



Относительная калибровка данных видимых спектральных каналов радиометра MERSI-II/FY-3D

А.И. Алексанин^{1,2}, Г.С. Стрелов²

*¹Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
Россия*

*²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
E-mail:aleks@iacp.dvo.ru*





Постановка задачи

Радиометры MERSI китайских спутников серии FY-3 - аналоги радиометров, установленных на спутниках TERRA, AQUA, JPSS, Sentinel-3. Данные передаются в режиме прямой передачи. Данные фактически не используются.

В последние годы Китайская метеорологическая администрация (КМА) распространяет пакет программ для первичной обработки данных радиометров MERSI.

Программное обеспечение делает распаковку данных и 2 типа обработки (уровень 0 и уровень 1). Дается описание только формата уровня обработки 1.

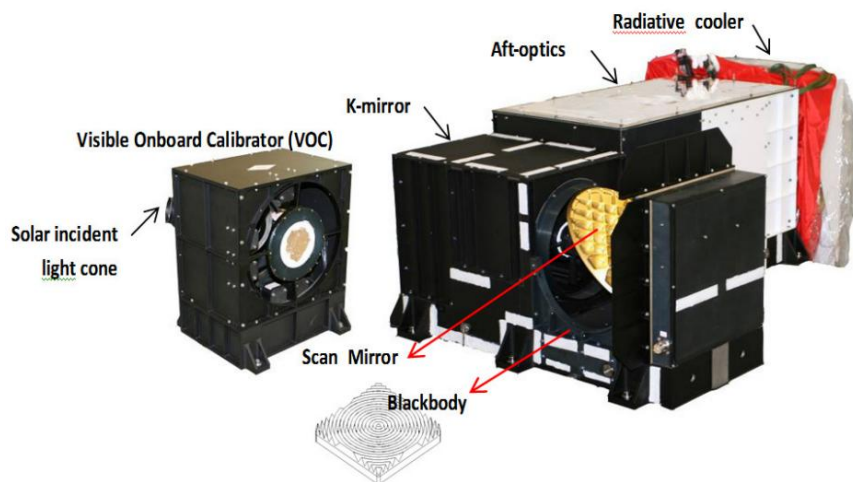
Цель работы – анализ качества исходных данных, создание методик относительной калибровки датчиков для видимого спектрального диапазона.





MERSI-II/FY-3D

Радиометр



Бортовая калибровка каналов цветности (1-19):

- по измерениям люминесцентным лампам;
- по луне;
- по солнцу.

Исследовались каналы с 5 по 19:

- пространственное разрешение 1 км;
- полоса сканирования десятью датчиками;
- узкая ширина спектрального диапазона каналов (в основном 20 нм)

Спектральные каналы

Канал	Длина волны (μm)	Ширина спектра (nm)	Пространственное разрешение (m)	Основное применение
1	0.470	50	250	Земля, облака, аэрозоли
2	0.550	50	250	
3	0.650	50	250	
4	0.865	50	250	
5	1.380	20 / 30	1000	
6	1.640	50	1000	Цвет океана, планктон, биогеохимическое зондирование
7	2.130	50	1000	
8	0.412	20	1000	
9	0.443	20	1000	
10	0.490	20	1000	
11	0.555	20	1000	
12	0.670	20	1000	
13	0.709	20	1000	
14	0.746	20	1000	
15	0.865	20	1000	
16	0.905	20	1000	Атмосферный водяной пар
17	0.936	20	1000	
18	0.940	50	1000	
19	1.030	20	1000	Перистые облака
20	3.800	180	1000	Температура огня, поверхности и облаков
21	4.050	155	1000	
22	7.200	500	1000	Атмосфера, водяной пар
23	8.550	300	1000	
24	10.80	1000	250	Температура земли, воды и облаков
25	12.00	1000	250	





