

### Обработка данных поверки ИК-радиометра

**Поверка ИК-радиометра.** При проведении поверки должен использоваться в качестве образцового термометра лабораторный стеклянный ртутный термометр типа ТЛ с ценой деления 0,1 °С и пределами шкалы от 0 до 50 °С.

В качестве образцового излучателя в данной работе использовалась кювета с пресной водой. Процесс поверки заключался в выполнении следующих операций.

Непрерывно перемешивая воду в кювете измерялась температура воды в верхнем 2-х см слое с помощью заглубленного образцового термометра (постоянная времени контактного образцового термометра около 1 минуты). Записывались показания образцового термометра. Направлялась оптическая ось радиометра на поверхность образцового излучателя (воды), продолжая перемешивать воду, и снимались показания ИК-радиометра.

Были выполнены 3 цикла измерений. При каждом цикле по мере уменьшения температуры воды в кювете записывались результат измерения температуры воды, полученных образцовым термометром и поверяемым ИК-радиометром. Измерительный цикл проводился в диапазоне температур образцового излучателя (воды) от 13 до 37 °С. Полученные таким образом данные представлены в таблице 1 ( $Tr$  – данные ИК-радиометра,  $Ts$  – контактные измерения).

Таблица 1

Данные калибровки ИК радиометра

$Tr$ [C]	$Ts - Tr$ [C]	$Tr$ [C]	$Ts - Tr$ [C]	$Ts$ [C]	$Ts - Tr$ [C]
36.3	0.4	35.8	0.4	35.3	0.5
35.1	0.5	35.0	0.4	34.4	0.3
34.5	0.1	34.0	0.3	33.9	0.0
33.5	0.1	33.0	0.2	32.2	0.1
31.6	-0.1	31.3	0.1	31.2	0.0
30.9	-0.2	30.6	-0.2	30.3	-0.2
29.9	-0.2	29.6	-0.2	29.4	-0.2
29.1	-0.3	28.7	-0.4	28.4	-0.6
28.0	-0.6	27.6	-0.5	27.5	-0.7
27.2	-0.6	26.8	-0.7	26.6	-0.8
26.4	-0.8	25.8	-0.9	25.6	-0.9
24.9	-0.9	24.8	-0.9	24.6	-1.0
24.4	-1.2	23.9	-1.4	22.9	-1.4
22.3	-1.6	21.7	-1.6	20.9	-1.7
19.9	-2.2	19.5	-2.0	19.1	-2.0
18.8	-2.2	18.3	-2.2	17.4	-2.3
17.0	-2.3	16.8	-2.4	16.7	-2.4
16.3	-2.3	16.1	-2.5	15.8	-2.5
15.4	-2.6	15.0	-2.6	14.5	-2.7
14.3	-2.8	14.2	-3.0	13.6	-2.9

**Обработка данных.** Для коррекции результатов дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности с учетом данных поверки необходимо:

- произвести обработку данных поверки с использованием программы, написанной на языке Visual Basic;
- на основе результатов проведенной обработки данных поверки разработать алгоритм и методику учета данных поверки для коррекции результатов дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

На рис. 1 представлен Лист 1 файла текстового процессора Excel после выполнения программы по обработке данных поверки ИК-радиометра из таблицы 1.

