

**Тепловизионная
диагностика
электротехнического
оборудования**

The Power
Of A Workstation
In The Palm Of Your Hand

Введение

- ✓ *Диагностика* - учение о способах диагноза, установление диагноза.
- ✓ *Диагностировать* - устанавливать техническое состояние машин, механизмов.

Техническая диагностика

- Установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в устройствах их узлах, элементах и т.д. для предсказания возможных отклонений в режимах их работы (состояниях), а также разработка методов и средств обнаружения и локализации дефектов в технических системах.
- Техническая диагностика осуществляется либо, например, внешним осмотром, либо при помощи диагностической аппаратуры или диагностических программ. Одно из важных средств обеспечения и поддержания надежности технических объектов.

Тепловизионная диагностика

Наличие некоторых видов дефектов высоковольтного оборудования вызывает изменение температуры этих элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного (ИК) излучения, которое может быть зарегистрировано

ТЕПЛОВИЗОРАМИ

Диагностируемое оборудование

- Все типы контактных соединений ошиновки ОРУ, присоединений к линейным выводам аппаратов, разъемные контактные соединения разъединителей, внутренние контактные соединения камер воздушных и маломасляных выключателей, трансформаторов тока;
- Изоляторы экранированных токопроводов генераторного напряжения, шинных мостов автотрансформаторов и трансформаторов, опорные металлические конструкции шинных мостов;
- подвесные и опорные фарфоровые изоляторы;
- баки, вводы и системы охлаждения силовых трансформаторов;
- вводы масляных выключателей и проходные вводы;
- вентильные разрядники и ОПН;
- измерительные трансформаторы тока;
- измерительные трансформаторы напряжения - электромагнитные и емкостные;
- конденсаторы связи;

Теория ИК излучения

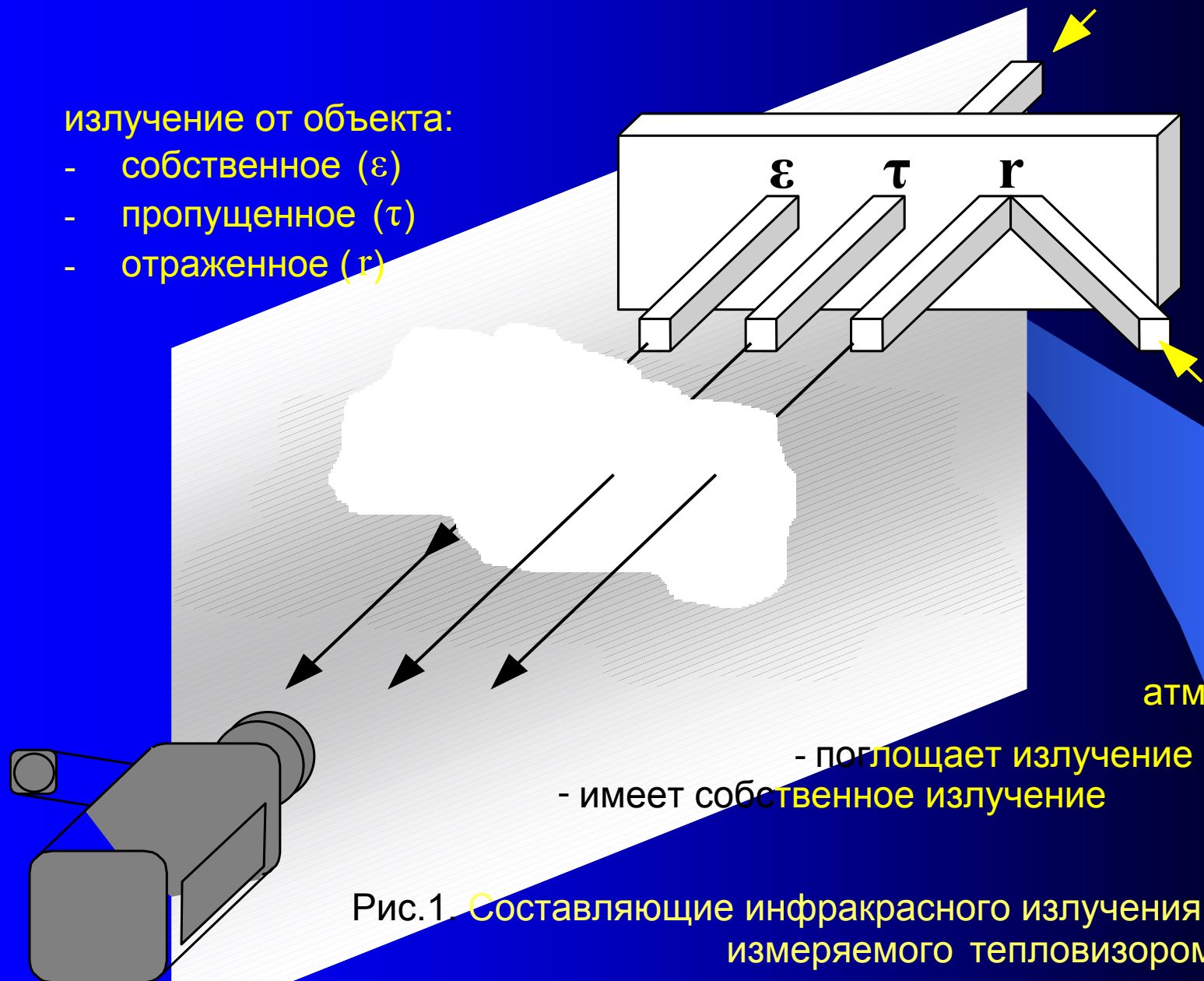
ИК излучение является частью оптического излучения и занимает в спектре электромагнитных колебаний диапазон от 0,76 до 1000 мкм.

