИ) используются данные о геометрии съемки и координатно-временные параметры орбитального полета МКС [1–3].

Вычисление горизонтальных смещений областей спектрометрирования, обусловленных движением станции, в пикселях относительно центра зарегистрированного камерой изображения по временным характеристикам сеанса съемки и по данным о высоте и скорости полета МКС производится по следующей формуле:

$$\Delta x_w = \Delta t \cdot v_{\text{МКС}} \cdot w_{\text{пк}} \cdot f_{\text{об}} / (w_{\text{матр}} \cdot h_{\text{МКС}}),$$

где Δx_w – горизонтальное смещение в пикселях; Δt – задержка времени регистрации спектра относительно времени съемки соответствующего изображения; $v_{\text{МКС}}$ – скорость движения МКС по орбите; $w_{\text{пк}}$ – ширина изображения в пикселях; $f_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива камеры; $w_{\text{матр}}$ – ширина матрицы фотокамеры; $h_{\text{МКС}}$ – высота полета МКС [2, 5].

Определение вертикальных смещений, обусловленных суточным вращением Земли, выполняется с помощью построения трассовой мозаики изображений (см. рис. 1). В качестве первого приближения мозаика строится по известным координатам станции и углам положения оптической оси ФСС, соответствующим каждому кадру, и корректируется интерактивно с использованием идентифицированных опорных точек в перекрывающихся частях кадров. После этого области спектрометрирования смещаются по вертикали при сохранении полученных горизонтальных смещений так, чтобы они располагались на линии центров соседних кадров мозаики [2, 5].

Однако даже после такой пространственной привязки спектров к изображениям, учитывающей все возможные вклады в смещение щели при съемке, наблюдаются погрешности в положениях области спектрометрирования, обусловленные, например, погрешностями в измерении времен регистрации спектров и изображения, погрешностями в построении трассовой мозаики, а также погрешностями в данных о скорости и высоте полета станции в момент регистрации изображения. Также вследствие того что ФСС крепится к иллюминатору внутри МКС и отсоединяется от него между сеансами съемок, могут появляться погрешности, обусловленные нарушением при этих операциях взаимной ориентации полей зрения модулей МС и МРИ.

Поскольку пространственное разрешение модуля МС значительно хуже разрешения модуля МРИ, при обработке данных ФСС очень важную роль играет точность относительной пространственной привязки проекции входной щели спектрометра на изображение поверхности Земли, зарегистрированной модулем МРИ. От точности этой привязки зависит как визуально-интерактивный анализ изображений и спектров, так и точность последующей процедуры совместной обработки спектров и изображений.

Для минимизации неточностей в относительной пространственной привязке спектров и изображений, регистрируемых с помощью модулей МС и МРИ, которые являются результатом перечисленных погрешностей, был разработан метод уточнения положения проекции щели спектрометра МС на изображение модуля МРИ. Для реализации метода необходимо путем изменения положения и размеров области спектрометрирования (проекции щели) добиться максимальной корреляции (совпадения) измеренных по площади щели значений МС и МРИ, приведенных к общим единицам. Для приведения к общим единицам необходимо рассчитать, по данным измерений, неизвестные абсолютные спектральные чувствительности $S^{R,G,B} \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)$ каналов R, G, B МРИ, служащие для пересчета относительных цифровых отсчетов изображений в абсолютные единицы СПЭЯ и обратно.