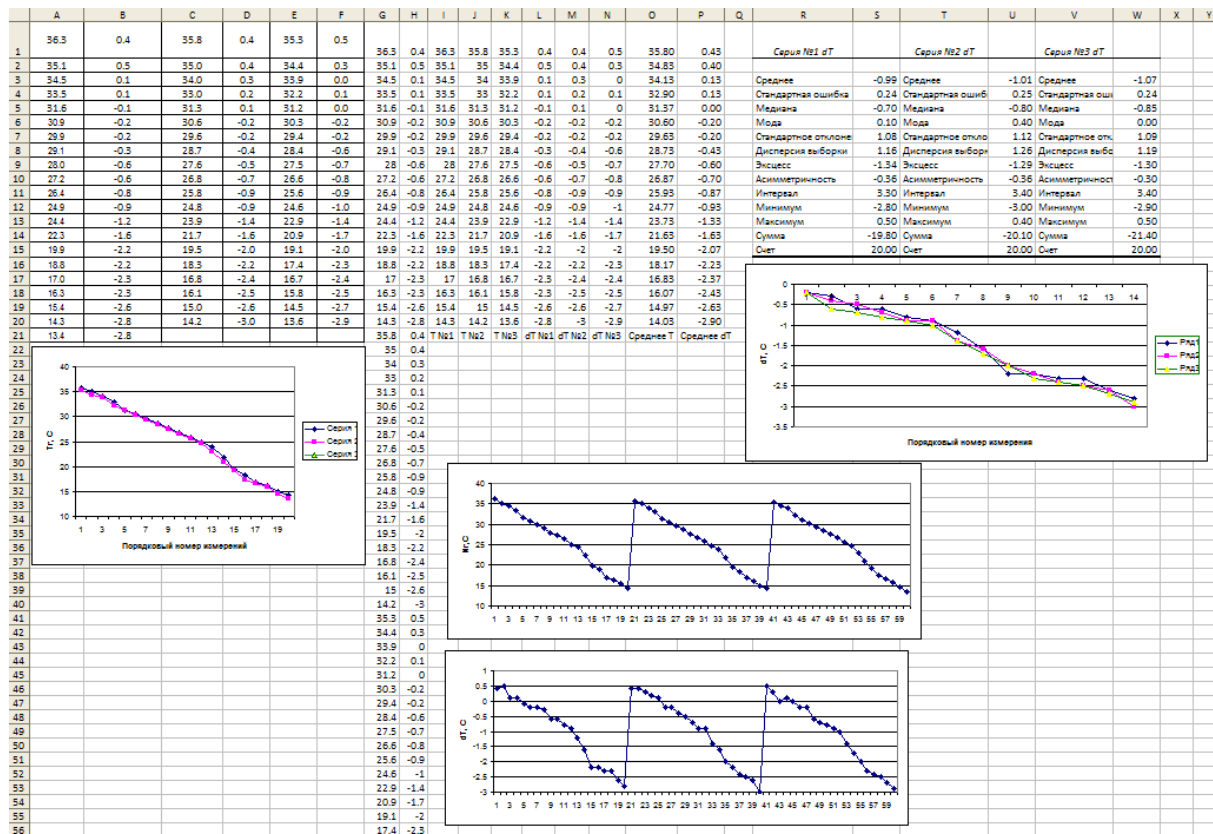


Рис. 1. Общий вид Листа 1 после выполнения программы обработки данных поверки ИК-радиометра

В колонках «А» - «F» содержатся данные, перенесенные из исходной таблицы 1. Колонки «G» и «H» содержат по отдельности данные измерений ИК-радиометром и отклонения этих измерений от контактных соответственно. На рис. 2 эти данные представлены в виде двух графиков.

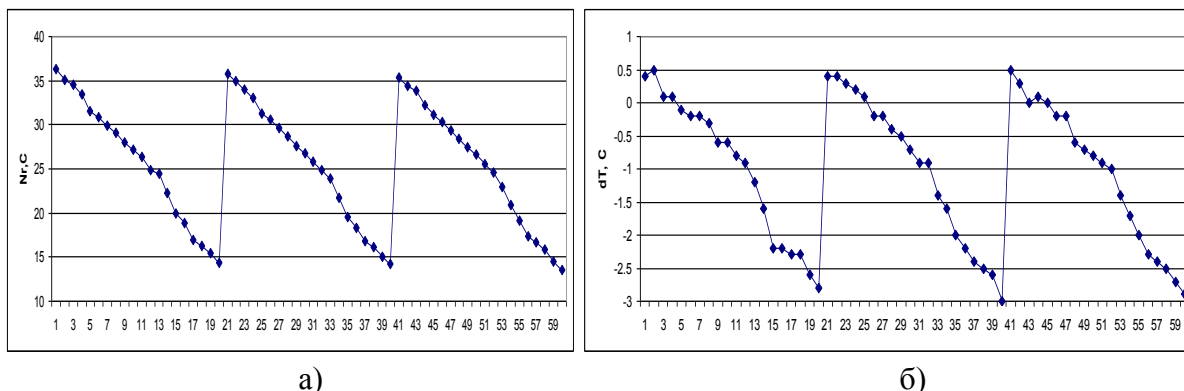


Рис. 2. Графическое представление двух серий данных, полученных при поверке ИК-радиометра: а) – это  $T_t$ , б) – это  $T_s - T_t$

Следующие 6 колонок содержат отсортированные по 3-м сериям данных: колонки «I» - «K» - это значения  $Tr$ , колонки «L» - «N» - это значения  $T_s - Tr$  (рис. 3). По этим данным были рассчитаны средние значения  $Tr$  (колонка «O») и  $T_s - Tr$  (колонка «P»).