ИК область спектра принято делить на четыре части :

- среднюю $\lambda = 3 \dots 6$ мкм
- дальнюю $\lambda = 6 \dots 15$ мкм
- очень далекую $\lambda = 15 \dots 1000$ мкм

излучение от объекта:

- собственное (ε)
- пропущенное (τ)
- отраженное (r)



атмосфера:

- поглощает излучение от объекта
- имеет собственное излучение

Рис.1. Составляющие инфракрасного излучения, измеряемого тепловизором

. Согласно закону смещения Вина, длина волны в спектре излучения, соответствующая максимуму плотности потока, обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$\lambda = \frac{2898}{T}, \text{ мкм} \quad (1)$$

Суммарную плотность излучения АЧТ, т.е. плотность излучения в диапазоне длин волн от 0 до ∞ , определяют по закону Стефана-Больцмана:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (2)$$

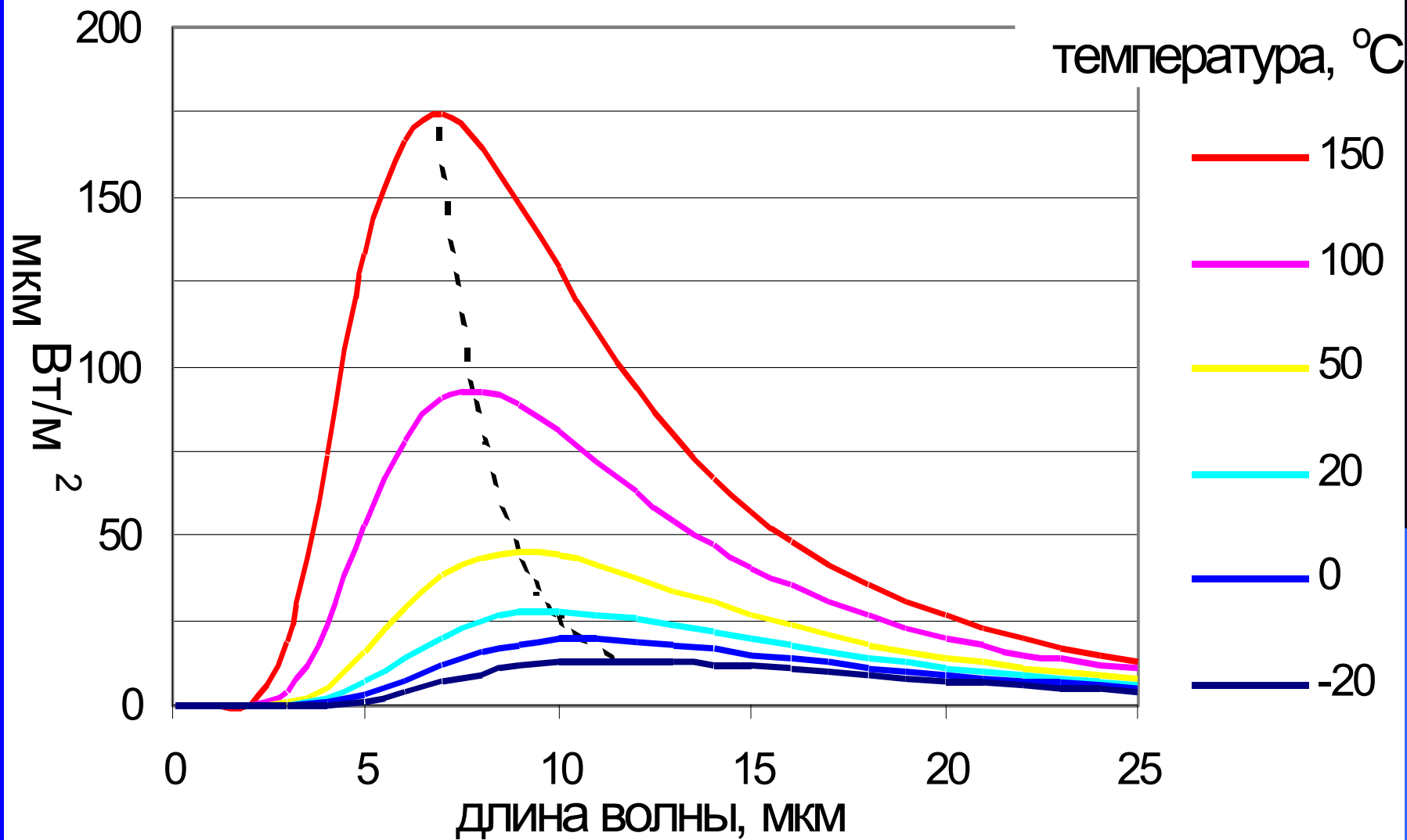
где **R** - Плотность излучения, Вт/м²;

T - температура АЧТ, °К

σ = $(5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12}$ Вт / (см² · К⁴)

