



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(указать вид работы)

На тему «Инфракрасная радиометрия параметров подстилающей поверхности»

Исполнитель Ронская Анна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)
Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«28» мая 2020 г.

Санкт-Петербург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	3
2	ИК радиометр «Кельвин»	9
2.1	Тактико-технические характеристики прибора «Кельвин»	9
2.2	Порядок работы	10
2.3	Примеры использования ИК радиометра + ПЭВМ	11
2.3.1	Поверка ИК радиометра	11
2.3.2	Обработка данных поверки ИК-радиометра	14
3	Определение параметров подстилающей поверхности с помощью ИК-радиометра	24
3.1	Определение излучательной способности	24
3.2	Измерение температуры	33
	Оценка случайной составляющей погрешности	
3.2.1	дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности	33
3.2.2	Оценка доверительных интервалов для среднего арифметического значения и для дисперсии	41
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
	Список литературы	46

1. Введение

Освоение человеком космического пространства, начавшееся с 1957г., открыло новую эпоху во многих отраслях науки. Впервые стало возможным наблюдать родную планету со стороны ("из вне"), рассматривая ее главные объекты в совокупности на всей поверхности. Естественно первое внимание уделялось исследованию из космоса океанов, континентов, крупных рек, ледников и прочих важных составляющих Земли. Среди этого не последнее место занимало наблюдение за метеорологическими объектами, в первую очередь за облаками, которые, как известно, широко различаются своей формой, внутренним строением, горизонтальной и вертикальной протяженностью, а также подвержены изменению своей структуры, зачастую очень быстрому. Все развитие космической техники, идущее от запуска первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) до наших дней, шло по пути получения максимально возможной информации обо всех геофизических оболочках и объектах на нашей планете.

Все ИСЗ на орбите Земли, если они запущены не для военных целей и не для осуществления связи, служат науке, а именно геофизике, проводя детальное исследование всех оболочек Земли и их взаимодействия в глобальном масштабе. Источником информации для космических аппаратов является излучение, идущее с поверхности исследуемого объекта, в данном случае с Земли. В первую очередь это солнечная радиация, по-разному отраженная различными земными объектами, а также собственное тепловое излучение поверхности различных участков суши, воды, облаков и льдов.

Поначалу исследование Земли носило исключительно обзорный характер. Проводились просто наблюдения за природными ресурсами, оценивался их общий объем, динамика изменения, влияние антропогенных воздействий и пр. Однако вскоре появилась потребность на основе принятого

излучения получать информацию о многих физических характеристиках и явлениях, таких как:

- температура и влажность воздуха в атмосфере;
- температура поверхности суши и океана;
- наличие в земной коре определенных элементов;
- уровень солености и степень взволнованности водной поверхности;
- высота верхней границы, водность и «ледность» облаков в атмосфере, направление и скорость перемещения облачных масс;
- зарождение таких опасных атмосферных явлений как тайфуны, шквалы, ливневые осадки, градовые и грозовые процессы в облаках.

Используемые в настоящее время приборы для проведения дистанционного зондирования системы «подстилающая поверхность – атмосфера» представляют собой семейство весьма разнообразной регистрирующей аппаратуры (многоканальные радиометры и спектрометры), предназначенной для регистрации электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах. Классификацию этой аппаратуры можно осуществить, исходя из:

- организации измерений (аппаратура для пассивного и активного дистанционного зондирования);
- используемой геометрии измерений (надирные и лимбовые);
- области спектра, в которой осуществляется регистрация электромагнитного излучения (УФ, видимый, ИК и СВЧ диапазоны длин волн);
- особенностей организации измерений (с пространственным сканированием или нет) и т.д.

С учетом отмеченной классификации разработана и успешно используется обширная и разнообразная серия радиометров и спектрометров для самолетных, аэростатных, ракетных и спутниковых измерений уходящего излучения. Причем ИК-радиометры нашли широкое применение

для дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности или верхней границы облаков с борта самолетов, вертолетов и, особенно, метеорологических спутников Земли.

Большинство спутниковых радиометров являются приборами сканерного типа, поскольку именно этот тип радиометров обеспечивает основное преимущество спутниковой аппаратуры - оперативный просмотр протяженных территорий, а также обеспечивает их картирование с высоким пространственным разрешением.

Первый ИК-сканер был выведен на орбиту в составе бортовой аппаратуры ИСЗ "Нимбус-2" в 1964 г. Точность прибора была еще далека от совершенства - погрешность измерений температуры подстилающей поверхности достигала нескольких градусов. Однако уже этот прибор выявил высокие потенциальные возможности такого типа измерительной спутниковой аппаратуры и позволил получить информацию, имеющую большую практическую ценность.

После испытаний радиометрической аппаратуры на экспериментальных ИСЗ серии "Нимбус" усовершенствованный ИК-радиометр был установлен на оперативных метеорологических ИСЗ серии ИТОС/НОАА с полярной орбитой. Оперативность МИСЗ, возможность обеспечения регулярного и непрерывного поступления данных от ИК-радиометров непосредственно к потребителям (последнее обусловлено передачей информации с МИСЗ в режиме непосредственной передачи данных) обусловили широкое использование спутниковых данных в различных областях геофизической науки.

Следующим шагом в развитии спутниковой ИК-радиометрии был запуск первого геостационарного МИСЗ "Метеосат-1". В настоящее время на орбите одновременно функционирует несколько геостационарных МИСЗ, оснащенных ИК-радиометрами. Геостационарные МИСЗ обеспечивают большую повторяемость данных по сравнению с МИСЗ на полярных орбитах, имеют большой срок службы. Однако пространственное

разрешение и точность регистрации теплового излучения у радиометров геостационарных МИСЗ хуже, чем у радиометров МИСЗ, находящихся на полярных орбитах.

С 1978 г. заработал МИСЗ четвертого поколения "Тайрос-Н", усовершенствованный вариант которого составил основу американской космической системы до конца 80-х годов. На этом МИСЗ был установлен радиометр *AVHRR*, который использовался также для проведения океанологических исследований на ИСЗ НОАА НРОСС (*NROSS*).

По мере создания более совершенных приемников ИК-излучения техника ИК-радиометрии постепенно сблизилась с техникой ИК-спектроскопии, что повлекло за собой необходимость разработки новых совершенных методов обработки спутниковых данных. В первых радиометрах в качестве приемника излучения использовались термоэлементы и болометры, обладающие высокой чувствительностью и не требующие охлаждения. Однако, такие тепловые приемники излучения имеют относительно большую (с учетом специфики проведения спутниковых измерений) постоянную времени - порядка десятков и сотен миллисекунд, что не позволяет обеспечить высокое пространственное разрешение прибора. Для сравнения отметим, что в радиометре сверхвысокого разрешения *AVHRR* время просмотра одного элемента разрешения составляет 0,25 мс. Достигнутые в настоящее время успехи в создании радиометров высокого разрешения связаны, прежде всего, с появлением фотоэлектрических приемников излучения, спектральная чувствительность которых лежит в диапазоне 8-14 мкм. Наибольшее применение сейчас находят фоторезисторы и фотодиоды на основе *HgColTe*. Максимум их спектральной чувствительности при охлаждении приемника излучения до 77 К приходится на 10 мкм, постоянная времени составляет всего 50-500 нс. Достоинством фотоэлектрических приемников является также возможность изготовления линеек и матриц приемников излучения, позволяющих отказаться от применения в радиометрах сложных систем оптико-механического

сканирования. Вместе с тем, появление новых приемников излучения поставило перед разработчиками спутниковой аппаратуры и новые проблемы: необходимость разработки специальных микрокриогенных систем для охлаждения приемников излучения (систем, имеющих малую массу и малое энергопотребление); технологические трудности получения приемников излучения одинаковых по всем своим параметрам (что особенно важно для многоэлементных приемников излучения).