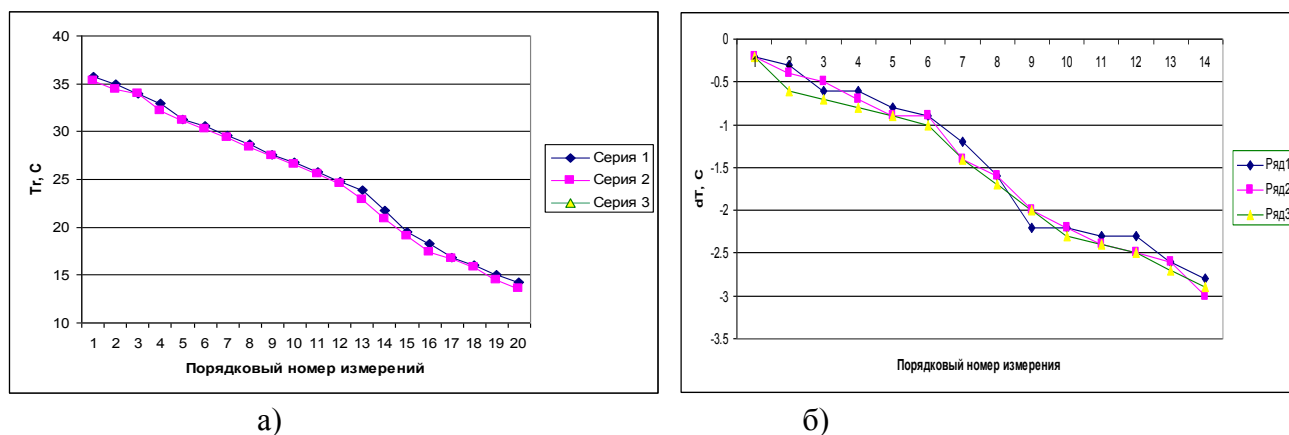


Рис. 3. Совместное представление трех серий данных, полученных при поверки ИК-радиометра: а) – это  $Tr$ , б) – это  $T_s - Tr$

Следующим этапом обработки данных поверки было построение аппроксимационного полинома для осредненных значений  $T_s - Tr$ . Для оценки оптимальной степени такого полинома на рис. 4 представлены линии тренда при использовании полиномов от 1 до 4 степеней. Анализ значений коэффициента детерминации  $R^2$  для этих полиномов показал, что зависимость значений  $dT$  от  $Tr$  близка к линейной: для полинома первой степени  $R^2 = 0.973$ , что очень близко к 1. На этом основании можно сделать вывод, что для аппроксимации зависимости  $dT$  от  $Tr$  вполне можно ограничиться полиномом второй степени (в этом случае  $R^2 = 0.999$ ).