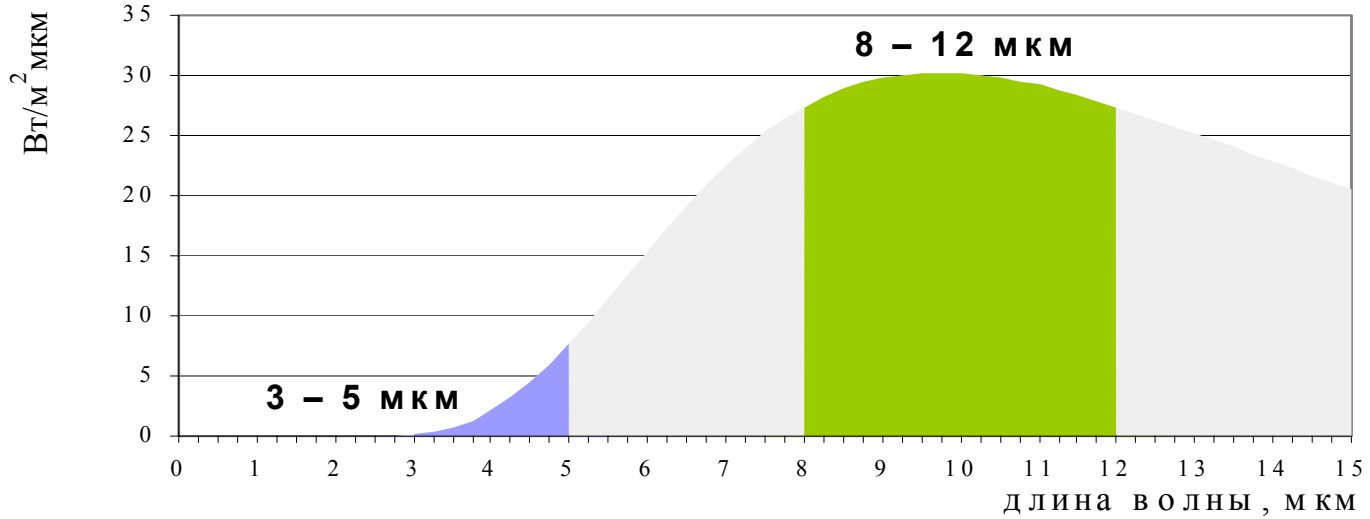
В инженерных расчетах принимают

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · К⁴) = $(5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12}$ Вт / (см² · К⁴)



Распределение излучения по длинам волн в зависимости от температуры АЧТ

Плотность излучения АЧТ при температуре 25 °С



Плотность излучения АЧТ при температуре 750 °С

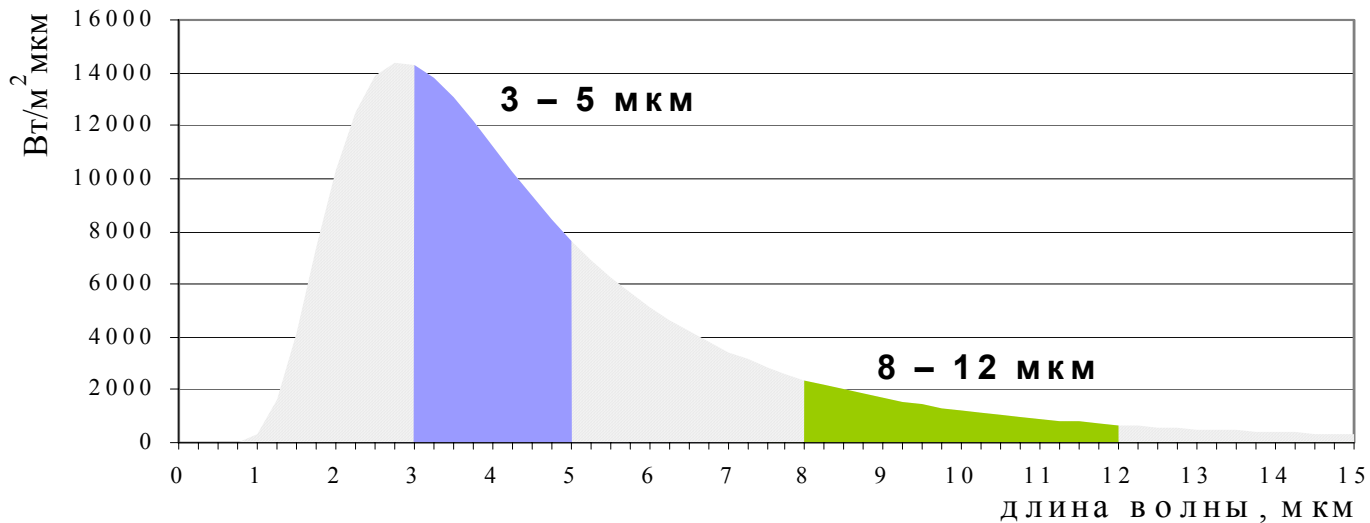


Рис.3. Распределение энергии ИК излучения по диапазонам чувствительности тепловизоров при температуре АЧТ 25 и 750 °С.

Материал	Температура, °С	ϵ_T
Алюминий полированный	50...500	0,04...0,06
-"- с шероховатой поверхностью	20...50	0,06...0,07
-"- сильно окисленный	150...500	0,2...0,25
Медь полированная	50...100	0,02
-"- окисленная	50	0,06...0,7
-"- покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
Сталь блестящая листовая	25	0,82
-"- с шероховатой плоской поверхностью	50	0,95...0,98
-"- ржавая, красная	20	0,69
-"- оцинкованная	20	0,28
-"- окисленная шероховатая	40...370	0,94...0,97
Чугун шероховатый, сильно окисленный	40...250	0,95
Краски масляные разных цветов	100	0,92...0,96
Лак черный, блестящий, распыленный на железо	25	0,88
-"- алюминиевый, на шероховатой поверхности	20	0,39
Стекло	22...100	0,94...0,91
Фарфор белый, блестящий	0,7...0,75
-"- глазурированный	22	0,92
Бетон	20	0,92

