

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 528.08

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ОПТИКОЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ГЕОТОН,
УСТАНОВЛЕННОГО НА КА «РЕСУРС-П №1»**

Ефипова Ю. В., Бахмет Т. И., Баканас Е. С.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE ESTIMATION OF THE QUALITY
OF DATA OBTAINED DURING THE OPERATION OF THE OPTOELECTRONIC
COMPLEX GEOTON INSTALLED ON THE SPACECRAFT “RESURS-P NO. 1”

Efipova Yu. V., Bakhmet T. I., Bakanas E. S.

Research center for Earth operative monitoring, Moscow, 127490, Russia
e-mail: lawazza@list.ru

Abstract. This article is devoted to a statistical study of the results of the data quality assessment obtained from the “RESURS-P No. 1” spacecraft, which is conducted to monitor the quality of the target equipment. The data quality is evaluated in accordance with the methodology approved by TsSKB-Progress in 2012, through special software.

The main purpose of the article is to demonstrate the randomness of the difference in the results of image formation in video sensors for the line, cadre and diagonal directions, which indicates the high quality of the data obtained and the possibility of using them in scientific, transport, environmental, search and rescue, land management, agricultural and other purposes.

Keywords: ERS, Resurs-P, Geoton, Linear resolution on the terrain, sensors scanning principle the image of the surface of the Earth, highly-detailed imagery of the Earth’s surface, data quality assessment

Введение

В июне 2013 года на орбиту нашей планеты был выведен Российский космический спутник — аппарат для дистанционного зондирования Земли — «РЕСУРС-П №1», средняя высота около-круговой солнечно-синхронной орбиты которого — 475 км.

Один из комплексов установленного на нем целевого оборудования — это оптико-электронная аппаратура (ОЭА) ГЕОТОН. ОЭА ГЕОТОН производит высокодетальную съемку поверхности Земли с линейным разрешением на местности (ЛРМ) не более 1 м (в панхроматическом канале) и шириной полосы захвата до 38 км.

Статья посвящена статистическому исследованию результатов оценки качества данных, полученных с космического аппарата «РЕСУРС-П №1». Оценка качества данных

необходима для контроля работы целевой аппаратуры.

На рис. 1 приведен фрагмент изображения, полученного оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) ГЕОТОН, установленной на космическом аппарате «РЕСУРС-П №1».

ОЭА ГЕОТОН с системой приема и преобразования информации (СППИ) «Сангур-1У» имеет следующие характеристики [1]: фокусное расстояние 4000 мм; разрешение на местности (с высоты 475 км) в панхроматическом диапазоне 1 м, в узких спектральных диапазонах — 3÷4 м. Рабочие спектральные диапазоны: панхроматический диапазон (ПХ) — 0,58÷0,80 мкм; узкие спектральные диапазоны (МС — мультиспектр) — 0,45÷0,52 мкм; 0,52÷0,60 мкм; 0,61÷0,68 мкм; 0,67÷0,70 мкм; 0,70÷0,73 мкм; 0,72÷0,80 мкм; 0,80÷0,90 мкм. Размер светочувствительного элемента ПХ/МС — 6×6 / 18×18, мкм.

Ефипова Юлия Валерьевна, инженер Научного центра оперативного мониторинга Земли (АО «РКС»); e-mail: lawazza@list.ru.

Бахмет Татьяна Ивановна, начальник сектора Научного центра оперативного мониторинга Земли (АО «РКС»); e-mail: baxmet@mail.ru.

Баканас Елена Сергеевна, инженер 1 категории Научного центра оперативного мониторинга Земли (АО «РКС»), научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: oterma@yandex.ru.



Рис. 1. Фрагмент изображения на этапе первичной обработки (Италия, Пиза)

1. Статистический анализ результатов измерений линейного разрешения на местности

Для статистического анализа были использованы результаты измерений линейного разрешения на местности (ЛРМ), полученные с апреля 2016 года по сентябрь 2017 года (по данным 175 маршрутов). Основные характеристики этих маршрутов: средняя высота полета 475 км; высота Солнца $20^\circ \div 70^\circ$. В данной работе рассмотрим вычисления ЛРМ только в панхроматическом диапазоне. Единица измерения результатов анализа — метр.