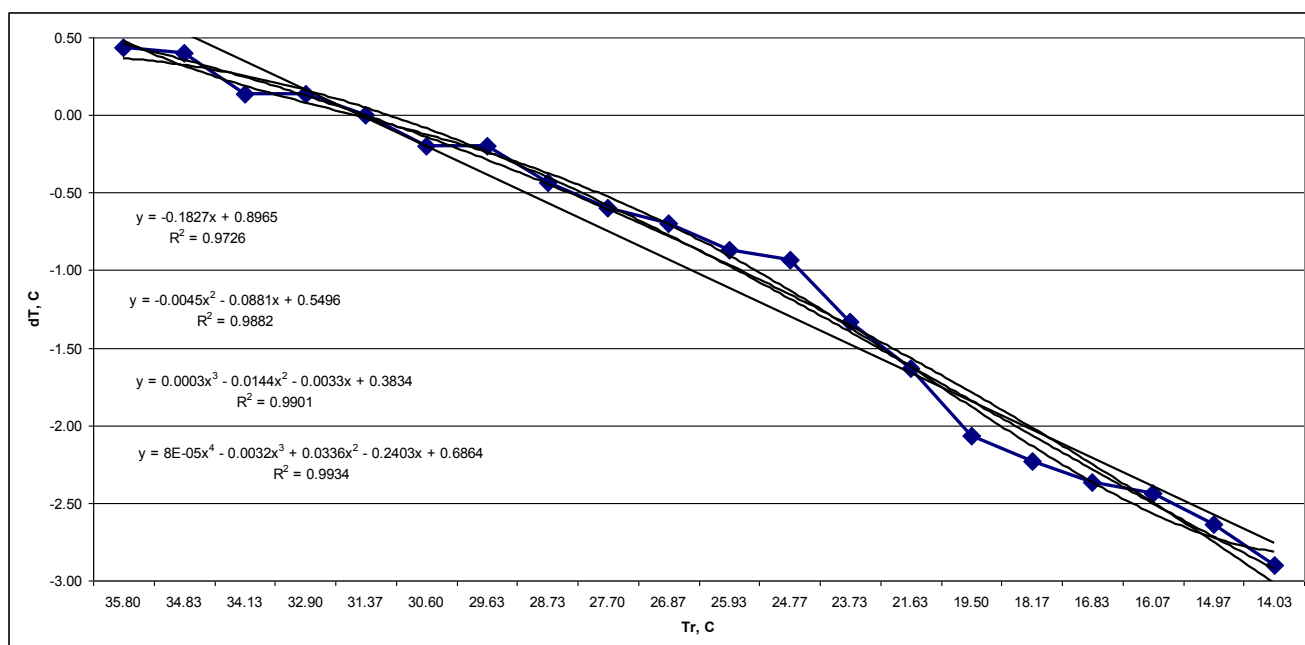


Рис. 4 Зависимость поправки  $dT$  от показаний ИК-радиометра  $T_r$

Для коррекции данных измерений ИК-радиометра необходимо по значению  $Tr$  и  $dT(Tr)$  рассчитать истинное значение  $T_s$ , т.е. температуры подстилающей поверхности. Для этого необходимо воспользоваться соотношением (1.1):

$$T_s = Tr + dT(Tr), \quad (1.1)$$

где  $Tr$  – показание ИК-радиометра, а  $dT(Tr)$  – соответствующая этому показанию поправка, найденная на основе аппроксимации данных поверки. Как было показано ранее, для такой аппроксимации достаточно рассчитать коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  аппроксимационного полинома второй степени:

$$dT(Tr) = a*Tr^2 + b*Tr + c. \quad (1.2)$$

Полученные с использованием стандартных средств табличного процессора Excel коэффициенты для полинома второй степени, представленные на рис. 4

$$a = -0.0045, b = -0.0881 \text{ и } c = +0.5496$$

не могут быть использованы для коррекции показаний ИК-радиометра, так как они предполагают использование порядкового номера в значении  $dT$  в таблице 1, а не показания радиометра  $Tr$ . Действительно, если в соотношении для расчета по этим коэффициентам в качестве  $Tr$  подставить 1, то получим  $dT(1) = 0.457$ . Поэтому для расчета коэффициентов, предполагающих в качестве аргумента полинома использование значений  $Tr$ , использовалась специальная программа расчета коэффициентов аппроксимационных полиномов.

Результаты использования полученных коэффициентов аппроксимационного полинома второй степени иллюстрирует рис. 5. В колонках «А» и «В» содержатся соответственно осредненные значения  $Tr$  и  $dT(Tr)$  соответственно. Значения коэффициентов представлены в колонке «G»:

$$a = -0.0015, b = +0.2304 \text{ и } c = -5.8344. \quad (1.1)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35.80	0.43		35.80	0.4843	0	-5.834355783		Номер колонки со значениями X	1
2	34.83	0.40		34.83	0.3644	1	0.230489664		Номер колонки со значениями Y	2
3	34.13	0.13		34.13	0.2759	2	-0.00150815		Длина рядов X и Y	20
4	32.90	0.13		32.90	0.1163				СТЕПЕНЬ АППРОКСИМИРУЮЩЕГО ПО	2
5	31.37	0.00		31.37	-0.088	№	Козф.		Номер колонки со значениями X1	4
6	30.60	-0.20		30.60	-0.194	коэф.	полинома		Длина ряда X1	20
7	29.63	-0.20		29.63	-0.329					
8	28.73	-0.43		28.73	-0.457	Расчет коэффициентов аппроксимационного полинома				
9	27.70	-0.60		27.70	-0.607					
10	26.87	-0.70		26.87	-0.73					
11	25.93	-0.87		25.93	-0.871					
12	24.77	-0.93		24.77	-1.051					
13	23.73	-1.33		23.73	-1.214					
14	21.63	-1.63		21.63	-1.554					
15	19.50	-2.07		19.50	-1.913					
16	18.17	-2.23		18.17	-2.145					
17	16.83	-2.37		16.83	-2.382					
18	16.07	-2.43		16.07	-2.52					
19	14.97	-2.63		14.97	-2.723					
20	14.03	-2.90		14.03	-2.897					
21										
22	X	Y(X)		X1	Y(X1)					

Рис. 5. Результаты расчета коэффициентов аппроксимационного полинома  $dT(Tr)$

Для контроля качества полученных коэффициентов в колонках «D» и «E» приведены результаты расчета значений аппроксимационного полинома (колонка «E») по значениям его аргумента из колонки «D». На рис. 6 приведено сравнение полученных результатов.

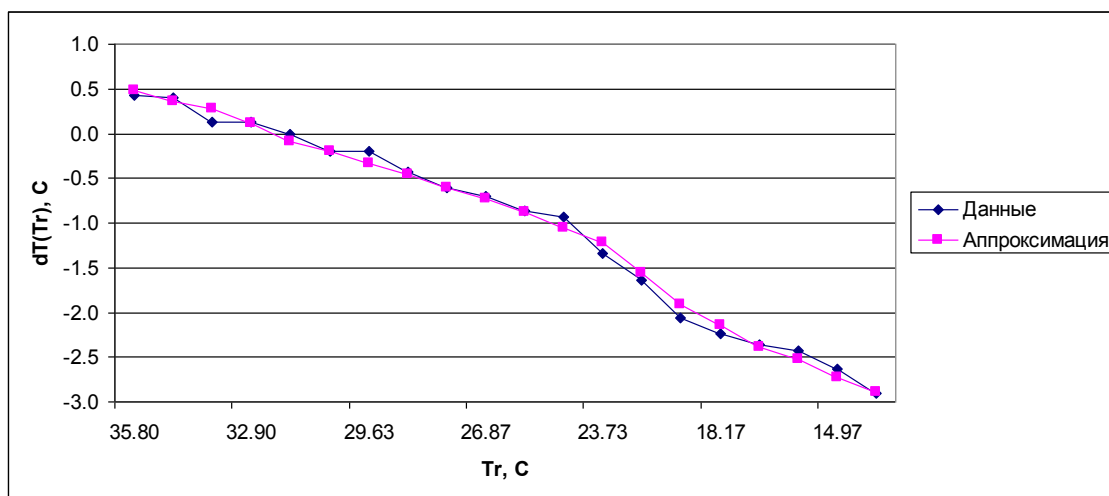


Рис. 6. Сравнение исходных данных и результатов аппроксимации

На рис. 7 представлен пример работы программы коррекции показаний ИК-радиометра.

	A	B	C
1	Tr [C]	Ts [C]	dT(Tr) [C]
2	20	18.1736	-1.8264

Рис. 7. Пример результатов работы программы коррекции показаний ИК-радиометра.

Полученные результаты показывают, что на основе использования данных поверки точность дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности ИК-радиометром может быть существенно повышена и достигать 0.5 – 0.3 °С.

#### Литература

1. «Виртуальная лаборатория дистанционного обучения спутниковой гидрометеорологии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteovlab.meteorf.ru/>: «Средства измерения» - Космические системы и Спектральные диапазоны (дата обращения 18.12.2020).
2. Руководство по эксплуатации на инфракрасный термометр «КЕЛЬВИН» ТМ ЗАО «Евромикс» Москва [www.zaoeuromix.ru](http://www.zaoeuromix.ru)
3. Электронное издание «Использование космических снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для географических исследований» Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко, Ю.В. Федоркова, 2012 г. – Режим доступа: [http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat\\_img/files/1/fizicheskie\\_osnovy.htm](http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/1/fizicheskie_osnovy.htm) (дата обращения 01.12.2020).