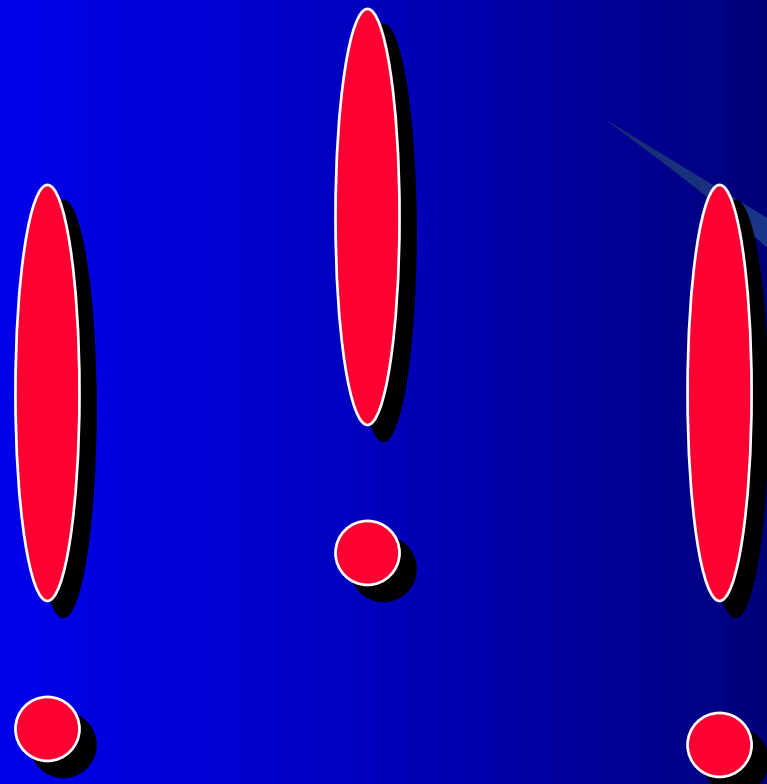


Вводы 110 кВ АТ-2.

Температура расширителя ввода фазы А отличается от соседних на $\Delta T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Разница в температуре вызвана разным состоянием поверхности головок вводов (поверхность расширителя ввода фазы С покрашена краской Кизл = 0,95, а поверхность остальных вводов неокрашена Кизл = 0,2-0,3)

Вводы 220 кВ АТ-2. $\Delta T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$



РД об ИК диагностике

РД 34.45-51.300-97

"Объем и нормы испытаний электрооборудования" предусматривает *"использование как традиционных испытаний, так и не предусмотренных предыдущим изданием, но широко применяемых в последнее время, в частности, инфракрасную диагностику, позволяющую определять степень развития и опасность возможных дефектов на ранних стадиях развития"* (п.1.1).

"Технические руководители энергопредприятий должны обеспечить скорейшее внедрение предусмотренного Нормами контроля состояния электрооборудования под рабочим напряжением, позволяющего выявлять дефекты на ранних стадиях развития. По мере накопления опыта проведения контроля под рабочим напряжением решением технического руководителя энергопредприятия возможен... отказ от некоторых видов испытаний, выполняемых с отключением электрооборудования" (п.1.8[1]).

Тепловизионный контроль состояния электрооборудования следует по возможности проводить для электроустановки (например, ОРУ) в целом (п.1.9 [1]).

Характеристики тепловизоров

Характеристика	AGEMA 470	Inframetrics 740	FLIR PRISM DS
Детектор	Сканирующая система	Сканирующая система	Матрица в фокальной плоскости
Размер кадра	140 x 140	240 x 194	320 x 240
Спектральный диапазон	3 ... 5 мкм	8 ... 12 мкм	3.6 ... 5.0 мкм
Рабочая температура	- 15...+ 55 °С	- 15...+ 50 °С	- 10...+ 50 °С
Диапазон измеряемых температур	- 20...+ 500 °С	- 20...+ 400 °С	- 20 ... + 450 °С
Расширенный диапазон (с фильтром)	до + 1500 °С	до + 1500 °С	до + 1500 °С
Температурное разрешение	0,1 °С (при 30 °С)	< 0,1 °С (при 30 °С)	< 0,1 °С (при 30 °С)
Погрешность	2% или 2 °С	2% или 2 °С	2% или 2 °С
Динамический диапазон	13 бит	8 бит	12 бит
Стандартный объектив	25° x 25°	20° (гор) x 15° (верт)	17° (гор) x 13° (верт)
Контроль изображения	Видоискатель	ЖК-монитор 4"	Видоискатель
Частота кадров	20 Гц	60 Гц (NTSC), 50 Гц (PAL)	60 Гц (NTSC), 50 Гц (PAL)
Выходной сигнал	Видео NTSC, PAL	Видео NTSC, PAL	Видео NTSC, PAL
Запись термограмм	Флоппи-диск 3,5"	Флоппи-диск 3,5"	PCMCIA-карта
Емкость носителя	70 термограмм	20 / 25 термограмм	от 30 термограмм
Питание	Внешний аккумулятор 12 В	Специальная батарея	Аккумуляторная батарея
Вес камеры	6.1 кг (без объектива)	3,0 кг (без объектива)	2,9 кг
Вес блока управления	-	5,6 кг	-
Габариты камеры, см	15.4 x 14.0 x 47.5	21.6 x 12.7 x 18	22.2 x 12.7 x 14.0

ThermaCAM 1000



Методика ИК диагностики

Наличие дефекта выявляется сравнением температуры аналогичных участков поверхности аппаратов, работающих в одинаковых условиях нагрева охлаждения. Характер и степень развития дефекта может быть установлена только после дополнительных измерений и анализов, позволяющих оценить состояние каждой из тепловыделяющих конструктивных частей аппарата в отдельности.