Очевидно, что средняя яркость пикселей изображения МРИ по всем пространственным пикселям в пределах щели МС и средняя яркость МС по длинам волн (спектральным каналам спектрометра МС) в пределах каждого из каналов R, G, B равны между собой, поскольку относятся к одному и тому же участку подстилающей поверхности. С учетом неоднородной угловой чувствительности МС и спектральных чувствительностей МРИ в каналах цветности получаем следующее равенство:

$$\frac{1}{\tau_{\text{МРИ}}^{\text{эксп}} \cdot N} \sum_{l=i,j}^N B_{\text{МРИ}}^{R,G,B}(l) \cdot f_i = S^{R,G,B} \cdot ISO_{\text{МРИ}} \cdot \sum_{\lambda \in R,G,B} (B_{\text{МС}}(\lambda) \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)), \quad (1)$$

где $B_{\text{МРИ}}^{R,G,B}(l)$ – измеренные МРИ значения яркости изображения для пикселя (l) ; $\tau_{\text{МРИ}}^{\text{эксп}}$ – время экспозиции МРИ при съемке изображения; $B_{\text{МС}}(\lambda)$ – измеренные МС значения СПЭЯ для длины волны λ ;

f_i – нормированный весовой коэффициент i -го пикселя в спектрометрируемом участке, учитывающий функцию угловой чувствительности МС в зависимости от положения этого пикселя относительно центра участка (вдоль щели по координате i , поперек щели по координате j чувствительность равномерна); $S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)$ – известные нормированные относительные спектральные чувствительности МРИ в каналах (R, G, B), измеренные при лабораторных калибровках; N – количество пикселей изображения в пределах щели спектрометра; $ISO_{\text{МРИ}}$ – множитель, учитывающий возможную различную предпоставку чувствительности камеры МРИ при съемках.

Равенство (1) позволяет найти нормирующие константы (интегральные чувствительности каналов) S^R, S^G, S^B , согласующие измерения двух подсистем, МРИ и МС.

Поскольку на данном этапе положение щели является недостаточно точным, для решения уравнения (1) необходимо использовать измеренные данные по очень однородным подстилающим поверхностям (например, океану, однородной облачности и т. п.) так, чтобы ошибка в положении щели практически не сказывалась на вычисленной левой части (1). Необходимо также предварительно устранить искажения виньетирования при помощи измерений, проведенных в лабораторных условиях с применением пространственно-однородного поля излучения фотометрической сферы метрологического комплекса «Камелия-М» [6].

При использовании указанных выше съемок фотометрической сферы модулем МРИ имеется возможность сравнения значений чувствительностей $S^{R,G,B}$, полученных двумя способами: по натурным съемкам на основании (1) и по лабораторным. Отличие измерений состоит в том, что в лабораторных измерениях нет необходимости использовать измерения спектрометра, поскольку спектр излучения фотометрической сферы известен с высокой точностью. В этом случае в правую часть уравнения (1) надо подставлять спектр рабочего диффузного эталона, каковым является фотометрическая сфера (при этом будет отсутствовать угловая чувствительность МС и связанная с этим погрешность), а суммирование в левой части следует проводить по всем пикселям изображения. С учетом сказанного выше уравнение (1) для случая лабораторной съемки МРИ принимает вид

$$\frac{1}{\tau_{\text{МРИ}}^{\text{эксп}} \cdot M} \sum_{l=i}^M B_{\text{МРИ}}^{R,G,B}(l) = S^{R,G,B} \cdot ISO_{\text{МРИ}} \cdot \sum_{\lambda \in R,G,B} (B_{\text{МС}}(\lambda) \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)),$$

где $B_{\text{МРИ}}^{R,G,B}(l)$ – измеренные МРИ значения яркости изображения для пикселя (l); $\tau_{\text{МРИ}}^{\text{эксп}}$ – время экспозиции МРИ при съемке изображения задней стенки фотометрической сферы; $B_{\text{МС}}(\lambda)$ – значения СПЭЯ фотометрической сферы для длины волны λ ; M – количество пикселей во всем изображении.