Повышение точности измерения в настоящее время идет и по пути совершенствования методики многоканальных измерений - определяются оптимальные спектральные диапазоны, их число. Принципиальных технологических трудностей в разработке многоканальных радиометров для сегодняшнего уровня техники нет. Иначе обстоит дело с перспективными конструкциями, а именно - гетеродинными радиометрами, ИК-спектрометрами, назначение которых - обеспечить качественный скачок в улучшении точностных характеристик радиометров. Так как для создания эксплуатационных гетеродинных радиометров требуется разработка стабильных источников излучения с высокой степенью когерентности (т.е. значительное усовершенствование лазеров и светодиодов), то спутниковые ИК-спектрометры необходимо оснастить криогенными системами.

Градуировка спутниковых радиометров является важнейшей операцией по подготовке прибора к работе. От ее результатов во многом зависит точность дистанционного измерения метеорологических величин. Предполетная градуировка спутниковых радиометров должна проводиться в условиях, приближенных к реальным условиям его работы на борту МИСЗ.

Однако, даже обширная и тщательно выполненная программа предполетной калибровки радиометра еще не обеспечивает необходимой точности радиационных измерений. В частности, при использовании данных, получаемых со сканирующих радиометров, установленных на борту МИСЗ, следует учитывать тот факт, что с момента запуска спутника необходимо 1-2 месяца для выхода радиометра на номинальный режим, когда

стабилизируются все его параметры. В качестве одной из причин, требующих учитывать время стабилизации параметров радиометра, можно указать пример с радиометром *НСМР*. В номинальном режиме температура приемника излучения этого радиометра должна составлять 150 К, однако реальная температура приемника в первые 70 суток после запуска превышала 200 К и уменьшалась на 0.14 К в сутки в течение первых 30-50 суток полета.

Орбитальная калибровка производится в течение всего периода функционирования прибора. Ее необходимость объясняется следующими факторами:

- "старением" электроники, из-за которого происходит изменение чувствительности прибора;
- изменением условий нагрева Солнцем корпуса МИСЗ;
- на холодных элементах конструкции вблизи охлаждаемых приемников излучения из-за процессов дегазации и конденсации может осаждаться лед.

Поэтому помимо предполетных градуировок спутниковые радиометры нуждаются в проведении постоянных орбитальных калибровок в процессе их функционирования на борту МИСЗ. Это необходимо для оперативной коррекции градуировочных характеристик. Орбитальная калибровка производится по опорным измерениям излучения открытого космоса и бортовых имитаторов АЧТ. Опыт показал, что для обеспечения надежной градуировки спутникового радиометра, орбитальная коррекция градуировки должна "опираться", как минимум, на два источника - излучения космоса и АЧТ. Абсолютная градуировка только по данным АЧТ недостаточно надежна. [1]

2.ИК-радиометры

2.2 Тактико-технические характеристики прибора «Кельвин»

Инфракрасный радиометр предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. Применяется для контроля теплового режима оборудования, а также для точного измерения температуры в технологических процессах металлургии, машиностроения, нефтехимии и т.д.

Приемник “Кельвин” преобразует энергию ИК-излучения, излучаемую поверхностью объекта, в электрический сигнал. Затем эта информация преобразуется в температурные данные. В “Кельвине” предусмотрена автоматическая компенсация температуры окружающей среды. Цифровая установка излучательной способности объектов обеспечивает точность измерения.

Поле зрения – измеряемый диаметр объекта, с поверхности которого “Кельвин” принимает энергию инфракрасного излучения. Измеряемый диаметр объекта определяется показателем визирования и зависит от расстояния до инфракрасного термометра: $\text{Измеряемый диаметр объекта} = \text{показатель визирования} \times \text{расстояние до объекта}$ Минимальный измеряемый диаметр - наименьший диаметр объекта, который может быть измерен при данном фокусном расстоянии и размере приемника. При увеличении или уменьшении расстояния измеряемый диаметр возрастает. При приближении к объекту вплотную измеряемый диаметр увеличивается до размеров входного зрачка прибора. Индицируемая “Кельвином” температура будет не верна, если размер объекта меньше поля зрения. Так как объект, температура которого должна быть измерена, не заполняет все поле зрения, прибор

принимает излучение от других объектов окружающей среды, которое оказывает влияние на точность измерения.

2.2 ПОРЯДОК РАБОТЫ.

Прибор имеет следующие режимы работы:

- 1) установки излучательной способности материала измеряемой поверхности - основная настройка прибора
- 2) измерения температуры - основной режим
- 3) измерения максимальной температуры - вспомогательный режим
- 4) установки сигнализации превышения порогового (аварийного) значения температуры - вспомогательный режим
- 5) фиксации измеренной температуры, просмотра памяти и запоминания измеренной температуры - вспомогательный режим

Включение и выключение прибора. Прибор включается нажатием кнопки включения, расположенной на ручке. При нажатой кнопке он измеряет температуру, а при отпущенной - фиксирует измеренное значение. Горящий лазерный целеуказатель – признак того, что прибор измеряет температуру. Прибор выключается автоматически, если в течение 8-ми секунд не нажималась ни одна из кнопок. Все установки прибора – значение излучательной способности, выбранный режим работы прибора («Измеряемая температура» - «Максимальная температура»), настройка сигнализации превышения порогового значения температуры, замеры температуры, записанные в ячейки памяти, после отключения питания и при замене элементов питания сохраняются. Кнопка включения нажата - измерение температуры. После включения прибора нажатием и удержанием кнопки включения зажигается лазерный целеуказатель, на цифровом табло в течение 1 секунды индицируется установленная излучательная способность,

после чего на табло начинает выводиться измеряемая прибором температура. Это основной режим работы «Кельвина» - режим «Измеряемая температура». Режим «Максимальная температура» является вспомогательным и используется, например, для облегчения определения максимального значения температуры на неравномерно нагретой поверхности. [2]

2.3 Примеры использования ИК радиометра + ПЭВМ

2.3.1 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.

При проведении поверки должны соблюдаться следующие условия:

- температура окружающей среды +10...+25 °С
- относительная влажность воздуха 50...70%
- атмосферное давление 96...104 кПа.

Перед проведением поверки необходимо прогреть ИК-радиометр в течение 15 минут.

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 2.1

Таблица 2.1

Данные калибровки ИК радиометра

(T_r – данные ИК-радиометра, T_s – контактные измерения)

T_r [C]	$T_s - T_r$ [C]	T_r [C]	$T_s - T_r$ [C]	T_s [C]	$T_s - T_r$ [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

В заключение отметим, что при измерении температуры воды в диапазоне 13...37°C показания ИК-радиометра могут быть занижены по сравнению с образцовым термометром на 0,5 - 1 К из-за образования на поверхности воды холодной "пленки" вследствие потерь тепла с поверхности при испарении воды.

2.3.2 Обработка данных поверки ИК-радиометра

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

- произвести обработку данных поверки;

-на основе результатов проведенной обработки данных поверки разработать алгоритм и методику учета данных поверки для коррекции результатов дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

Обработка данных поверки ИК-радиометра, содержащиеся в цифровом виде в таблице 2.1 , производилась с использованием программы, написанной на языке Visual Basic. Ее текст представлен в таблице 2.2 .