Методики калибровки, использующиеся КМА

коррекция отсчетов радиометра

$$dn = DN * Slope + Intercept$$

Обычно Slope=1, Intercept=0

коэффициент отражения

$$Ref = Cal_2 * dn^2 + Cal_1 * dn + Cal_0$$

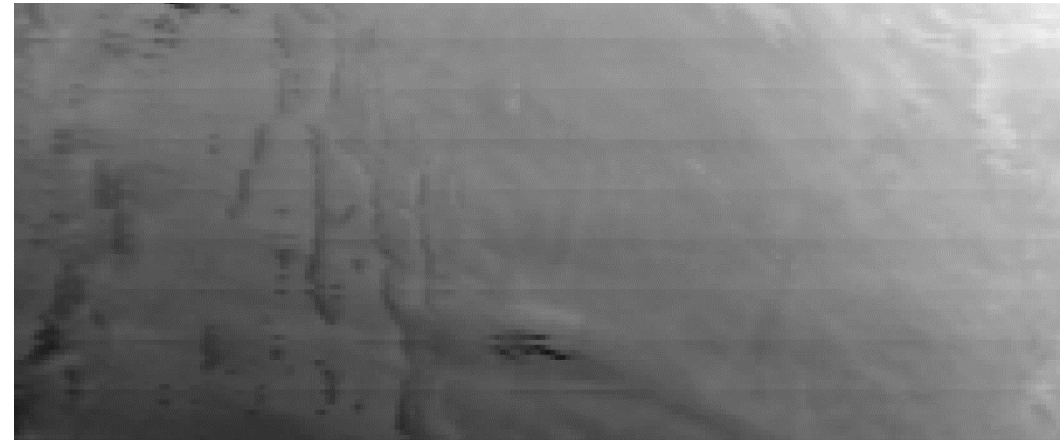
регистрируемое датчиком излучение

$$L_{toa} = Ref * E_0 / \pi$$

E_0 – излучение солнца для заданной длины волны

Особенность: калибровка единая для всех 10-ти датчиков

Проблема – «полосатость»





Методика верификации показаний датчиков

Использовались блоки данных - однородные участки изображений спектральных каналов размером 100 пикселей вдоль строки и 10 пикселей вдоль столбца. Первая строка всегда соответствовала первому датчику. Блоки были парные – ниже первого брался второй, который соответствовал отражению регистрируемого сигнала другой стороной зеркала.

В каждой строке блока считались средние величины яркости и стандартные отклонения, а также и отклонение этих средних от среднего по блоку.

Использовались как исходные отсчеты, так и предлагаемые калибровки.

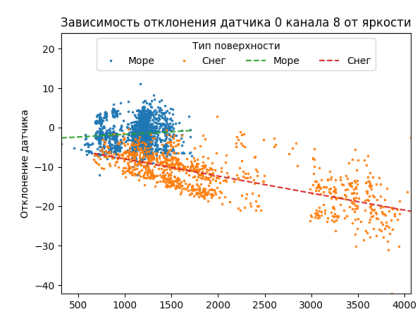
Использовались изображения моря и занесенный снегом лед (минимальные и максимальные значения яркости).

Данные 12-битовые. Усиление регистрируемого сигнала максимальное, то есть на очень ярких участках достигается максимальная величина отсчета – 4095. Эту величину имеют все пиксели, превышающие максимально возможное значение.



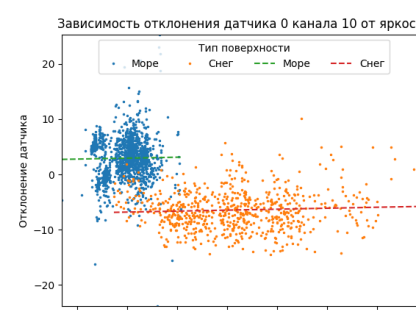


Рассогласования показаний датчиков на однородных участках



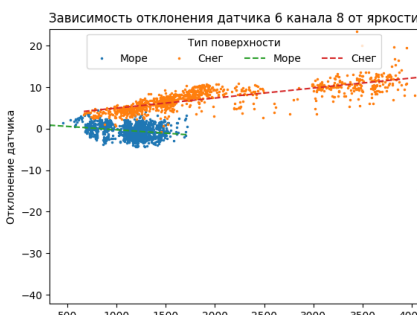
Море:
Количество = 1392
Среднее = 1.5858412356321803
Ст. откл = 3.349848718482553
slope = 0.001340966777977569
slope_stderr = 0.00039229139752898853
intercept = -3.0793999959228637
intercept_stderr = 0.4459984378947427
r² = 0.008336200031767263
pvalue = 0.0006483715291779373
Наклон значим? Да

Снег:
Количество = 922
Среднее = 12.297567245119303
Ст. откл = 5.706432023094492
slope = -0.004327635960241412
slope_stderr = 0.0001463025963362058
intercept = -3.6708876352321784
intercept_stderr = 0.32123890249842707
r² = 0.4874590382154592
pvalue = 1.1236001148328443e-135
Наклон значим? Да