После расчета S^R, S^G, S^B на первом этапе выполнялось уточнение положения щели относительно полученной в результате описанной выше процедуры привязки на основе минимизации величины среднеквадратичного отклонения:

$$\delta = \left\{ \frac{1}{\tau_{\text{МРИ}}^{\text{эксп}} \cdot N} \sum_{l=i,j}^N B_{\text{МРИ}}^{R,G,B}(l) \cdot f_i - S^{R,G,B} \cdot ISO_{\text{МРИ}} \cdot \sum_{\lambda \in R,G,B} (B_{\text{МС}}(\lambda) \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)) \right\}^2. \quad (2)$$

Итеративно производя сдвиги положения щели МС на изображении и рассчитывая среднеквадратичное отклонение, найдем положение щели, наиболее точно соответствующее измерениям МС-спектра. На рис. 2 приведено исходное положение щели МС на изображении, снятом МРИ, и новое положение щели после процедуры уточненной пространственной привязки. Можно видеть, что уточнение положения щели было произведено в основном за счет сдвига вдоль длинной стороны кадра. Это связано с тем, что поперек щели укладывается всего несколько пикселей изображения, поэтому при сдвиге вдоль короткой стороны кадра происходит значительная смена пикселей, попадающих в область спектрометрирования, тогда как при сдвиге вдоль длинной стороны кадра доля заменяемых пикселей незначительна.

На рис. 3 представлен график зависимости значений среднеквадратичного отклонения от сдвига щели МС (для первого из трех спектров кадра) по осям вдоль длинной стороны кадра – ΔX и короткой стороны кадра – ΔY . Из графика хорошо видно, что начальное значение координаты положения щели вдоль короткой стороны кадра (поперек щели) находится в минимуме значений отклонения (2), т. е. в уточнении практически не нуждается.

Кроме того, из рис. 3 видно, что при сдвигах вдоль длинной стороны кадра наблюдаются значительно меньшие изменения значений δ , однако они имеют четкий локальный минимум при незначительном сдвиге вдоль этой оси.

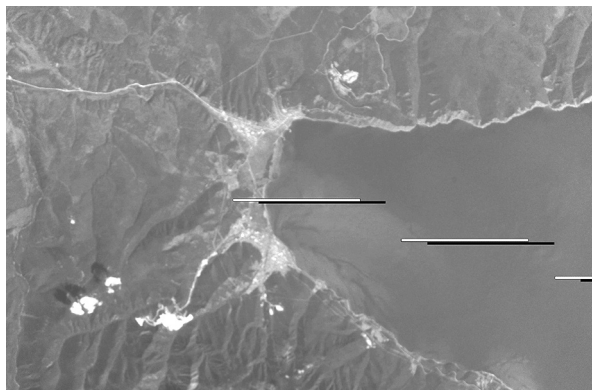


Рис. 2. Изначально рассчитанное положение проекций щели МС на изображении МРИ (белые линии) и новое положение щели, найденное по методу уточнения положения щели МС на изображении МРИ (черные линии)

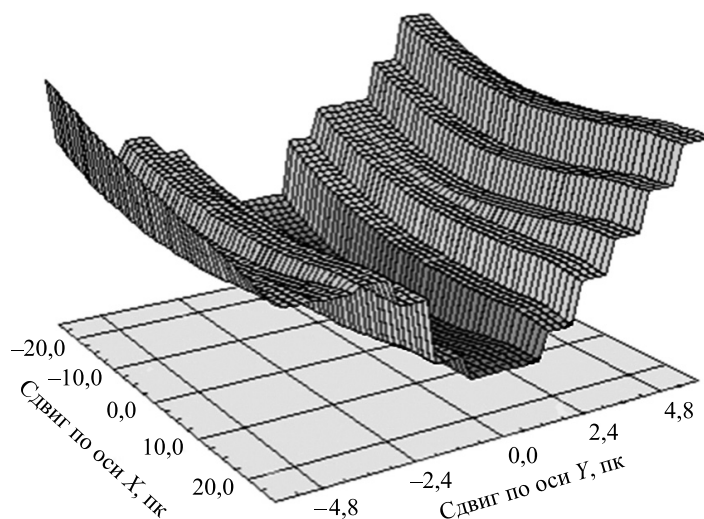


Рис. 3. График зависимости среднеквадратичного отклонения δ от сдвигов по осям вдоль длинной стороны кадра (вдоль щели спектрометра) и вдоль короткой стороны кадра (поперек щели спектрометра)