Таблица 2.2

Текст программы, использованной для обработки данных поверки
ИК-радиометра

```
Sub Табл(2.3.2.1)
```

```
MsgBox "Переформатирование таблицы калибровки."
```

```
n = 60
```

```
Dim t() As Double
```

```
ReDim t(n) As Double
```

```
Dim dt() As Double
```

```
ReDim dt(n) As Double
```

```
Лист1.Cells(21, 9) = "Т №1": Лист1.Cells(21, 10) = "Т №2": Лист1.Cells(21, 11)  
= "Т №3"
```

Лист1.Cells(21, 12) = "dT №1": Лист1.Cells(21, 13) = "dT №2": Лист1.Cells(21, 14) = "dT №3"

Лист1.Cells(21, 15) = "Среднее T": Лист1.Cells(21, 16) = "Среднее dT"

'Формирование вектора $t(n)$ и общей колонки температуры от ИК-радиометра

cn = 0

For i = 1 To 5 Step 2

For j = 1 To 20

cn = cn + 1

t(cn) = Лист1.Cells(j, i)

Next j

Next i

For i = 1 To 60

Лист1.Cells(i, 7) = t(i)

Next i

'Формирование вектора $dt(n)$ и общей колонки разности температур: T_r от ИК-радиометра и T_s от контактного измерения

cn = 0

For i = 2 To 6 Step 2

For j = 1 To 20

cn = cn + 1

dt(cn) = Лист1.Cells(j, i)

Next j

Next i

For i = 1 To 60

Лист1.Cells(i, 8) = dt(i)

Next i

'Формирование колонок температуры от ИК-радиометра по 3-ем сериям

For i = 1 To 3

For j = 1 To 20

Лист1.Cells(j, 8 + i) = Лист1.Cells(j + (i - 1) * 20, 7)

Next j

Next i

'Формирование вектора dt(n) и общей колонки разности температур: Tr от ИК-радиометра и Ts от контактного измерения

For i = 1 To 3

For j = 1 To 20

Лист1.Cells(j, 11 + i) = Лист1.Cells(j + (i - 1) * 20, 8)

Next j

Next i

'Формирование колонки осредненной по 3-ем сериям температуры от ИК-радиометра

For j = 1 To 20

Лист1.Cells(j, 15) = 0

For i = 1 To 3


```
Лист1.Cells(j, 15) = Лист1.Cells(j, 15) + Лист1.Cells(j, 8 + i)
```

```
Next i
```

```
Лист1.Cells(j, 15) = Лист1.Cells(j, 15) / 3
```

```
Next j
```

'Формирование колонки осредненной по 3-ем сериям разности температур:
Tr от ИК-радиометра и Ts от контактного измерения

```
For j = 1 To 20
```

```
Лист1.Cells(j, 16) = 0
```

```
For i = 1 To 3
```

```
Лист1.Cells(j, 16) = Лист1.Cells(j, 16) + Лист1.Cells(j, 11 + i)
```

```
Next i
```

```
Лист1.Cells(j, 16) = Лист1.Cells(j, 16) / 3
```

```
Next j
```

```
End Sub
```

На рис. 2.1 представлен Лист 1 файла текстового процессора Excel после выполнения программы из таблицы 2.2 .

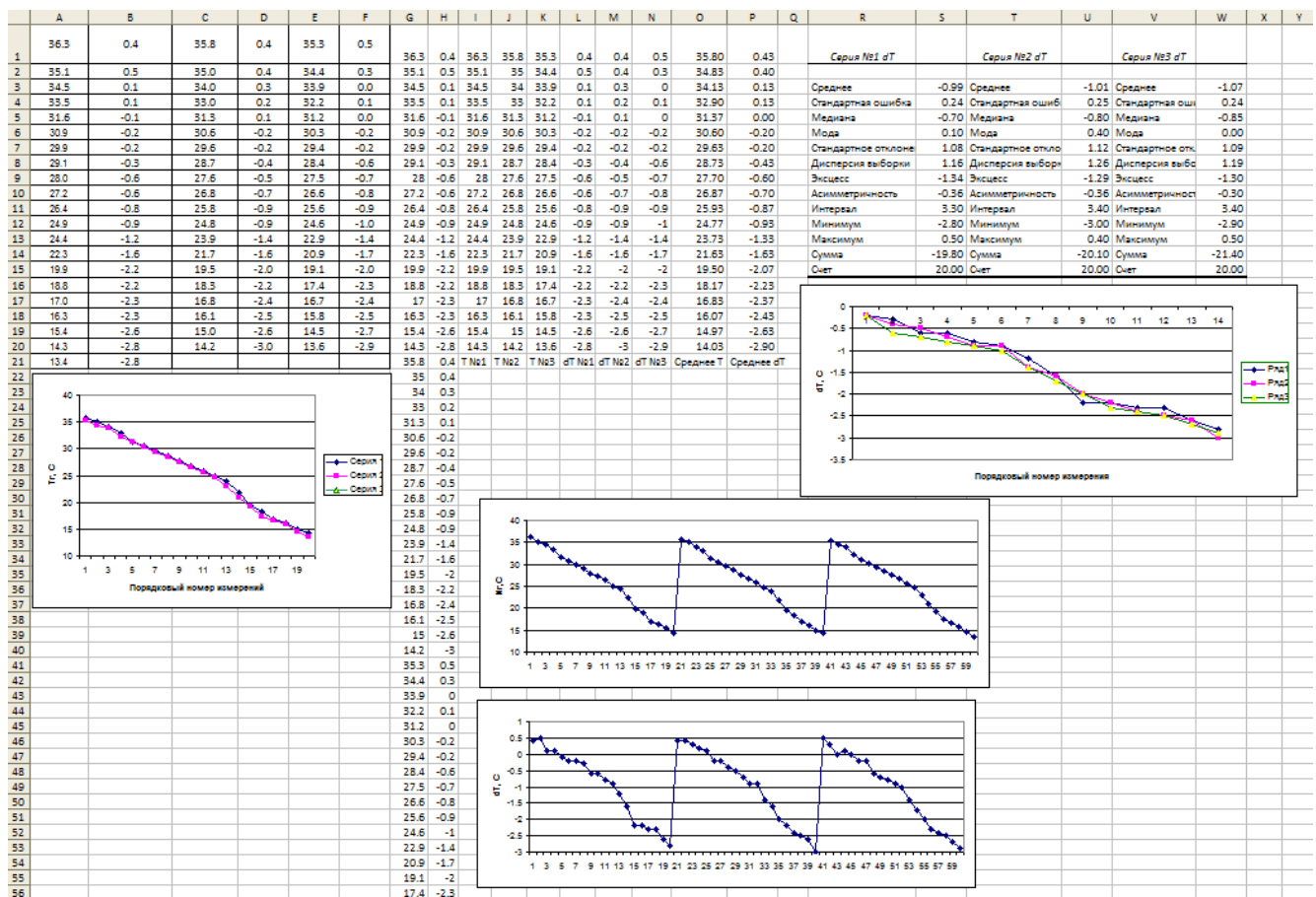
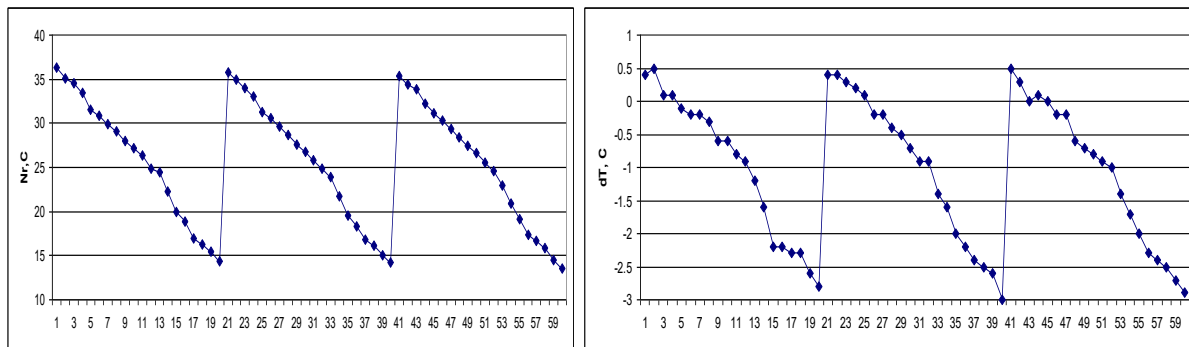


Рис.2.1 Общий вид Листа 1 после выполнения программы обработки данных поверки ИК-радиометра

В колонках «А» - «F» содержатся данные, перенесенные из исходной таблицы 2.1 Колонки «G» и «H» содержат по отдельности данные измерений ИК-радиометром и отклонения этих измерений от контактных соответственно. На рис. 2.2 эти данные представлены в виде двух графиков.