Методические рекомендации

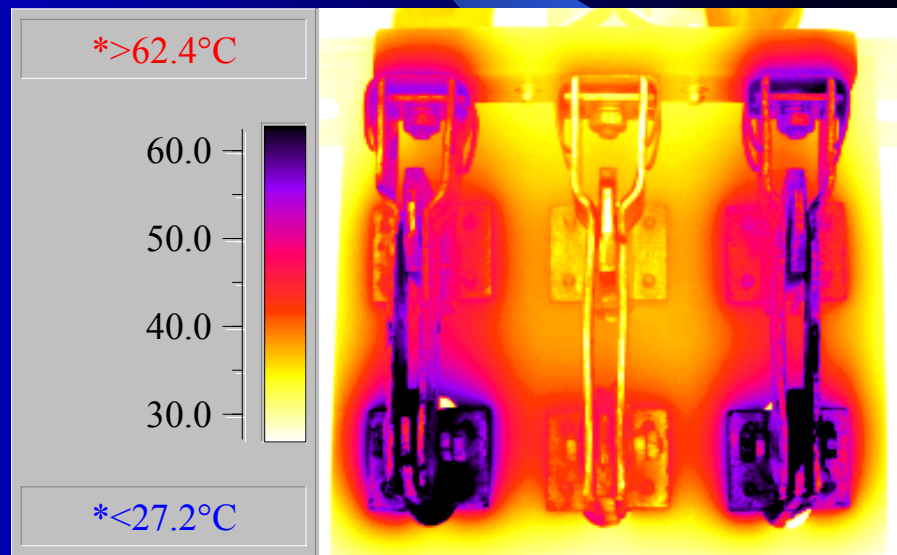
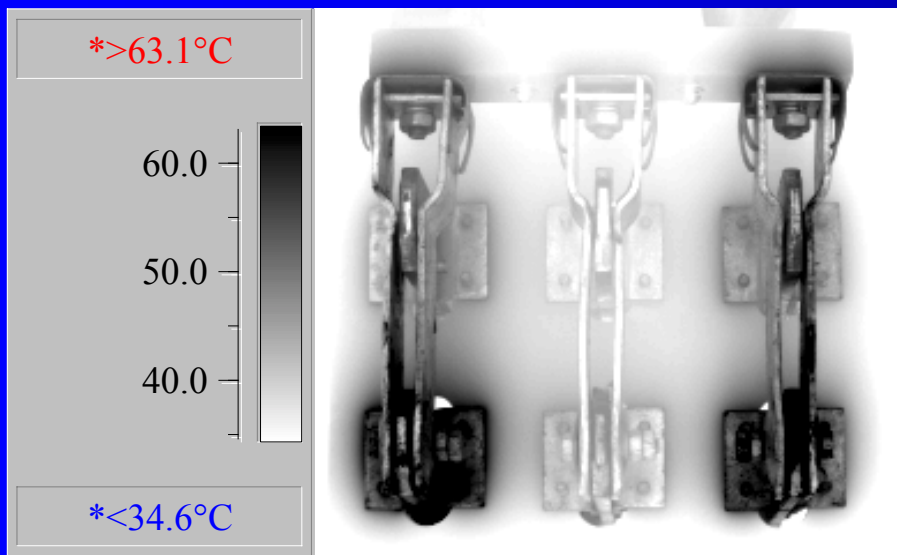
- Тепловизионный приемник должен принимать ИК излучение средней или дальней части спектра 3 ... 5 или 8 ... 14 мкм.
- Измерение необходимо проводить при отсутствии прямого солнечного излучения, при этом сплошная облачность не пропускает ИК излучение Солнца.
- Необходимо учитывать коэффициент излучения поверхности обследуемого объекта, а также угол между осью тепловизионного приемника и нормалью к излучающей поверхности объекта.
- При обнаружении более нагретых зон необходимо прежде всего оценить, не является ли это следствием разницы в коэффициентах излучения или наличия отраженного излучения.

Контактные соединения

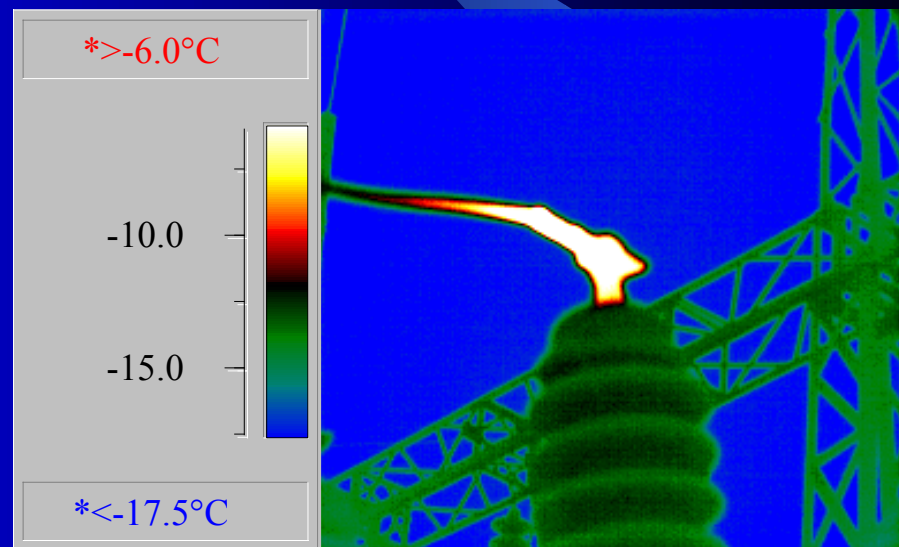
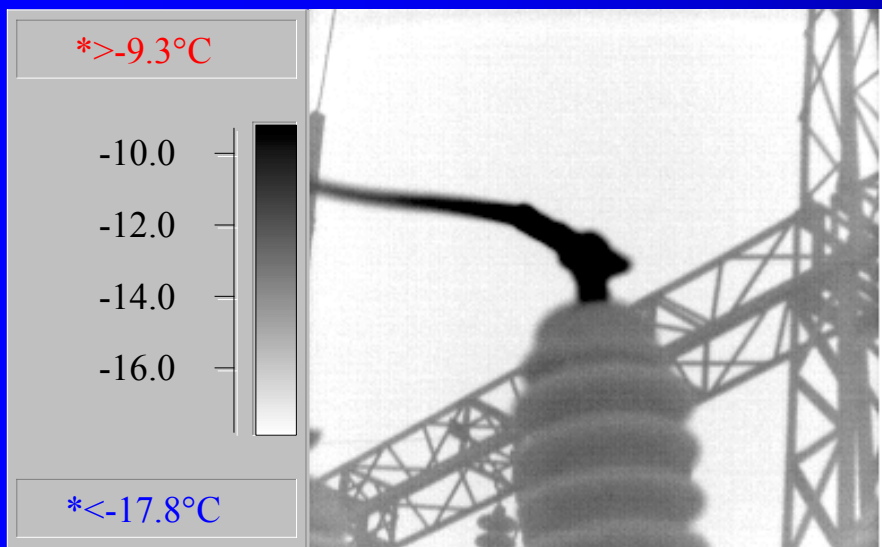
Все типы контактных соединений ошиновки ОРУ, присоединений к линейным выводам аппаратов, разъемные контактные соединения разъединителей, внутренние контактные соединения камер воздушных и маломасляных выключателей, трансформаторов тока