На втором этапе производилось уточнение реальных размеров щели спектрометра путем минимизации того же среднеквадратичного отклонения (2). Для этого применялся статистический подход и итеративно производились уточнения положений щели для большого количества изображений с использованием различных параметров размеров щели. Если считать, что неточности в положении щели обусловлены случайными процессами, то форма распределений значений сдвигов ΔX и ΔY должна описываться по закону Гаусса. На рис. 4 изображены распределения сдвигов ΔX и ΔY при заданных размерах щели 745×5 пк (см. рис. 4, а) и 895×8 пк (см. рис. 4, б). Форма распределений на рис. 4, а, лучше описывает распределение сдвигов при случайном характере ошибок, чем распределения на рис. 4, б, из чего можно сделать вывод о том, что относительные размеры щели спектрометра соответствуют размерам, определенным во время предполетных калибровок приборов ФСС, описанных в [2].

Специфика прибора ФСС требует высокой точности относительной пространственной привязки проекции щели МС (спектрометрируемой области) на изображение МРИ. От нее напрямую зависит точность результатов тематической обработки изображения, атмосферной коррекции, а также представленного в [5, 7] метода спектральной декомпозиции, позволяющего увеличить информативность изображения МРИ за счет измерения спектров МС. Максимально точное определение всех параметров съемки ФСС имеет важное значение для достижения наиболее достоверных результатов обработки данных ФСС.

Таким образом, разработанный метод позволяет выполнять коррекцию относительной пространственной привязки проекции щели спектрометра на изображение на этапе предварительной обработки данных ФСС. При помощи этого метода также были подтверждены используемые размеры щели, определенные во время предполетных калибровок. Эти процедуры важны для решения на последующих этапах задач атмосферной коррекции, проведения спектральной декомпозиции данных ФСС, что в итоге повышает точность последующей тематической обработки и интерпретации данных космической съемки по программе космического эксперимента «Ураган».