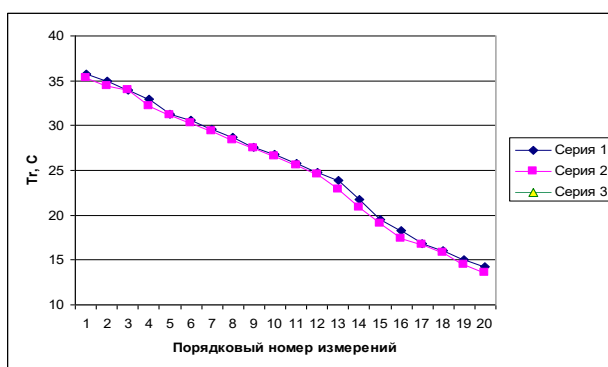


а)

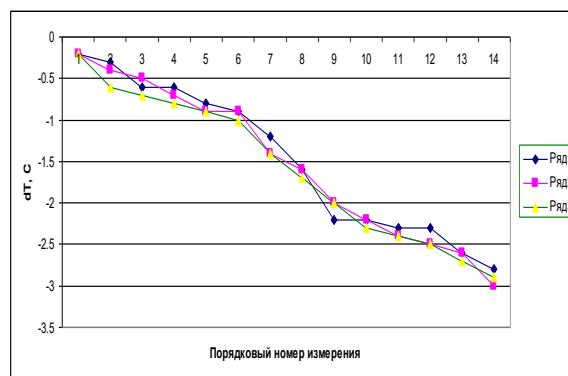
б)

Рис.2.2 Графическое представление трех серий данных, полученных при поверки ИК-радиометра: а) – это T_r , б) – это $T_s - T_r$

Следующие 6 колонок содержат отсортированные по 3-м сериям данные: колонки «L» - «K» - это значения T_r , колонки «L» - «N» - это значения $T_s - T_r$ (см. рис. 2.1). По этим данным были рассчитаны средние значения T_r (колонка «O») и $T_s - T_r$ (колонка «P»).



а)



б)

Рис.2.3 Совместное представление трех серий данных, полученных при поверки ИК-радиометра: а) – это T_r , б) – это $T_s - T_r$

Следующим этапом обработки данных поверки был построение аппроксимационного полинома для осредненных значений $T_s - T_r$, график которых представлен на рис. 2.3 . Для оценки оптимальной степени такого полинома на рис. 2.4 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 T_r близка к линейной: для полинома первой степени $R^2 = 0.9726$, что очень близко к 1. На этом основании можно сделать вывод, что для аппроксимации зависимости dT от T_r вполне можно ограничиться полиномом второй степени (в этом случае $R^2 = 9.9882$).

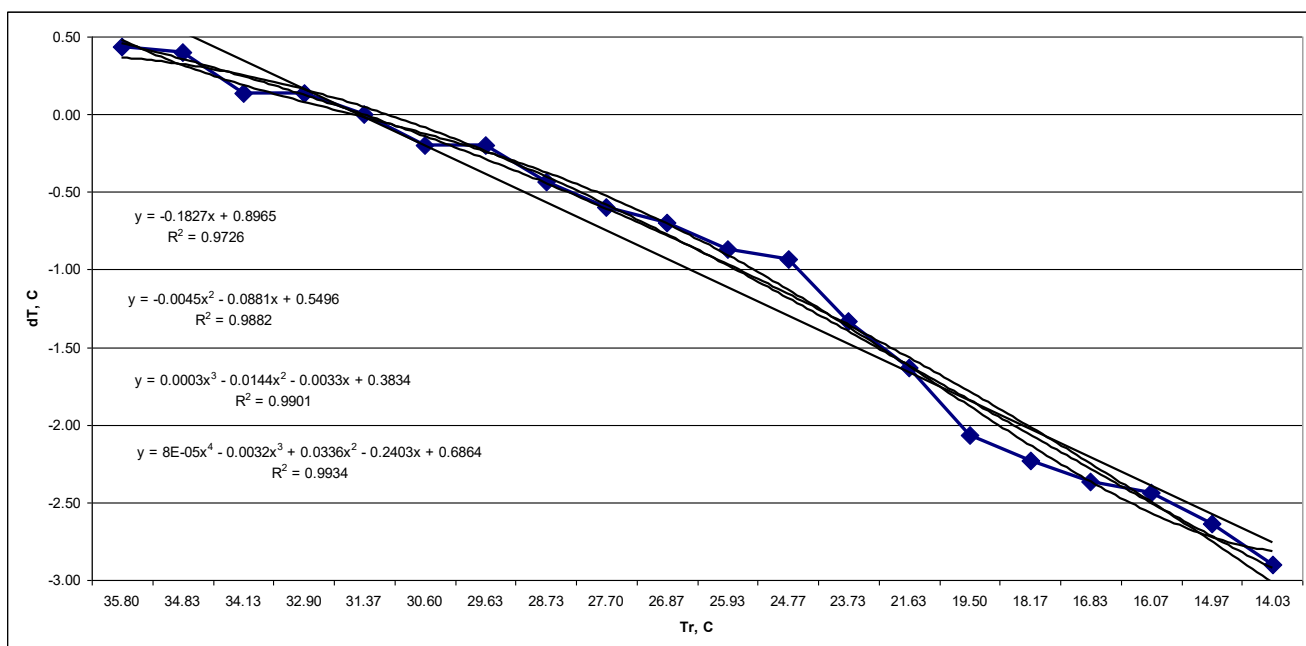


Рис. 2.4 Зависимость поправки dT от показаний ИК-радиометра Tr

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

$$T_s = Tr + dT(Tr),$$

где Tr – показание ИК-радиометра, а $dT(Tr)$ – соответствующая этому показанию поправка, найденная на основе аппроксимации данных рис. 2.3. Предварительный анализ показал, что для такой аппроксимации достаточно рассчитать коэффициенты a , b и c аппроксимационного полинома второй степени:

$$dT(Tr) = a \cdot Tr^2 + b \cdot Tr + c.$$

Полученные с использованием стандартных средств табличного процессора Excel коэффициенты

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

не могут быть использованы для коррекции показаний ИК-радиометра, так как они предполагают использование порядкового номера в значении dT , а не показания радиометра. 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 программа, результаты которой мы видим на рисунке 2.5

	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 АПРОКСИМИРУЮЩЕГО 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	козф.	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. 2.5 Результаты расчета коэффициентов аппроксимационного полинома $dT(Tr)$

Результаты расчета коэффициентов аппроксимационного полинома второй степени иллюстрирует рис. 2.5 . В колонках «А» и «В» содержатся соответственно осредненные значения T_r и $dT(T_r)$ соответственно. Значения коэффициентов представлены в колонке «G»:

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

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. 2.6 приведено сравнение полученных результатов.