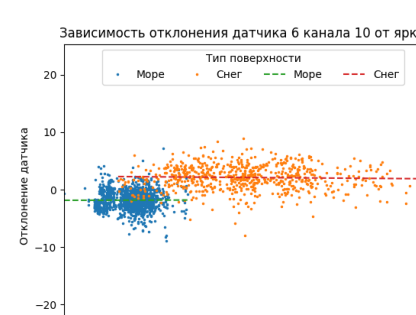
Море:
Количество = 1392
Среднее = 2.948793821839079
Ст. откл = 3.7748384336083505
slope = 0.0003364289310670005
slope_stderr = 0.0005408414065721995
intercept = 2.6188914108829318
intercept_stderr = 0.5399225094957414
r² = 0.00027830025653522984
pvalue = 0.534011620079097
Наклон значим? Нет

Снег:
Количество = 689
Среднее = -6.426431059506524
Ст. откл = 3.5965894199501203
slope = 0.00034862384753548786
slope_stderr = 0.00022990628837836862
intercept = 7.1536089219708305
intercept_stderr = 0.498733220629786
r² = 0.003335835215737436
pvalue = 0.12988486489126806
Наклон значим? Нет



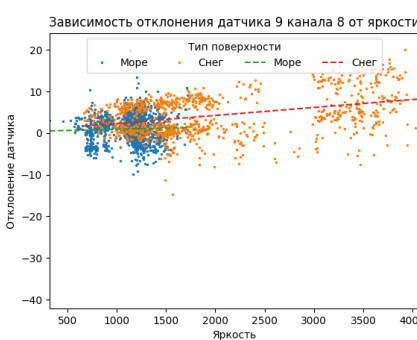
Море:
Количество = 1392
Среднее = -0.4487291666666666
Ст. откл = 1.5164592017824819
slope = -0.0016410574676597627
slope_stderr = 0.00017281566401642254
intercept = 1.3790683576391047
intercept_stderr = 0.19647516280132454
r² = 0.06092122074294634
pvalue = 9.145253742842132e-21
Наклон значим? Да

Снег:
Количество = 922
Среднее = 7.36729175704989
Ст. откл = 2.965332888461219
slope = -0.0024142497162074083
slope_stderr = 7.029616554839382e-05
intercept = 2.5547430604211955
intercept_stderr = 0.15435039183255692
r² = 0.5618022202107997
pvalue = 5.164749529020798e-167
Наклон значим? Да



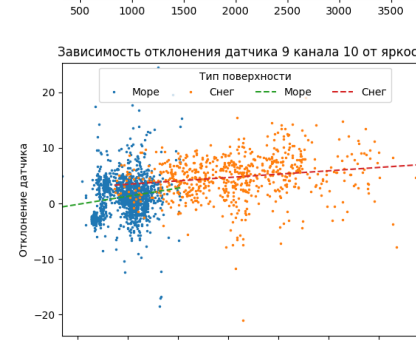
Море:
Количество = 1392
Среднее = -1.81897485632184
Ст. откл = 1.6272908865508427
slope = -3.8846339707420992e-05
slope_stderr = 0.00023319316678712578
intercept = -1.8550675475907374
intercept_stderr = 0.2327969683514905
r² = 1.9963945660026575e-05
pvalue = 0.8677211175621153
Наклон значим? Нет

Снег:
Количество = 689
Среднее = 2.1333222060958
Ст. откл = 2.1337554471801506
slope = -0.00012894416994543566
slope_stderr = 0.00013653641199759788
intercept = 2.4022807025985715
intercept_stderr = 0.29618696613368223
r² = 0.0012965410353723984
pvalue = 0.3453003485345145
Наклон значим? Нет



Море:
Количество = 1392
Среднее = 0.9631027298850598
Ст. откл = 3.083782800531615
slope = 0.0005525786007558461
slope_stderr = 0.0003623448814208592
intercept = 0.3476448203663891
intercept_stderr = 0.4119520644877692
r² = 0.0016703329181790585
pvalue = 0.12748475132218784
Наклон значим? Нет

Снег:
Количество = 922
Среднее = 4.225361171366598
Ст. откл = 4.8598452289534615
slope = 0.0019183793854384706
slope_stderr = 0.0001621395468183095
intercept = 0.401278964548335
intercept_stderr = 0.3560123427462125
r² = 0.13206571975983705
pvalue = 3.634442800489921e-30
Наклон значим? Да