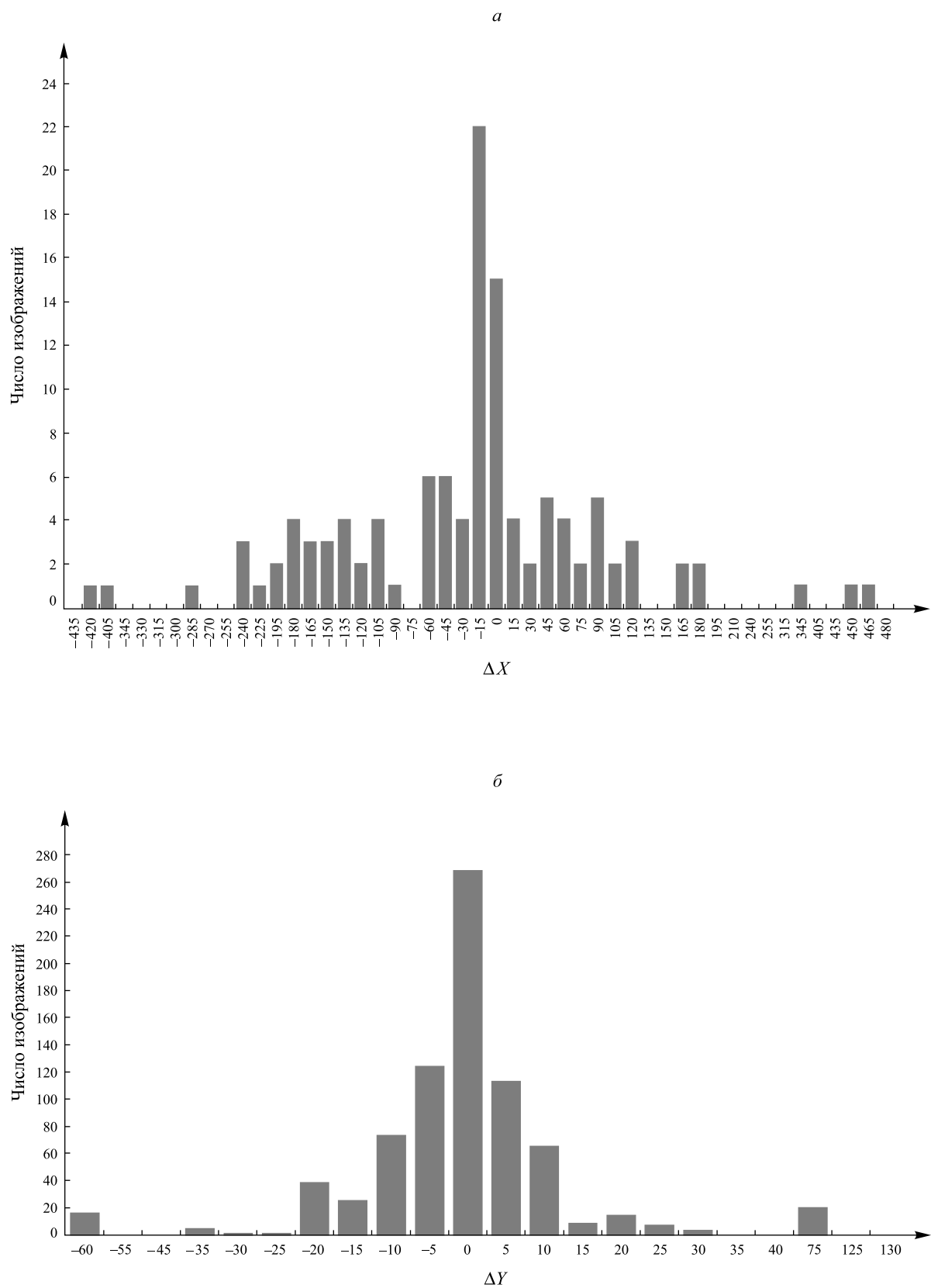