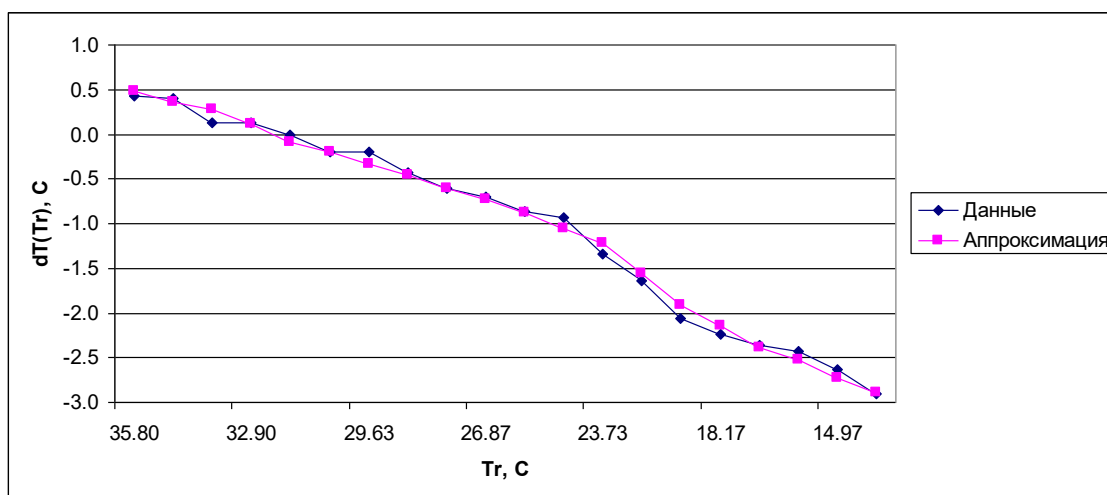


Рис. 2.6 Сравнение исходных данных и результатов аппроксимации

Таблица 2.3

Текст программы коррекции показаний ИК-радиометра

Sub Кор()

```
MsgBox "Коррекция по калибровке."
```

```
Коэффициенты полинома
```

```
a = -0.0015: b = 0.2304: c = -5.8344
```

```
tr = CDBl(InputBox("Введите показания ИК-радиометра Tr [C]"))
```

```
dt = a * tr ^ 2 + b * tr + c
```

```
ts = tr + dt
```

```
Лист1.Cells(1, 1) = "Tr [C]": Лист1.Cells(1, 2) = "Ts [C]"
```

```
Лист1.Cells(1, 3) = "dT(Tr) [C]"
```

```
Лист1.Cells(2, 1) = tr: Лист1.Cells(2, 2) = ts
```

```
Лист1.Cells(2, 3) = dt
```

```
End Sub
```

На рис. 2.7 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. 2.7 Пример результатов работы программы коррекции показаний ИК-радиометра.

3. Определение параметров подстилающей поверхности с помощью ИК-радиометра.

3.1 Определение излучательной способности.

Во всех телах, температура которых выше 0°C протекает естественный процесс – хаотическое движение молекул. Когда происходит их столкновение – происходит также и изменение их энергетического состояния, в результате чего испускается электромагнитное тепловое излучение. Тепловое излучение является электромагнитным излучением, оно включает в себя видимое излучение (свет) и инфракрасное излучение, которое не способен видеть человеческий глаз. Тепловое излучение от очень горячих предметов легко видно глазу.

Для изучения закономерностей теплового излучения учёными в 20 веке была придумана модель – абсолютно чёрное тело, - тело, которое при любой температуре и длине волны поглощает всё падающее на него излучение. Абсолютно чёрным телом является солнце, кроме него нет других таких тел, все остальные называются «серыми» телами. Понятие абсолютно чёрного тела используется для сравнения тепловых свойств всех реальных, «серых» тел. Способность «серого» тела излучать энергию и сравнение радиационных характеристик абсолютно чёрного и «серого» тела устанавливает такая характеристика, как излучательная способность тела.

Излучательная способность тела – это отношение потока энергии, излучаемого «серым» телом к потоку энергии, излучаемого абсолютно чёрным телом. При этом температура двух тел одинакова. Для абсолютно чёрного тела излучательная способность равна единице, а для реальных тел она меняется от 0 до 1. Абсолютно чёрное тело поглощает всю энергию, а «серое» - только часть энергии с любой длиной волны.

Излучательная способность тела или объекта зависит от некоторых его физических характеристик. Два объекта с одинаковой температурой, но при этом различаясь цветами имеют разную излучательную способность. То тело, которое темнее, будет поглощать большее количество энергии, а светлое тело отражает большинство энергии. Увлажненность поверхности объекта тоже влияет на излучательную способность тела. Чем больше влаги, тем более близкую излучательную способность имеет объект к излучательной способности воды. Вода очень хорошо поглощает энергию. Более рыхлые объекты, по сравнению со спрессованными, поглощают меньше энергии. Разные объекты излучают с разной длиной волны. Угол обзора, под которым фиксируется объект, так же влияет на излучательную способность. Таким образом, при одинаковой температуре излучательная способность двух разных тел может быть разной и при разных условиях регистрирования излучательная способность одного и того же тела может различаться. Все эти факторы не позволяют определять температуру тел напрямую по спутниковым снимкам.

Зависимость излучательной способности от температуры и длины волны описывается законом Планка, который был сформулирован в 1900 году. Электромагнитная энергия испускается и поглощается не непрерывно, а отдельными порциями (квантами) с разными длинами волн при одной и той же температуре.

$$E_{\lambda,T} = \frac{c_1 * \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda * T} - 1}, \text{ где}$$

C_1 – постоянная, $=3,7418 * 10^{-6}$ Вт*м²

C_2 – постоянная, $=0,014387$ м*К

λ — длина волны,

T — температура.

При повышении температуры объекта увеличивается частота излучения, испускаемого объектом. К примеру, объект, нагретый до красного цвета излучает больше в длинноволновой части видимого участка спектра, поэтому и выглядит красным. Чем сильнее нагревается объект, тем более основная частота излучения смещается к середине видимого участка спектра, и частота, с которой излучает объект, заставляет видеть объект белым. Зависимость длины волны, соответствующей основной частоте испускаемого излучения, то есть максимальному излучению, от абсолютной температуры, описывается законом смещения Вина.

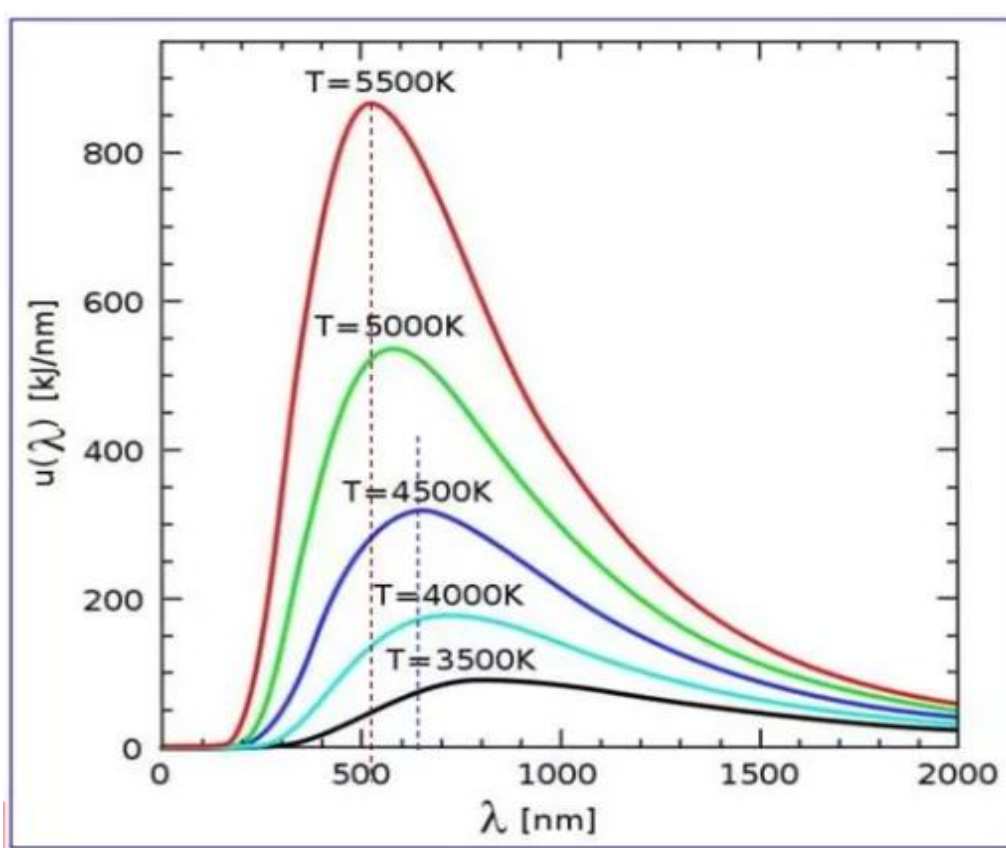


Рис. 3.1 Закон смещения Вина

На Рис.3.1 значение максимума для каждой кривой перемещается влево в область коротких волн с повышением температуры. Нахождение преобладающей длины волны даёт ценную информацию о том диапазоне