Море:
Количество = 1392
Среднее = 1.240927442528733
Ст. откл = 3.552985600175086
slope = 0.002920545642556247
slope_stderr = 0.0005030910168560784
intercept = -1.6229531713179084
intercept_stderr = 0.5022362582171064
r² = 0.023670981588321215
pvalue = 7.953741738500766e-09
Наклон значим? Да

Снег:
Количество = 689
Среднее = 4.77793759071182
Ст. откл = 3.8733792760875247
slope = 0.001208551092799942
slope_stderr = 0.00024368978082163546
intercept = -2.257070107751393
intercept_stderr = 0.528633613578567
r² = 0.034564079783760526
pvalue = 8.920541923811079e-07
Наклон значим? Да



У датчиков присутствует систематические ошибки. Центральные датчики обычно имеют стандартные отклонения в несколько раз меньше крайних. Систематические ошибки зависят от типа подстилающей поверхности !!!

С ростом яркости рассогласования датчиков от среднего значения иногда возрастает, иногда нет. При этом шумы разных датчиков примерно одинаковые.



Влияния стороны зеркала

Зависимость отклонения датчика 0 канала 8 от яркости

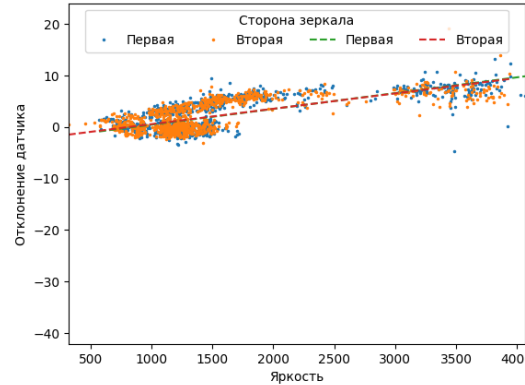


Первое зеркало:
Количество = 1193
Среднее=-5.227086336965627
Ст. откл=-6.131202297360159
slope=-0.005606453053999927
slope_stderr=0.0001619426787322557
intercept=-3.172488206885829
intercept_stderr=0.27312492734891824
r²=0.5015784057874016
pvalue=2.7057443119370564e-182
Наклон значим? Да

Второе зеркало:
Количество = 1121
Среднее=-6.520904549509366
Ст. откл=-7.524494624547884
slope=-0.000861394879890296
slope_stderr=0.00020591676515293634
intercept=4.991988874014009
intercept_stderr=0.328383047414397
r²=0.5779952273329758
pvalue=7.265204841346738e-212
Наклон значим? Да

Разница средних по площадкам, соответствующим разным сторонам зеркала, обычно около одного отсчета. Отдельные датчики имеют максимальную разницу не более 5 отсчетов на каналах 412 и 443 нм.

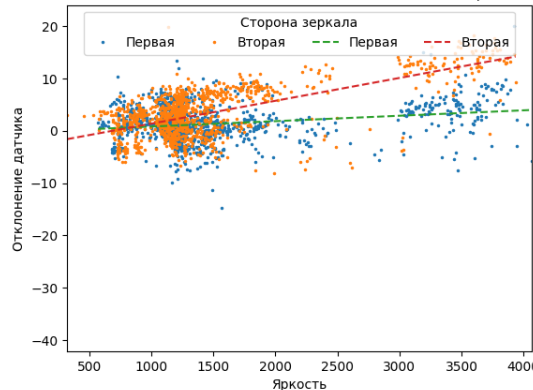
Зависимость отклонения датчика 5 канала 8 от яркости



Первое зеркало:
Количество = 1193
Среднее=1.9850427493713387
Ст. откл=3.15777411244009
slope=0.0030676565302302874
slope_stderr=7.781894685953702e-05
intercept=-2.610912920357942
intercept_stderr=0.13124578631010972
r²=0.566115553596978
pvalue=3.4948441528895343e-218
Наклон значим? Да

Второе зеркало:
Количество = 1121
Среднее=1.8419946476360387
Ст. откл=2.9042001442937515
slope=0.0029869693670625014
slope_stderr=8.363519555929395e-05
intercept=-2.423850220986454
intercept_stderr=0.133376118994782
r²=0.5326807304597861
pvalue=4.599539750442792e-187
Наклон значим? Да