Статистические данные получены при использовании пакета STATISTICA 10 [2]. В табл. 1 приведены результаты расчетов статистических параметров, описывающих измерения линейного разрешения на местности.

На рис. 2–4 видно, что значения ЛРМ для панхроматического канала распределены по близкому к нормальному закону и не превышают 1 м более чем в 95 % случаев. Это подтверждается расчетными тестами: Колмогорова–Смирнова (p -уровень $>0,20$) и Шапиро–Уилка (p -уровень $>0,05$).

Одновыборочный критерий проверки нормальности Колмогорова–Смирнова [3] основан на оценке максимума разности между кумулятивным распределением выборки и предполагаемым кумулятивным распределе-

нием. Критерий Шапиро–Уилка [4] основан на оптимальной линейной несмещенной оценке дисперсии к ее обычной оценке методом максимального правдоподобия.

Подчиняясь нормальному закону, значение ЛРМ не отклоняется от математического ожидания по абсолютной величине больше, чем на $\pm 3\sigma$.

Небольшой размах значений ЛРМ относительно проекции пикселя (0,70 м) подтверждает стабильное качество данных.

2. Сравнение результатов измерений ЛРМ для анализа формирования данных в видеодатчике сканерного принципа действия по четырем направлениям развертки, относительно строк ПЗС-матриц

Для анализа был взят произвольный маршрут в соответствии с условиями, позволяющими произвести измерение линейного разрешения на местности (ЛРМ) при использовании специального программного обеспечения (СПО), разработанного для оценки качества данных. По методике оценки качества [5] определяют следующие характеристики и показатели качества данных:

- шумовая характеристика;
- сквозная светосигнальная характеристика;
- функция рассеяния края (ФРК);

Таблица 1. Основные описательные статистики значения ЛРМ

N	M	Медиана	Min	Max	Размах	D	σ	SD
175	0,878629	0,89	0,71	1,08	0,37	0,005713	0,075585	0,005714

Пояснение: N — количество маршрутов, M — математическое ожидание, σ — среднее квадратическое отклонение (СКО), D — дисперсия, SD — стандартная ошибка среднего; Min и Max — минимум максимум значений ЛРМ.