тепловой инфракрасной части спектра, которую следует использовать для изучения нужного объекта. Длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \text{ где}$$

$b=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

Общее количество излучения всех частот увеличивается очень быстро при повышении температуры. Энергия спектрального излучения, испускаемого единицей поверхности АЧТ, пропорциональна четвертой степени его температуры. Эта закономерность носит название закона Стефана-Больцмана:

$$P = \varepsilon \sigma T^4, \text{ где}$$

σ – постоянная Больцмана, $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4 \cdot \text{с})$

T - абсолютная температура,

ε - излучательная способность.

Таким образом, в соответствии с законом Стефана-Больцмана, в реальных условиях, различия в излучении объектов земной поверхности связаны с различиями в значениях не только их температуры, но и излучательной способности. Поэтому, при работе с данными дистанционного зондирования в тепловом инфракрасном диапазоне, говорят не о температурных, а о тепловых, или радиационных контрастах. Соотношение между поглощательной и излучательной способностью объектов описывает закон Кирхгофа. Г. Кирхгоф доказал, что отношение

излучательной и поглощательной способностей не зависит от природы тела и является для всех тел одной и той же функцией частоты (длины волны) излучения и температуры: согласно закону излучения Кирхгофа, тело, которое при данной температуре сильнее поглощает, должно интенсивнее излучать. [3]

Определение значения излучательной способности подстилающей поверхности

Спектральная интенсивность собственного теплового излучения подстилающей поверхности при использовании ряда упрощающих предположений определяется следующим соотношением:

$$J_{\nu}^{\uparrow} = \varepsilon_{\nu} \cdot B_{\nu}(T_s)$$

где T - температура подстилающей поверхности;

B - функция Планка;

ε_{ν} - излучательная способность подстилающей поверхности:

$$\varepsilon_{\nu} \in (0,1).$$

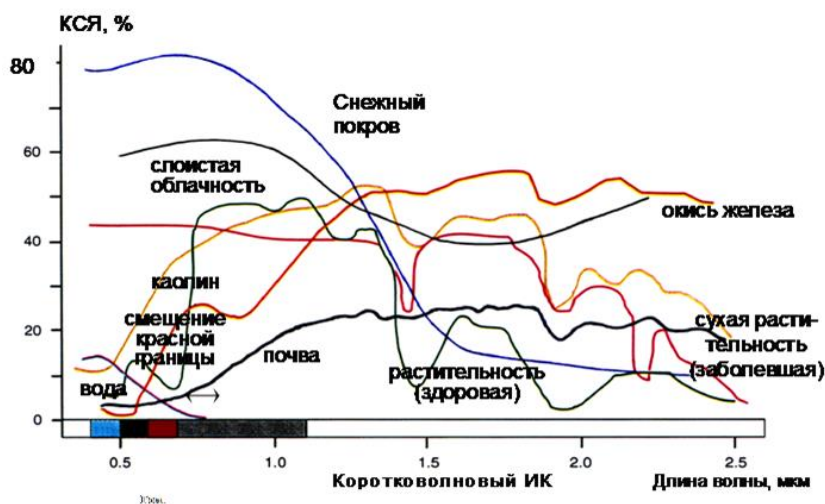


Рис.3.2 Изменчивость излучательной способности естественных поверхностей (относительные единицы)

Спектральная яркость АЧТ в вакууме является функцией только двух переменных: абсолютной температуры АЧТ T и волнового числа

$$B_{\nu}(T) = \frac{a \cdot \nu^3}{\exp\left(b \cdot \frac{\nu}{T}\right) - 1}$$

где $\nu = 10\,000 / \lambda$ [см⁻¹] - волновое число (λ - длина волны [мкм]);

T - абсолютная температура АЧТ, [К];

$a = 1.19105 \cdot 10^{-4}$, [эрг / (см² · с · ср · см⁻¹) / (см⁻¹)³];

$b = 1.43874$ [К/см⁻¹].

Решая уравнение 1 относительно $\varepsilon\nu$, получаем

$$\varepsilon_v = B_v(T_s) / J_v^\uparrow$$

Следовательно, для определения значения излучательной способности необходимо измерить интенсивность собственного теплового излучения подстилающей поверхности и, независимо, температуру этой поверхности.

Однако такая методика определения значения излучательной способности подстилающей поверхности возможна при наличии ИК-радиометра, регистрирующего интенсивность собственного теплового излучения подстилающей поверхности. В том случае, когда для определения излучательной способности подстилающей поверхности дистанционный регистратор температуры подстилающей поверхности, методика определения излучательной способности несколько усложняется. Это связано с тем, что дистанционный регистратор температуры требует априорной установки значения излучательной способности, которую обозначим как ε_0 . Если такое значение излучательной способности установлено, то показание дистанционного регистратора температуры T_0 связано с интенсивностью собственного теплового излучения подстилающей поверхности следующим соотношением

$$J_v^\uparrow = \varepsilon_0 \cdot B_v(T_0)$$

Подставляя полученное значение интенсивности собственного теплового излучения подстилающей поверхности в предыдущую формулу, получаем:

$$\varepsilon_v = B_v(T_s) / [\varepsilon_0 \cdot B_v(T_0)]$$

Программа для расчета излучательной способности

Sub epsilon()

MsgBox ("Расчет излучательной способности подстилающей поверхности")

Tn = CDb1(InputBox("Введите показание ИК-термометра [C]"))

en = CDb1(InputBox("Введите установленное на ИК-термометре эpsilon"))

Ts = CDb1(InputBox("Введите контактно измеренное значение Ts [C]"))

Лист1.Cells(1, 1) = "Показание "

Лист1.Cells(2, 1) = "ИК-термометра [C]=>"

Лист1.Cells(2, 2) = Tn

Лист1.Cells(4, 1) = "Значение"

Лист1.Cells(5, 1) = "эpsilon"

Лист1.Cells(6, 1) = "на ИК-термометре =>"

Лист1.Cells(6, 2) = en

Лист1.Cells(8, 1) = "Контактно"

Лист1.Cells(9, 1) = "измеренное"

Лист1.Cells(10, 1) = "Ts [C]=>"

Лист1.Cells(10, 2) = Ts

Tn = Tn + 273.15

Ts = Ts + 273.15

Vn = 10000 / 10

a = 0.000011909 * Vn ^ 3 / (1.4388 * Vn / Ts - 1)

b = 0.000011909 * Vn ^ 3 / (1.4388 * Vn / Tn - 1)

e = a / (en * b)

Лист1.Cells(12, 1) = "epsilon"

Лист1.Cells(13, 1) = "поверхности =>"

Лист1.Cells(13, 2) = e

Лист1.Cells(15, 1) = "Дата: месяц, число, год =>"

Лист1.Cells(16, 1) = "Время =>"

Лист1.Cells(15, 2) = Date\$

Лист1.Cells(16, 2) = Time\$

End Sub

	A	B	
1	Показание		
2	ИК-термометра [C]=>	24.0	
3			
4	Значение		
5	эпсилон		
6	на ИК-термометре =>	0.987	
7			
8	Контактно		
9	измеренное		
10	Ts [C]=>	20.0	
11			
12	epsilon		
13	поверхности =>	0.99604	
14			
15	Дата: месяц, число, год =>	30.05.2020	
16	Время =>	1:27:07	
17			

Рис. 3.3 Пример расчёта

3.2 Измерение температуры

3.2.1 Оценка случайной составляющей погрешности дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности.