Зависимость отклонения датчика 9 канала 8 от яркости



Первое зеркало:
Количество = 1193
Среднее=1.336492875104781
Ст. откл=3.394039985542507
slope=0.0010354073183665468
slope_stderr=0.00012338434217871867
intercept=-0.214751890543311
intercept_stderr=0.20809424518210332
r²=0.055826743363226274
pvalue=1.342157373374279e-16
Наклон значим? Да

Второе зеркало:
Количество = 1121
Среднее=3.248872435325604
Ст. откл=4.7280739571330495
slope=0.0043703636900275355
slope_stderr=0.00015034206015780873
intercept=-2.9926691508382146
intercept_stderr=0.23975600668396224
r²=0.4302542517580867
pvalue=7.305086726350986e-139
Наклон значим? Да

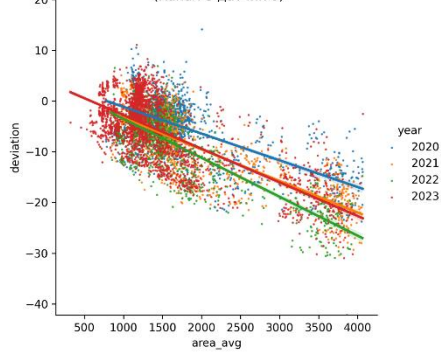




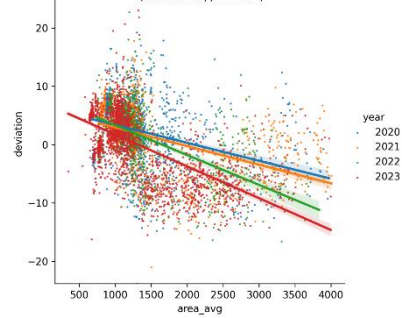
Временная изменчивость

Исследовались относительные отклонения датчиков в зависимости от года

Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 8 датчик 0)



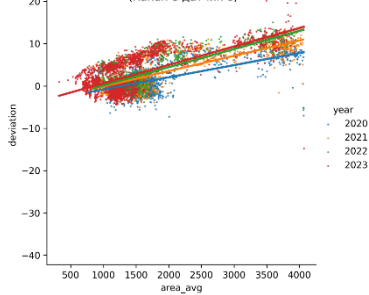
Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 10 датчик 0)



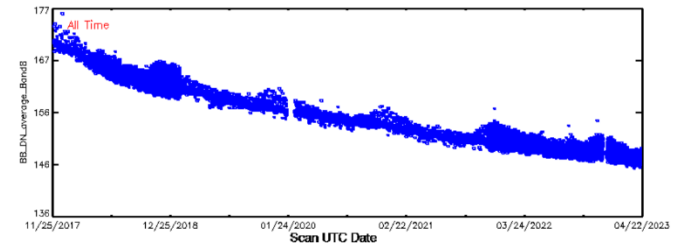
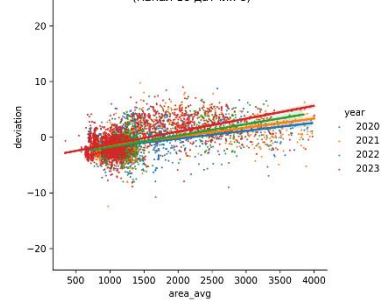
В целом, изменчивость показаний датчиков относительно друг друга не высокая.

Изменчивость показаний самих датчиков тоже не большая

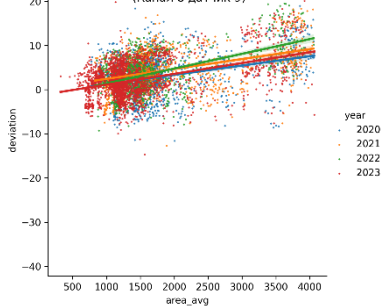
Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 8 датчик 6)



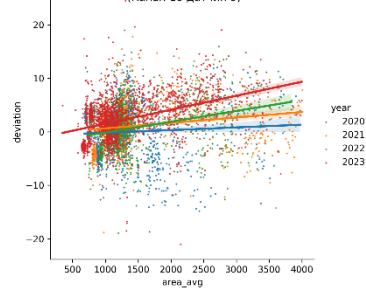
Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 10 датчик 6)



Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 8 датчик 9)