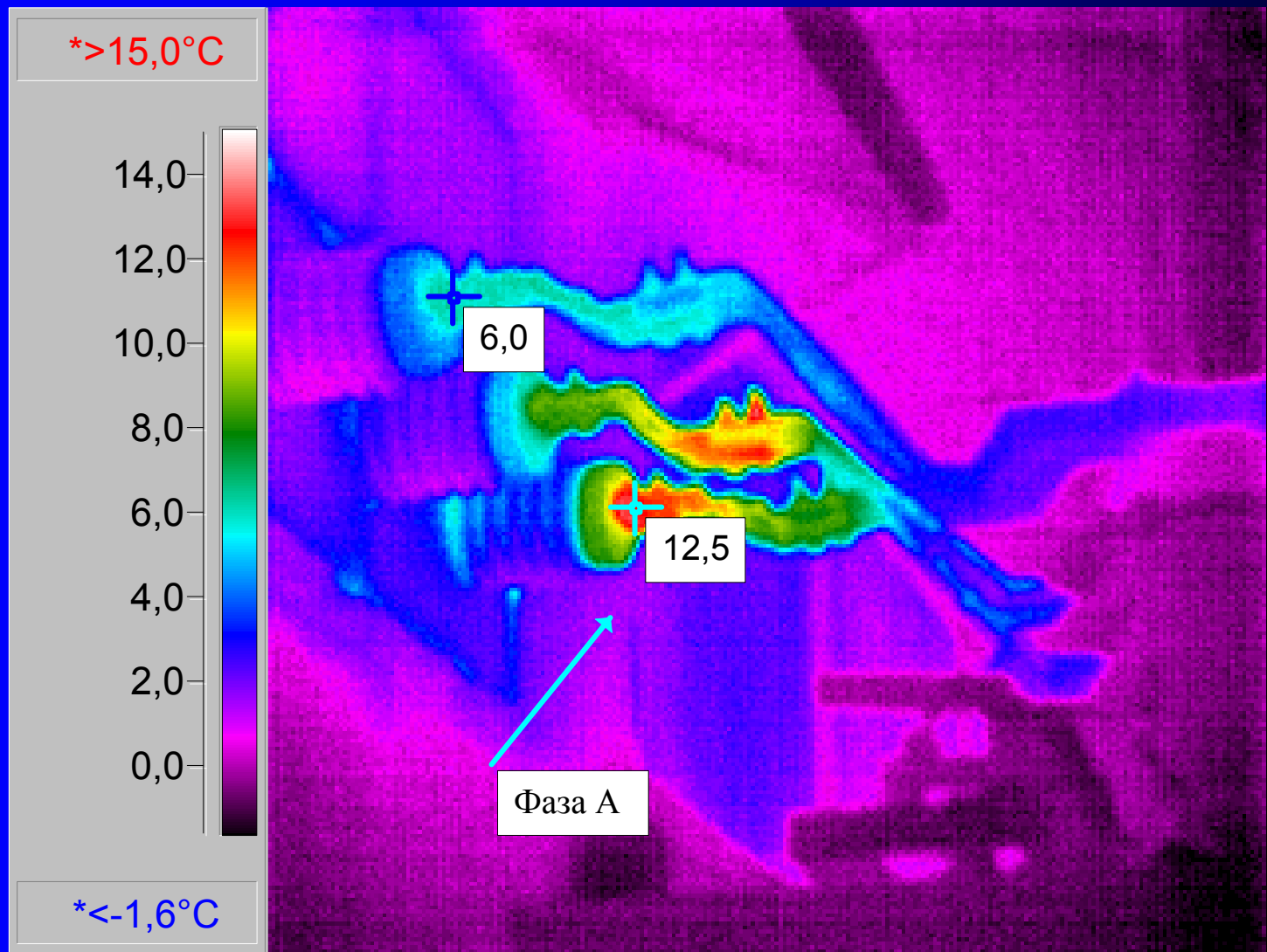
Дефект контакта рубильника



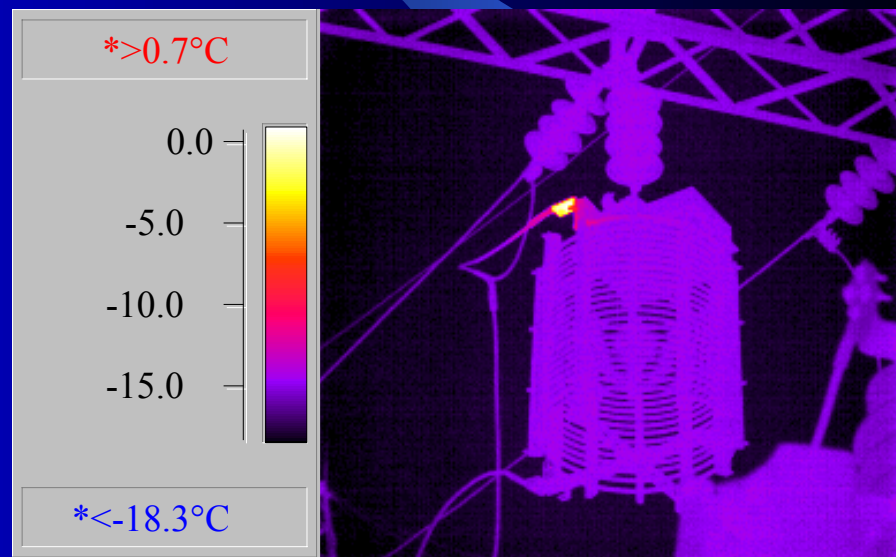
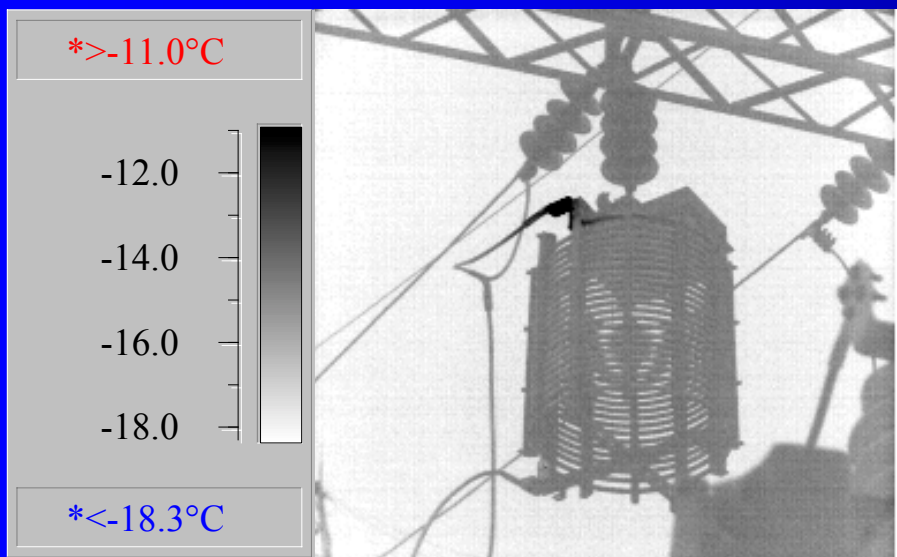