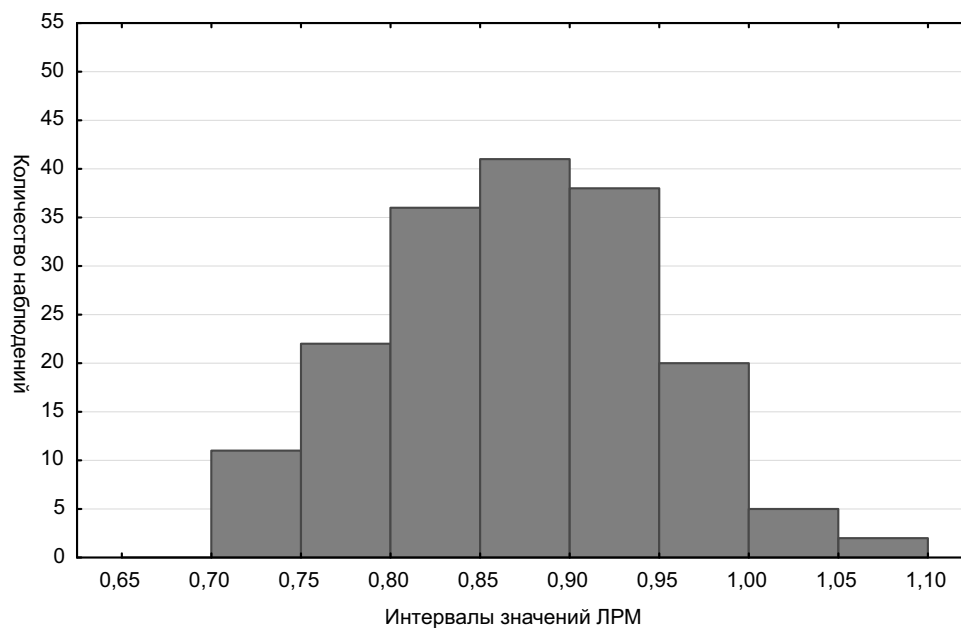


Рис. 2. Гистограмма значений ЛРМ панхроматического канала Колмогорова-Смирнова $d = 0,07408$, $p > 0,20$ и Шапиро-Уилка $W = 0,99112$, $p = 0,35260$