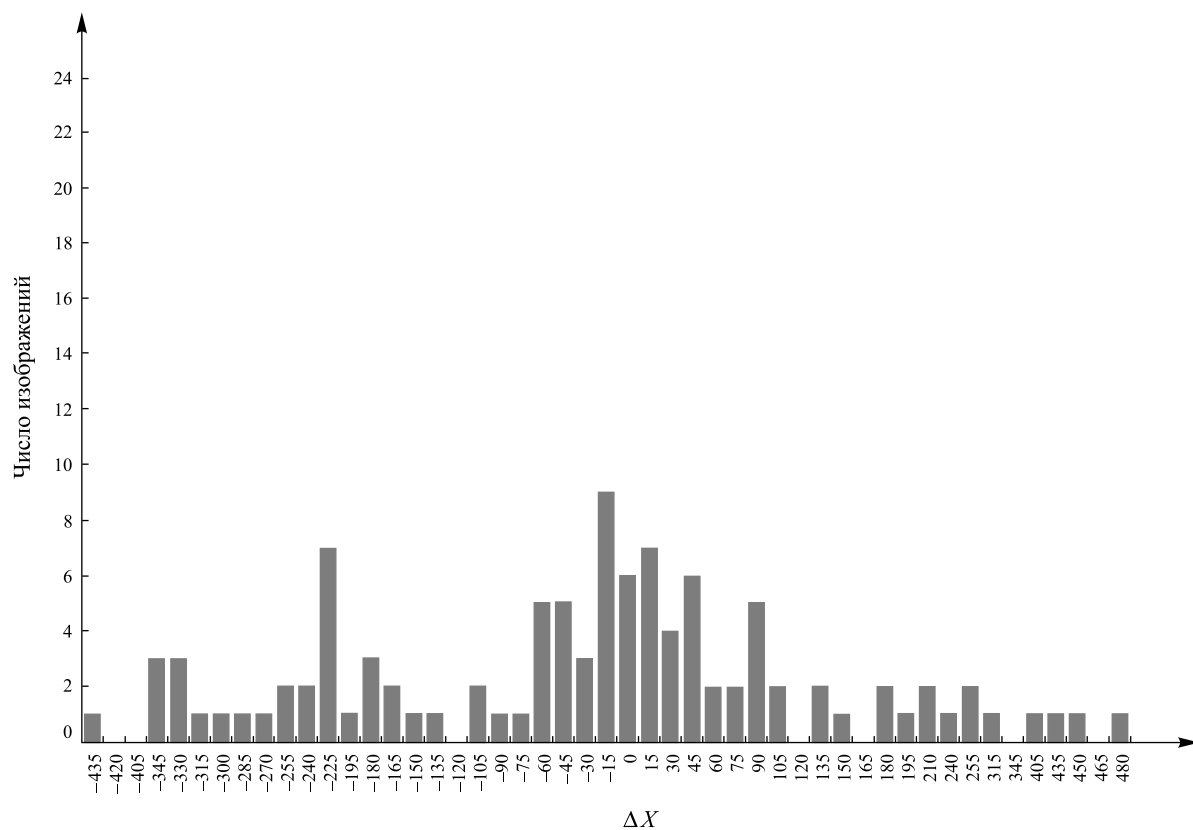