Зависимость отклонения датчика от ср. яркости области
(Канал 10 датчик 9)



Изменение темнового сигнала за 6 лет – 17% (датчики сканируют на борту черное тело)

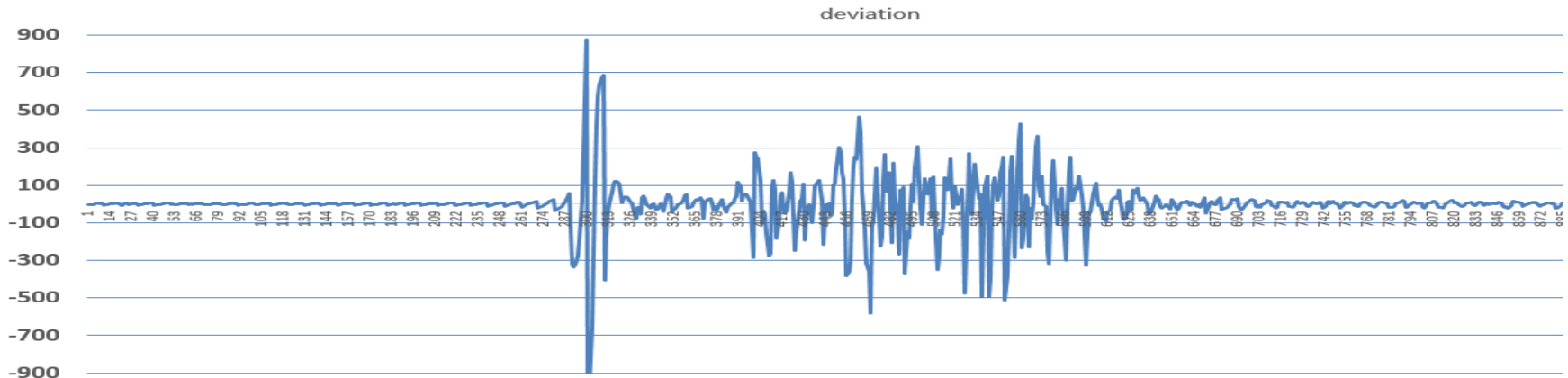




Зависимость относительных отклонений от вариации сигнала



Фрагмент изображения Гренландии



Относительные отклонения датчиков фрагмента (желтая полоса)

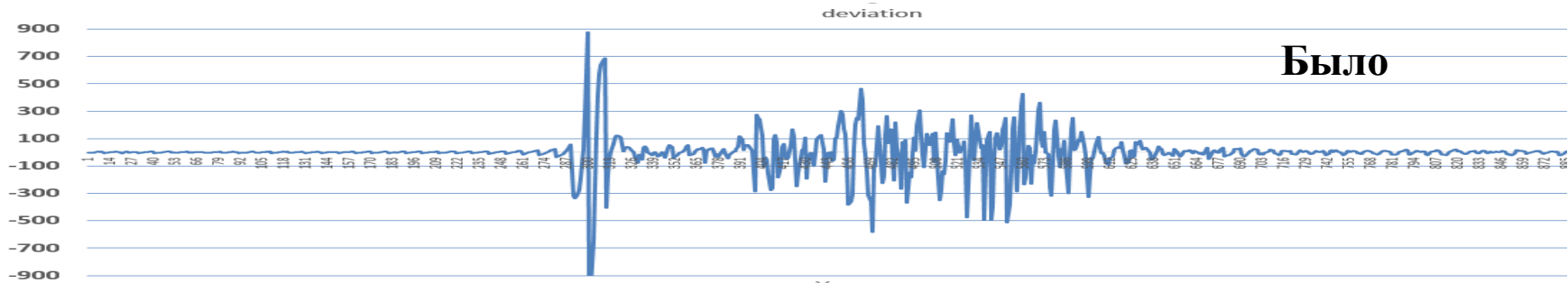
Ось X. Вдоль полосы сканирования берутся каждые 10 точек – относительные отклонения 10 датчиков от среднего.

Структура «полосатости» стабильна, но может менять наклон в зависимости от направления сканирования. Систематические отклонения датчиков зависят от изменчивости сигнала. Показания датчиков зависят друг от друга.