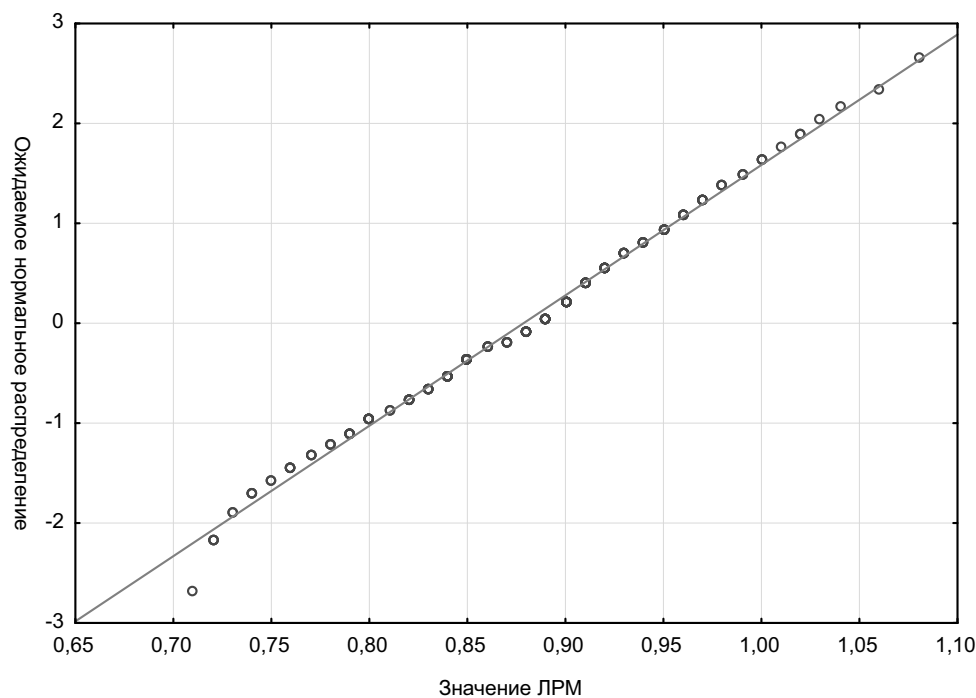


Рис. 3. Нормально-вероятностный график: ЛРМ панхроматического канала

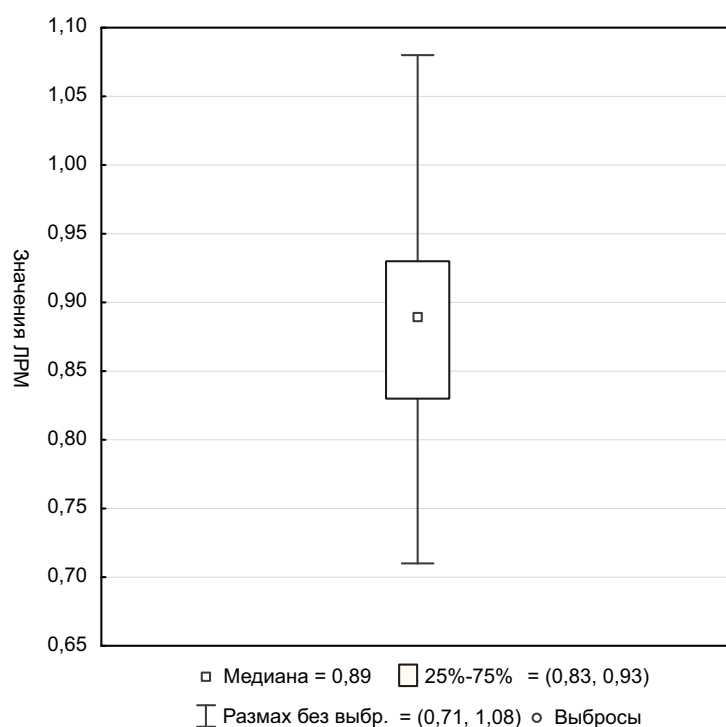


Рис. 4. Диаграмма размаха для значений ЛРМ панхроматического канала

- функция рассеяния линии (ФРЛ);
- функция передачи модуляции (ФПМ);
- разрешающая способность (РС);
- линейное разрешение на местности (ЛРМ).

Шумовые характеристики изображения используется при определении комплексного показателя качества изображения — разрешающей способности, обуславливает динамический диапазон изображения, совместно со сквозной светосигнальной характеристикой определяет пороговый перепад альbedo подстилающей поверхности и отношение сигнал — шум.

Определение светосигнальной характеристики представляет собой выявление зависимости цифрового сигнала, полученного системой оптико-электронного наблюдения, от величины альbedo снимаемого ландшафта и представляется функцией в координатах ось абсцисс — значение альbedo, ось ординат — код цифрового сигнала.

Подход определения ФПМ основан на анализе степени размытости контрастных границ объектов изображений (резких краев), для которых заранее известно, что линейные размеры яркостного перепада на поверхности Земли многократно меньше, чем оцениваемое разрешение.

Оценка разрешающей способности (РС) в фокальной плоскости выполняется на основе определения уровня шума, светосигнальной характеристики и функции передачи модуляции изображения.

Определение линейного разрешения на местности основано на пересчете РС с учетом масштаба изображения поверхности Земли по направлениям: 0° , 45° , 90° , 135° .

В процессе определения ЛРМ оператор СПО выполняет следующие действия:

- загружает служебную информацию (СЛИ) маршрута в память СПО;
- выбирает самые яркие и самые темные точки сюжета изображения для определения сквозной светосигнальной характеристики;
- выбирает область постоянной яркости с наилучшим значением шумовой характеристики;
- формирует набор фрагментов резких (контрастных) краев с границами, ориентированными вертикально, горизонтально и диагонально (под углами 0° , 45° , 90° , 135°) относительно строк ПЗС-матрицы. На рис. 5 приведен фрагмент изображения, содержащего резкий край.

В процессе определения ЛРМ действия оператора-дешифровщика направлены на по-



Рис. 5. Пример фрагмента изображения, содержащего резкий край

иск наилучших тест-объектов по форме функций рассеяния края и линии.

Определение ФРК, ФРЛ, ФПМ программа производит автоматически на основании отобранных фрагментов.

Расчет РС и ЛРМ программа производит автоматически на основании загруженных и определенных ранее данных.

3. Проверка гипотезы

Примем следующее утверждение в качестве гипотезы.

Гипотеза (H_0). Различия в значениях ЛРМ, определенных отдельно по разным (по направлению) наборам фрагментов резких краев, несущественны и носит случайный характер.

Для обоснования гипотезы был выполнен 31 расчет ЛРМ одного маршрута, в определении каждого из которых задействовано по одному фрагменту резкого края. Шумовые и светосигнальные характеристики постоянны. Фрагменты, содержащие резкий край, разные для всех измерений.