Дефект присоединения к вводу



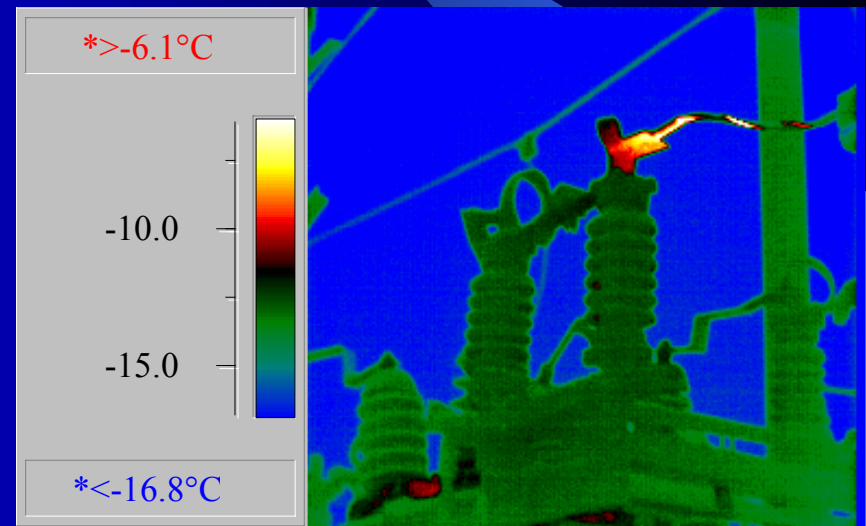
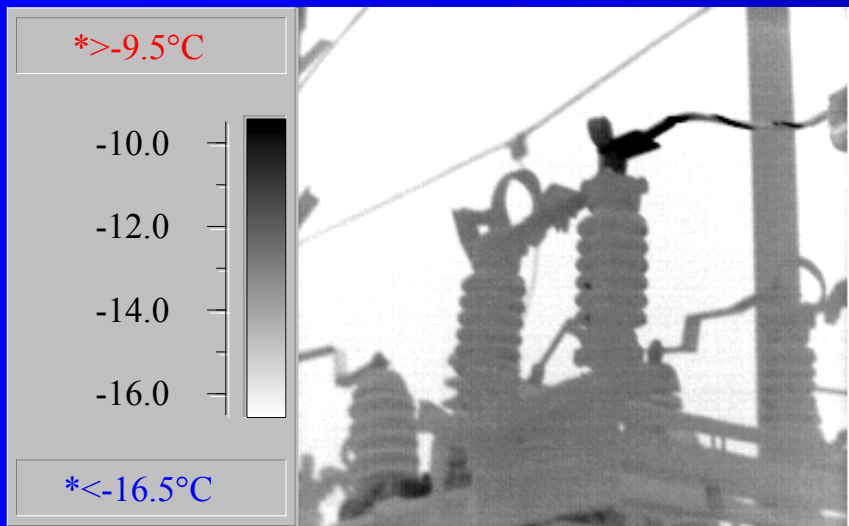
Неравномерная нагрузка вводов 10 кВ