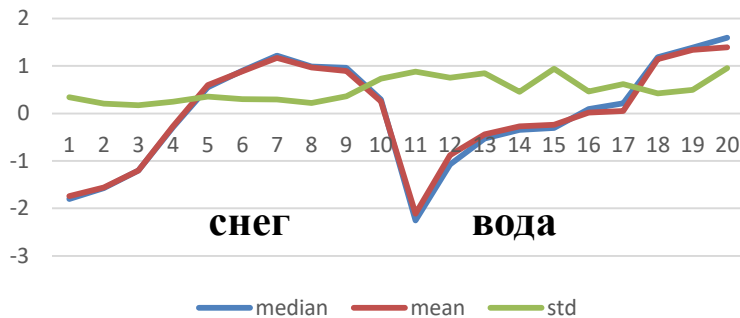


Нормировка «полосатости» на изменчивость сигнала

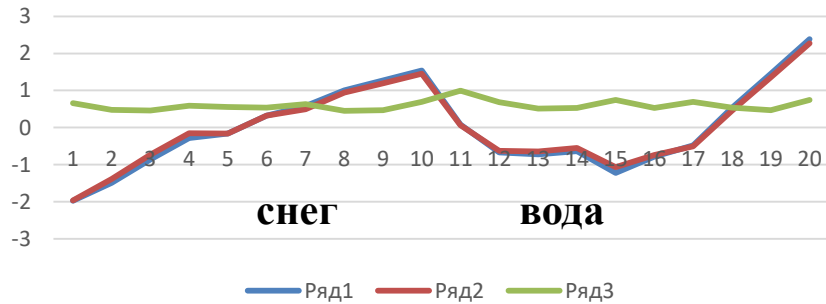


Функции коррекции датчиков каналов 8 и 10

относительные отклонения датчиков, канал 8



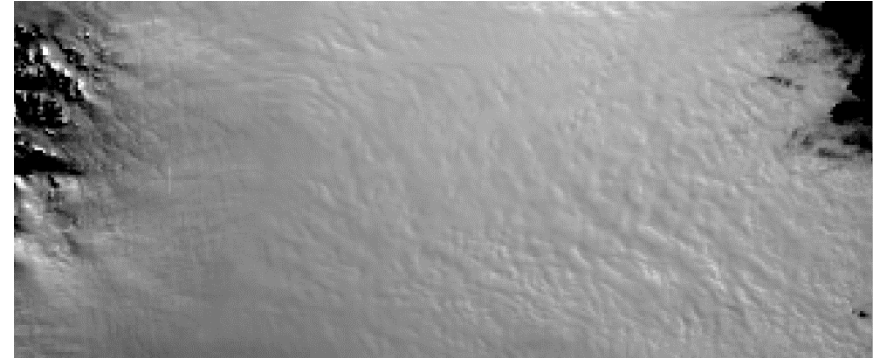
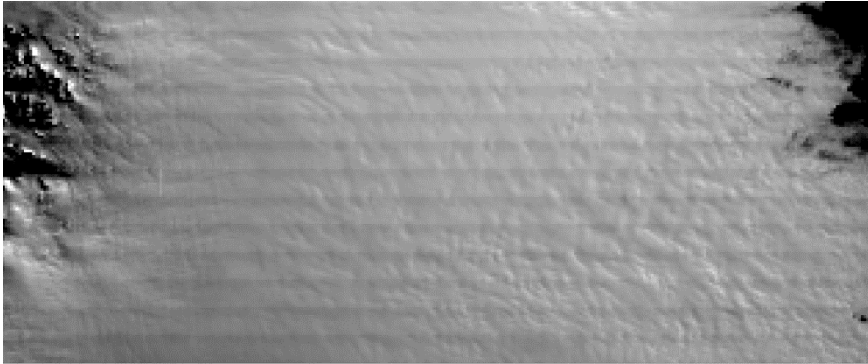
относительные отклонения датчиков, канал 10



Отличия функций изменчивости систематических ошибок датчиков на воде (низкий сигнал) и снега (высокий сигнал) говорят о существовании зависимости поправок от уровня сигнала.