Для подтверждения случайного характера разницы использован непараметрический критерий Манна–Уитни [6]. Это статистический критерий, используемый для оценки различий между двумя независимыми выборками по уровню какого-либо признака. Выбор данного критерия обоснован следующими его особенностями. Во-первых, критерий позволяет выявлять различия между малыми выборками (количество подходящих резких краев по одному из 4-х направлений трудно предугадать). Во-вторых, метод определяет, достаточно ли мала зона перекрещивающих-

ся значений между двумя рядами. В случае если одно из направлений будет иметь значения ЛРМ лучше или хуже по сравнению с другим направлением, это будет выявлено на этапе теста, так как перекрещивающихся значений не будет. Наконец, поскольку критерий Манна–Уитни используется для оценки двух независимых групп, было произведено сравнение значений всех возможных пар комбинаций измерений между собой. В табл. 2 приведены результаты непараметрического теста Манна–Уитни. Интересующее нас значение находится в графе « p -уровень». Гипотеза (H_0) будет отвергнута для тех значений, для которых $p < 0,05$. Все расчеты выполнены в программе STATISTICA 10.

В табл. 2 приняты следующие обозначения: β — ориентация резкого края относительно строки; $N1$ — количество измерений в группе 1; $N2$ — количество измерений в группе 2; Σ_{N1} — сумма рангов для группы 1; Σ_{N2} — сумма рангов для группы 2; U — статистика Манна–Уитни для малых выборок; $p_{\text{уров.}}$ — вероятность принятия гипотезы H_0 ; $p_{\text{уров. корр}}$ — скорректированная вероятность принятия гипотезы H_0 ; Z — нормальная аппроксимация статистики Манна–Уитни для больших выборок; $Z_{\text{скорр.}}$ — скорректированная нормальная аппроксимация статистики Манна–Уитни.

Уровень статистической значимости (p -уров.) превышает 5 %, что дает возможность принять гипотезу (H_0) о случайном характере различий значений в выборках. Кроме того, на диаграмме размаха (рис. 6) видно, что отличия между медианными значениями групп измерений по разным направлениям состав-

Таблица 2. U критерий Манна–Уитни по переменной ЛРМ

β	Σ_{N1}	Σ_{N2}	U	Z	$p_{уров.}$	$Z_{с CORR.}$	$p_{уров. CORR.}$	$N1$	$N2$
0–45	76	44	16	1,33	0,18	1,35	0,18	8	7
0–90	87	144	51	0,04	0,97	–0,04	0,97	8	13
0–135	47	19	11	0,10	0,92	–0,10	0,92	8	3
45–90	51	159	23	1,74	0,08	–1,77	0,08	7	13
45–135	34	21	6	0,91	0,36	–0,97	0,33	7	3
90–135	110,5	25,5	19,5	0,00	1,00	0,00	1,00	13	3