Рис. 4. Гистограмма распределения значений:
a, б – ΔX и ΔY при выбранной относительной длине щели 745 пк и ширине 4 пк
 (окончание см. на с. 47)

б



в

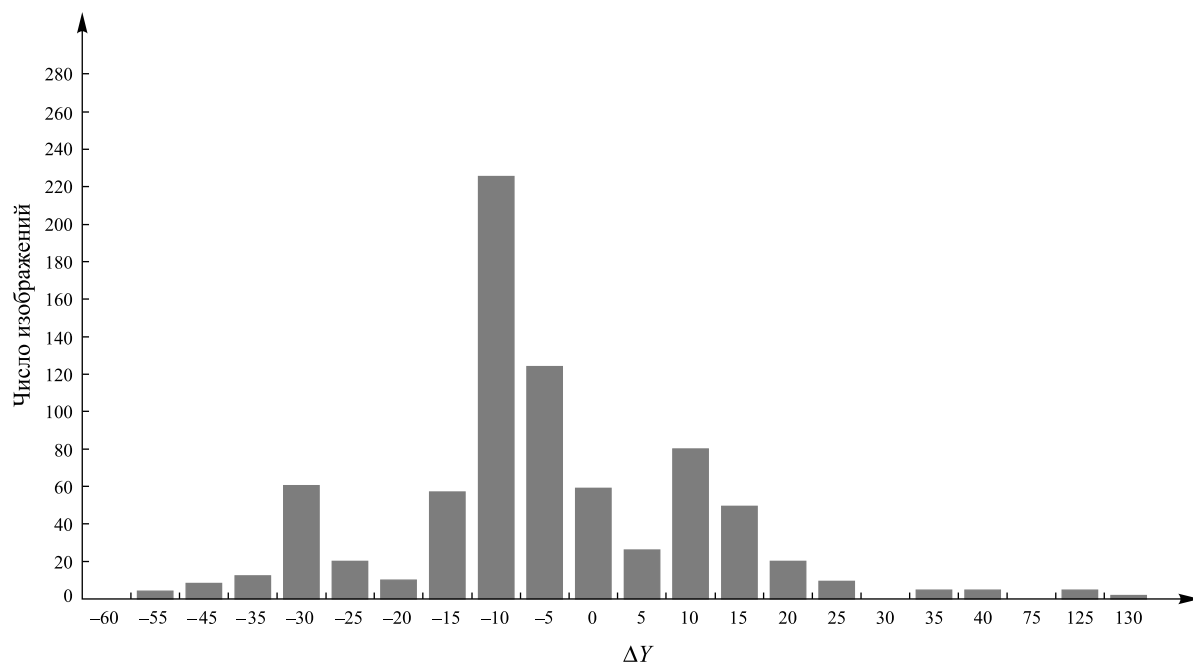


Рис. 4. Окончание (начало см. на с. 46):
 в, в – ΔX и ΔY при выбранной относительной длине щели 895 пк и ширине 8 пк

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Домарацкий А. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Роговец А. В., Хвалей С. В. Фотоспектральная система для космического эксперимента «Ураган» // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16, № 2. С. 41–48 [Belyaev B. I., Belyaev U. V., Domaratsky A. V., Katkovsky L. V., Krot U. A., Rogovets A. V., Khvalei S. V. Photospectral system for space experiment «Hurricane». *Kosmichna nauka i technol.* 2010. Vol. 16, No. 2. P. 41–48 (in Russ.)].
2. Беляев Б. И., Катковский Л. В., Роговец А. В. Восстановление спектров земной поверхности с использованием цветных изображений высокого разрешения // Журн. прикл. спектроскопии. 2013. Т. 80, № 1 [Belyaev B. I., Katkovsky L. V., Rogovets A. V. Restoring of earth surface spectra with high-resolution colored images. *Zhurnal prikl. spektrosk. = J. Appl. Spectrosc.* 2013. Vol. 80, No. 1 (in Russ.)].
3. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Денисов Л. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Сармин Э. Э. Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 1–13 [Belyaev B. I., Belyaev M. U., Denisov L. V., Katkovski L. V., Krot U. A., Sarmin E. E. Results of testing of Photospectral system on ISS. *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 6. P. 1–13 (in Russ.)].
4. Гусев В. Ф., Иванишин А. А., Крот Ю. А., Роговец А. В. Эксперимент «Калибровка по Луне» для юстировки полей зрения фотоспектральной системы // Докл. конф. «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Евпатория, 3–7 сент. 2012 г.). Евпатория ; Киев, 2012. С. 40–42 [Gusev V. F., Ivanishin A. A., Krot U. A., Rogovets A. V. «Calibration by the Moon» experiment for adjustment fields of view of photospectral system. *Dokl. konf. «Aerokosmichni sposterejennia v interesah stalogo rozvitku ta biaspeki»* (Evpatoria, 3–7 sept. 2012). Evpatoria ; Kiev, 2012. P. 40–42 (in Russ.)].
5. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Денисов Л. В., Катковский Л. В., Сармин Э. Э. Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 1–12 [Belyaev B. I., Belyaev M. U., Denisov L. V., Katkovski L. V., Sarmin E. E. Processing of spectra and images of Photospectral system in space experiments «Hurricane» on the ISS. *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2014. No. 6. P. 1–12 (in Russ.)].
6. Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Залетный В. М., Катковский Л. В., Нестерович Э. И. Метрологический комплекс для аттестации спектрометрической и видеоспектральной аппаратуры «Камелия-М» // Каталог приборов, комплексов и установок, разработанных по ГНТП «Приборы для научных исследований» / под ред. В. С. Буракова. Минск, 2006. С. 13–16.
7. Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Хвалей С. В., Хомицевич А. Д. Повышение информативности спектральных изображений растительных объектов // Журн. прикл. спектроскопии. 2007. Т. 74, № 5. С. 670–676 [Belyaev U. V., Katkovsky L. V., Khvalei S. V., Khomichevich A. D. More informative multispectral images of plant facilities. *Zhurnal prikl. spektrosk. = J. Appl. Spectrosc.* 2007. Vol. 74, No. 5. P. 670–676 (in Russ.)].

Статья поступила в редколлегию 04.06.2015.
Received by editorial board 04.06.2015.