Коррекция «полосатости»



Фрагмент изображения о. Гренландия до коррекции и после. Канал 8 (412 нм)

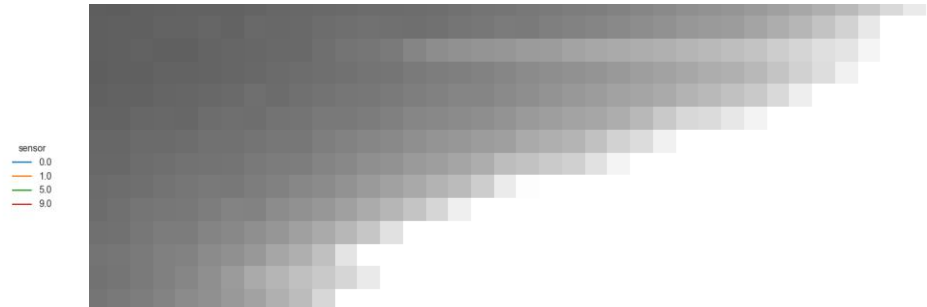
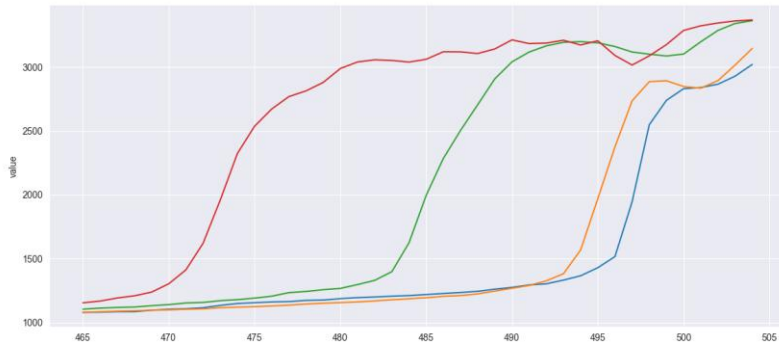
При слабом уровне изменчивости сигнала в полосе сканирования провести коррекцию показаний датчиков труда не составляет





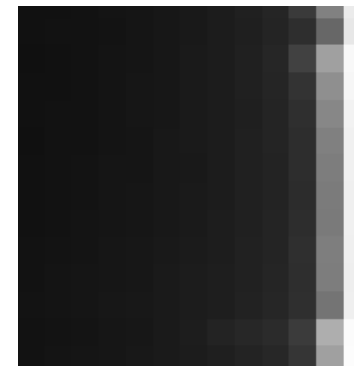
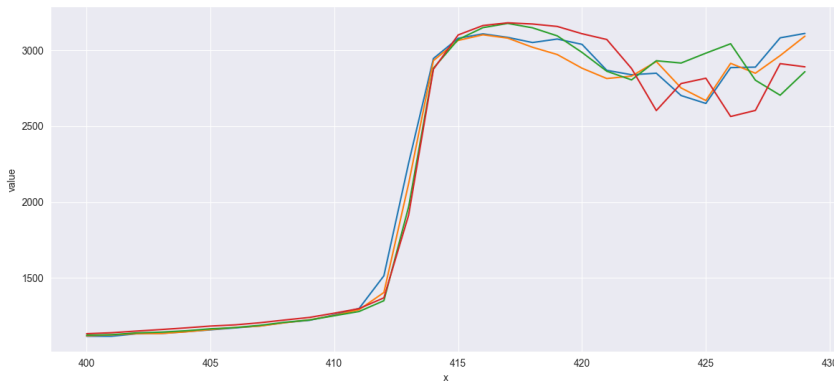
Зависимость показаний датчиков друг от друга

Пересечение сканирующей полосой наклонной и вертикальной границы лед/вода. Слева – изменчивость сигнала датчиков с номерами 0, 1, 5 и 9. Справа – фрагмент изображения



Граница наклонная. Первый датчик (синий) достигает ее последним).

До пересечения границы у него растет сигнал с момента достижения последнего датчика граница вода/лед. На самой границе градиент яркости первого датчика более резкий, чем у последнего.



Граница вертикальная. Изменчивость показаний датчиков одинаковая.



Выводы

- **Ошибки каналов спутника FY-3D довольно экзотические и сложно корректируемые. Систематические ошибки измерений датчиков зависят от изменчивости сигнала на 10-ти датчиках полосы сканирования и могут быть большими.**
- **Общая схема относительной калибровки может быть следующей: восстановление функции влияния показаний датчиков друг на друга и коррекция показаний; оценка систематических отклонений датчиков после коррекции и введение соответствующих поправок; расчет деградации датчиков со временем.**
- **Слабая изменчивость поправок на показания датчиков со временем позволяет надеяться на получения хорошего качества изображений после соответствующей коррекции.**





Владивосток

Благодарю за внимание!