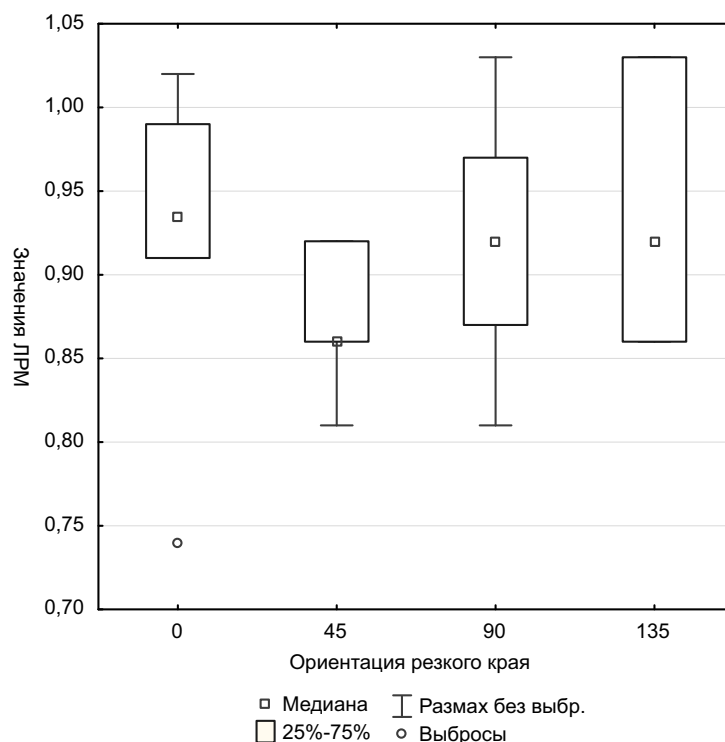


Рис. 6. Диаграмма размаха для значений ЛРМ

ляют менее 0,10 м, что существенно меньше проекции пикселя. Вышесказанное допускает возможность производить вычисление ЛРМ не по полному набору групп измерений по четырем направлениям (под углами 0°, 45°, 90°, 135°), а только по имеющимся в наличии на данном маршруте (одно-два направления) без потери точности получаемых значений.

Заключение

Проведенный статистический анализ показывает, что качество получаемых данных дает возможность использовать их в разных целях: землеустроительных, поисково-спасательных, сельскохозяйственных, природоохранных, транспортных и других задачах дистанционного зондирования Земли.

Литература

1. Научный центр оперативного мониторинга Земли. Космические аппараты типа «Ресурс-П». Электронный ресурс: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites/resurs_p (дата обращения 15.09.2017)
2. Statsoft. Электронный ресурс: <http://statsoft.ru/products/> (дата обращения 01.09.2017)
3. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии // Издательство стандартов. 2002. Электронный ресурс: <http://aquagroup.ru/normdocs/142#i526095> (дата обращения 10.09.2017)
4. Shapiro S.S., Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples)

- // Biometrika. 1965. Vol. 52, No. 3/4, pp. 591–611. doi: 10.1093/biomet/52.3-4.591. Электронный ресурс: <https://ru.scribd.com/document/78018601/Shapiro-An-Analysis-of-Variance-Test-for-Normality-Complete-Samples-1965> (дата обращения 10.09.2017)
5. ЦСКБ-Прогресс. Методика автоматизированного определения параметров качества изображения изделия «РЕСУРС-II». Самара: ЦСКБ-Прогресс, 2012. 43 с.
 6. *Mann H.B., Whitney D.R.* On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Ann. Math. Statist.* 1947. Vol. 18. No. 1, pp. 50–60. doi: 10.1214/aoms/1177730491. Электронный ресурс: <https://projecteuclid.org/euclid.aoms/1177730491> (дата обращения 12.09.2017)

References

1. Scientific center for operational monitoring of the Earth. Spacecraft of the “Resource-P” type. Available at: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites/resurs_p (accessed date 15.09.2017) (In Russian)
2. Statsoft. Available at: <http://statsoft.ru/products/> (accessed date 01.09.2017) (In Russian)
3. Recommendations for standardization. Applied statistics. Rules for verifying the agreement between the experimental distribution and the theoretical distribution. Part II. Nonparametric criteria. Izdatel'stvo standartov (2002). Available at: <http://aquagroup.ru/normdocs/142#i526095> (accessed date 10.09.2017) (In Russian)
4. Shapiro, S.S., Wilk, M.B.: An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 1965, vol. 52, no. 3/4, pp. 591–611. DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591. Available at: <https://ru.scribd.com/document/78018601/Shapiro-An-Analysis-of-Variance-Test-for-Normality-Complete-Samples-1965> (accessed date 10.09.2017)
5. TsSKB-Progress. Technique of automated determination of image quality parameters of the product “RESURS-P”. TsSKB-Progress, Samara (2012). (In Russian)
6. Mann, H.B., Whitney, D.R.: On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist.*, 1947, vol. 18, no. 1, pp. 50–60. DOI: 10.1214/aoms/1177730491. Available at: <https://projecteuclid.org/euclid.aoms/1177730491> (accessed date 12.09.2017)