Для оценка величины случайной составляющей был проведен следующий эксперимент. В качестве подстилающей поверхности использовалась кювета с водой. Температура поверхности измерялась с помощью ИК-радиометра, данные измерений представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Данные измерений температуры подстилающей поверхности

Номер измерений	Показания ИК-радиометра, °C	Номер измерений	Показания ИК-радиометра, °C
1	23,0	23	23,1
2	23,1	24	23,1
3	23,1	25	23,0
4	23,2	26	23,0
5	23,2	27	23,2
6	23,0	28	23,1
7	23,1	29	23,2
8	23,1	30	23,0
9	23,2	31	23,1
10	23,1	32	23,2

11	22,9	33	23,2
12	23,1	34	23,1
13	23,1	35	23,1
14	23,0	36	23,1
15	23,2	37	23,0
16	23,1	37	23,2
17	23,1	39	23,1
18	23,1	40	23,1
19	23,1	41	23,1
20	23,0	42	23,1
21	23,1	43	23,1
22	23,1	44	23,1

Затем проводился расчет статистических характеристик отклонения измеренной ИК-радиометром от среднего значения температуры поверхности. Для этого имеющиеся в таблице данные были конвертированы в формат «.txt» (см. табл.3.2), а затем с использованием стандартных средств табличного процессора Excel - в формат «.xls» (см. табл.3.3). В последнем случае, с учетом настройки ПЭВМ, разделитель целой и дробной части в виде запятой был заменен на точку.

Таблица 3.2.

Фрагмент данных измерений температуры подстилающей поверхности
в формате «.txt»

1	23,0	23	23,1
2	23,1	24	23,1
3	23,1	25	23,0
4	23,2	26	23,0
5	23,2	27	23,2

Таблица 3.3

Фрагмент данных измерений температуры подстилающей поверхности
в формате «.xls»

	A	B	C	D
1	1	23	23	23.10
2	2	23.1	24	23.10
3	3	23.1	25	23.00
4	4	23.2	26	23.00
5	5	23.2	27	23.20

Полученные данные представлены в табл. 3.4 (статистические характеристики) и на рис.3. 3 (гистограмма).

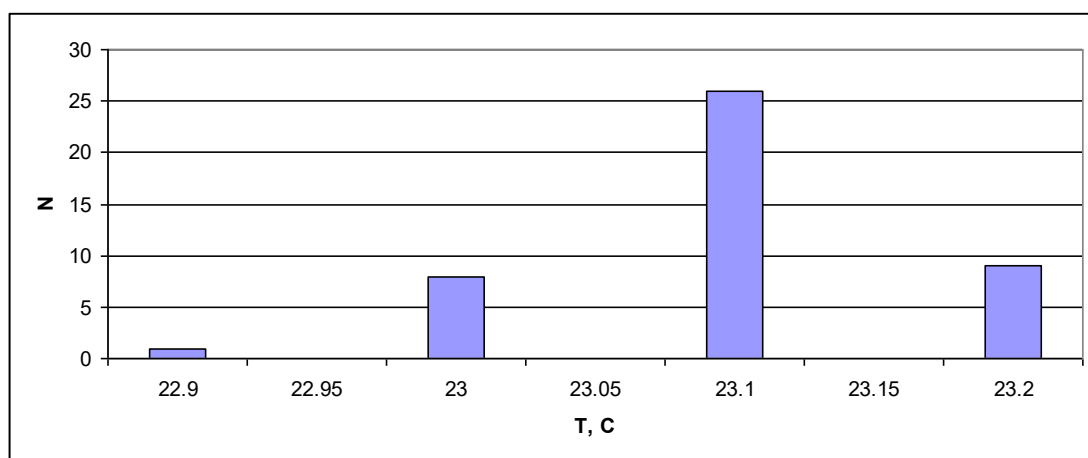


Рис. 3.3. Гистограмма распределения значений температуры подстилающей поверхности, измеренной ИК-радиометром

Таблица 3.4.

Статистические характеристики измерений температуры подстилающей поверхности

Среднее	23.1
Стандартная ошибка	0.011
Медиана	23.1
Мода	23.1
Стандартное	0.0698

отклонение

Дисперсия

выборки 0.0048

Эксцесс 0.4223

Асимметричность -0.398

Интервал 0.3

Минимум 22.9

Максимум 23.2



Рис. 3.4. Значения температуры подстилающей поверхности, измеренной ИК-радиометром, в отклонениях от средней температуры

Таблица 3.5

Статистические характеристики отклонений измерений температуры подстилающей поверхности от среднего значения

Среднее	-0.00227
Стандартная ошибка	0.01052
Медиана	0
Мода	0
Стандартное отклонение	0.06984
Дисперсия выборки	0.00487
Экцесс	0.42235
Асимметричность	-0.39820
Интервал	0.3
Минимум	-0.2
Максимум	0.1

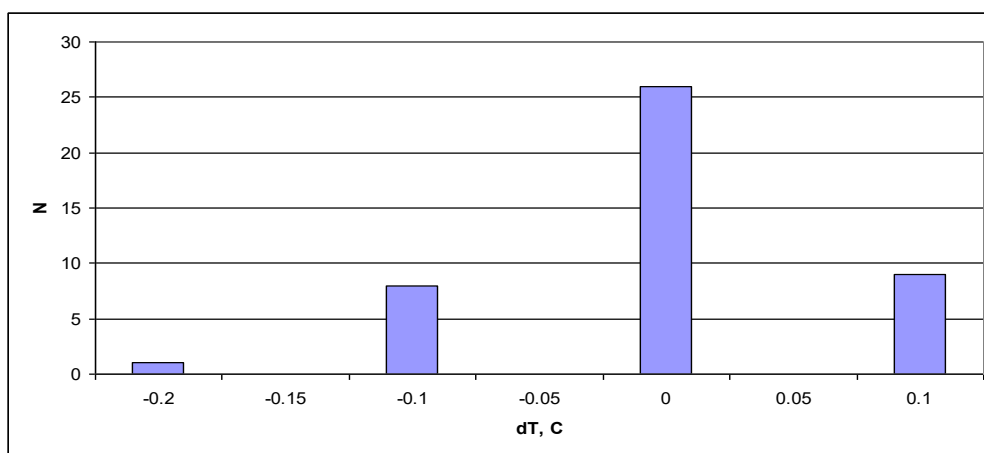


Рис. 3.5. Гистограмма распределения значений измеренной ИК-радиометром температуры подстилающей поверхности в отклонениях от среднего

Анализ этих данных показывает, что случайная составляющая погрешности дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности Ик радиометром имеет распределения, близкое к нормальному, со практически нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением, равным около $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом у распределения есть небольшой сдвиг в область больших значений отклонений от среднего: асимметричность равна -0.4 .

На рис. 3.6 представлен фрагмент Листа 1 табличного процессора Excel с результатами расчетов при оценке случайной составляющей погрешности дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности. При этом для формирования значений отклонений дистанционно измеренной температуры от среднего значения в колонке «В» Листа 1 использовалась программа, представленная в таблице 3.6

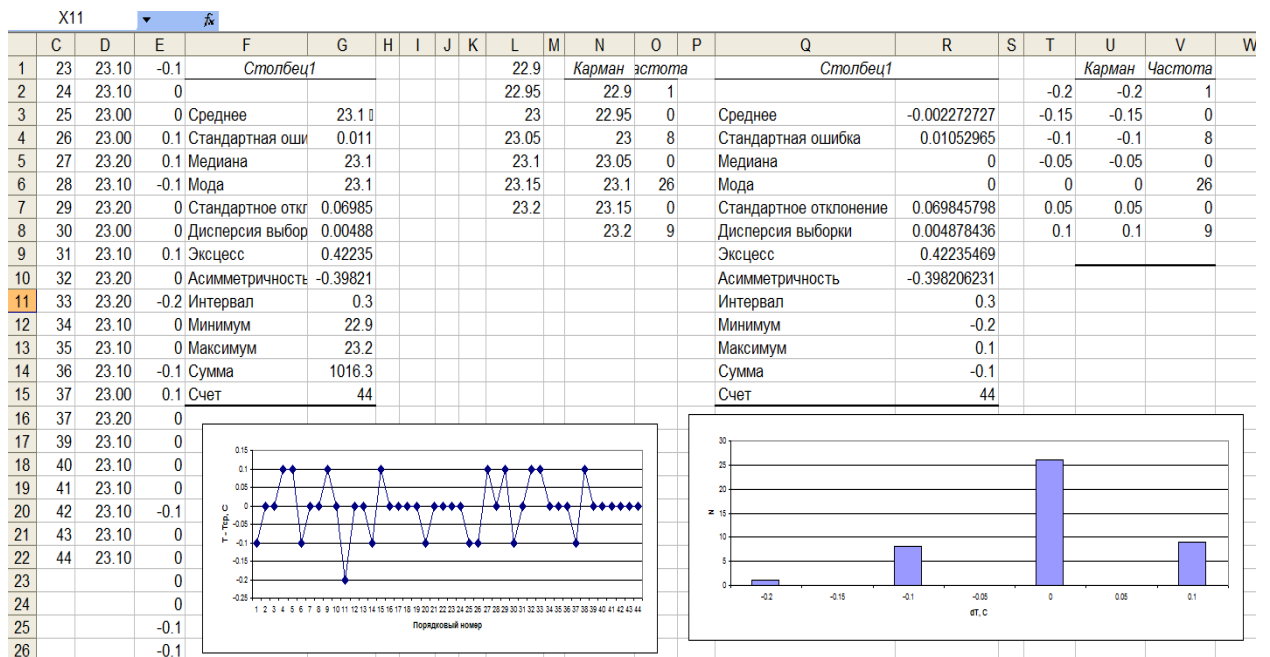


Рис. 3.6. Фрагмент Листа 1 табличного процессора Excel с результатами расчетов при оценке случайной составляющей погрешности измерения температуры подстилающей поверхности

Таблица 3.6.

Текст вспомогательной программы для формирования отклонений дистанционно измеренной температуры от среднего значения

```
Sub CHO()
```

```
For i = 1 To 44
```


Лист1.Cells(i, 2) = Лист1.Cells(i, 1) - 23.1

Next i

End Sub

3.2.2 Оценка доверительных интервалов для среднего арифметического значения и для дисперсии.

Доверительный интервал – это тот интервал, который покрывает неизвестный параметр с заданной надёжностью. Для того, чтобы определить доверительный интервал для выборочного среднего арифметического значения при неизвестной дисперсии генеральной совокупности, но при известной ее оценке по данным имеющейся выборки $\hat{\sigma}^2$, необходимо найти критическое значение критерия Стьюдента, которое можно вычислить в табличном процессоре «Excel», используя статистическую функцию «СТЮДРАСПОБР»:

$$= \text{СТЮДРАСПОБР} (1-\alpha, N-1)$$

где α - уровень значимости, N – длина временного ряда.

Проведём расчёт критерия Стьюдента для имеющегося ряда.

$$=\text{СТЮДРАСПОБР}(0,01;43)= 2.695102$$

Далее необходимо вычислить значение $t_{\text{кр}}$, с помощью которого определяется доверительный интервал:

$$\Delta x = t_{\text{кр}} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

где σ – стандартное (среднее квадратическое) отклонение временного ряда; N – количество значений временного ряда.

$$\Delta x = 2.695102 * \frac{0.01052}{\sqrt{44}} = 0.004274$$

Собственно доверительный интервал для математического ожидания определяется с помощью следующего выражения:

$$(X_{\text{cp}} - \Delta x) < X_{\text{cp}} < (X_{\text{cp}} + \Delta x)$$

где X_{cp} – среднее значение выборки.

Тогда доверительные границы для интервала, заключающего истинное значение измеряемой величины, можно найти как

$$23.057 < 23.1 < 23.143$$

Смысл полученного результата при $\alpha = 0.99$: если провести большое количество независимых экспериментов с аналогичным построением доверительного интервала, то в 99% экспериментов доверительный интервал будет содержать оцениваемый параметр, а в оставшемся 1% экспериментов доверительный интервал не будет содержать этот параметр.

Оценка и расчёт доверительных интервалов для дисперсии.

Доверительный интервал для дисперсии временного ряда находится по следующей формуле:

$$D \cdot \Delta D_1 \prec D \prec D \cdot \Delta D_2$$

Где

$$\Delta D_1 = \frac{N - 1}{\chi_1^2}$$

$$\Delta D_2 = \frac{N - 1}{\chi_2^2}$$

В приведенных выражениях χ_1^2 и χ_2^2 - это значения критерия Пирсона.

Критерий Пирсона χ_1^2 определяется по уровню значимости α и числу степеней свободы ($N - 1$).

Критерий Пирсона χ_2^2 определяется по уровню значимости $(1 - \alpha)$ и числу степеней свободы ($N - 1$).

Значение критерия Пирсона можно вычислить с помощью статистической функции «ХИ2ОБР» в Excel.

При этом если задан уровень значимости α и N – длина временного ряда, то в указанной функции необходимо задавать следующие параметры:

= ХИ2ОБР

($1 - \alpha$, $N - 1$)

$$\chi_1^2(\alpha = 0.95, N = 44) = \text{ХИ2ОБР}(0.05; 43) = 59.30351$$

$$\chi_2^2(\alpha = 0.05, N = 44) = \text{ХИ2ОБР}(0.95, 43) = 28.96472$$

$$\Delta D_1 = \frac{43}{59.30351} = 0.725$$

$$\Delta D_2 = \frac{43}{28.96472} = 1.485$$

Тогда доверительные границы для интервала, заключающего истинное значение дисперсии с точностью 95% , можно найти так:

$$0,00353 < 0,00487 < 0,00723$$

Заключение.

Целью работы было изучить возможности ИК-радиометра «Кельвин».

В ходе работы была проведена калибровка ИК радиометра методом сравнения показаний ИК радиометра с показаниями эталонного термометра. Результаты поверки обрабатывались с помощью программы, в результате чего были получены скорректированные показания ИК-радиометра. Далее был изучен метод измерения и вычисления излучательной способности с помощью ИК-радиометра, были проведены расчёты этой характеристики с помощью программы.

Далее была проведена оценка случайной составляющей погрешности дистанционного измерения температуры подстилающей поверхности, а также оценка доверительных интервалов для среднего арифметического значения и для дисперсии.

Список литературы

1. <http://meteovlab.meteorf.ru/> : «Виртуальная лаборатория дистанционного обучения спутниковой гидрометеорологии» «Средства измерения» - Космические системы и Спектральные диапазоны.
2. Руководство по эксплуатации на инфракрасный термометр «КЕЛЬВИН» ТМ ЗАО «Евромикс» Москва WWW.ZAOEUROMIX.RU
3. http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/materials/heat_img/files/1/fizicheskie_osnovy.htm