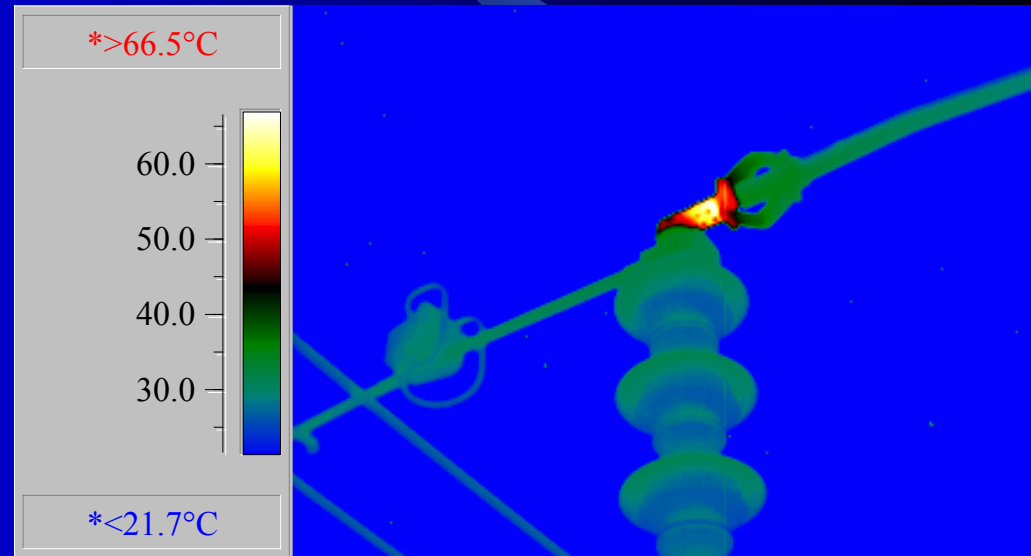
Присоединение ВЧ-заградителя



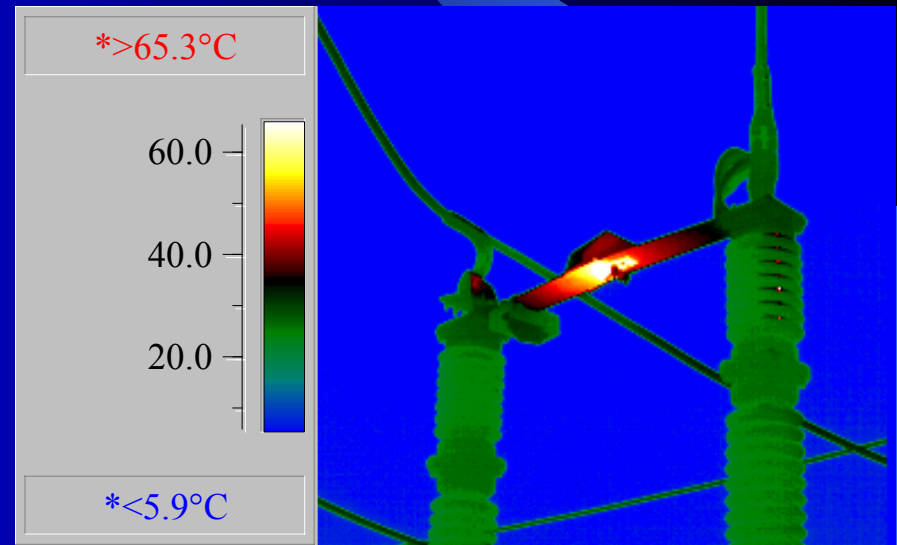
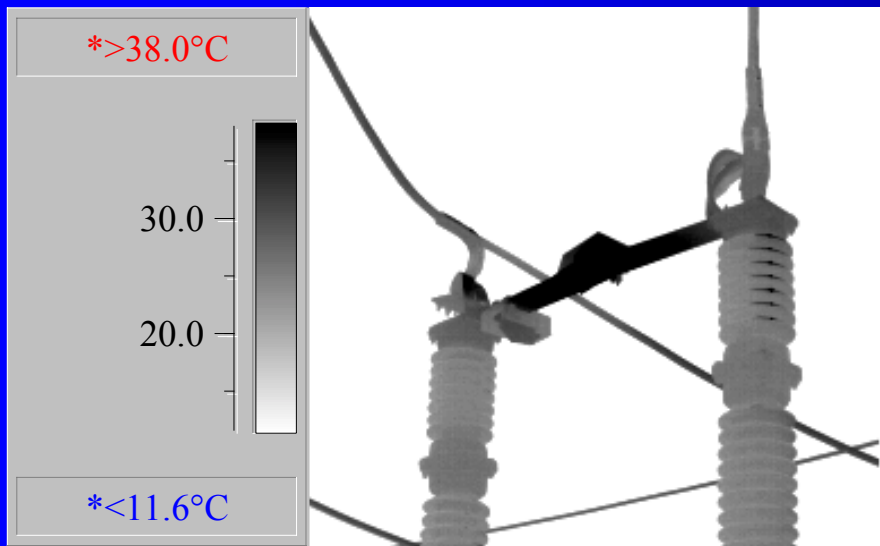
Присоединение к разъединителю



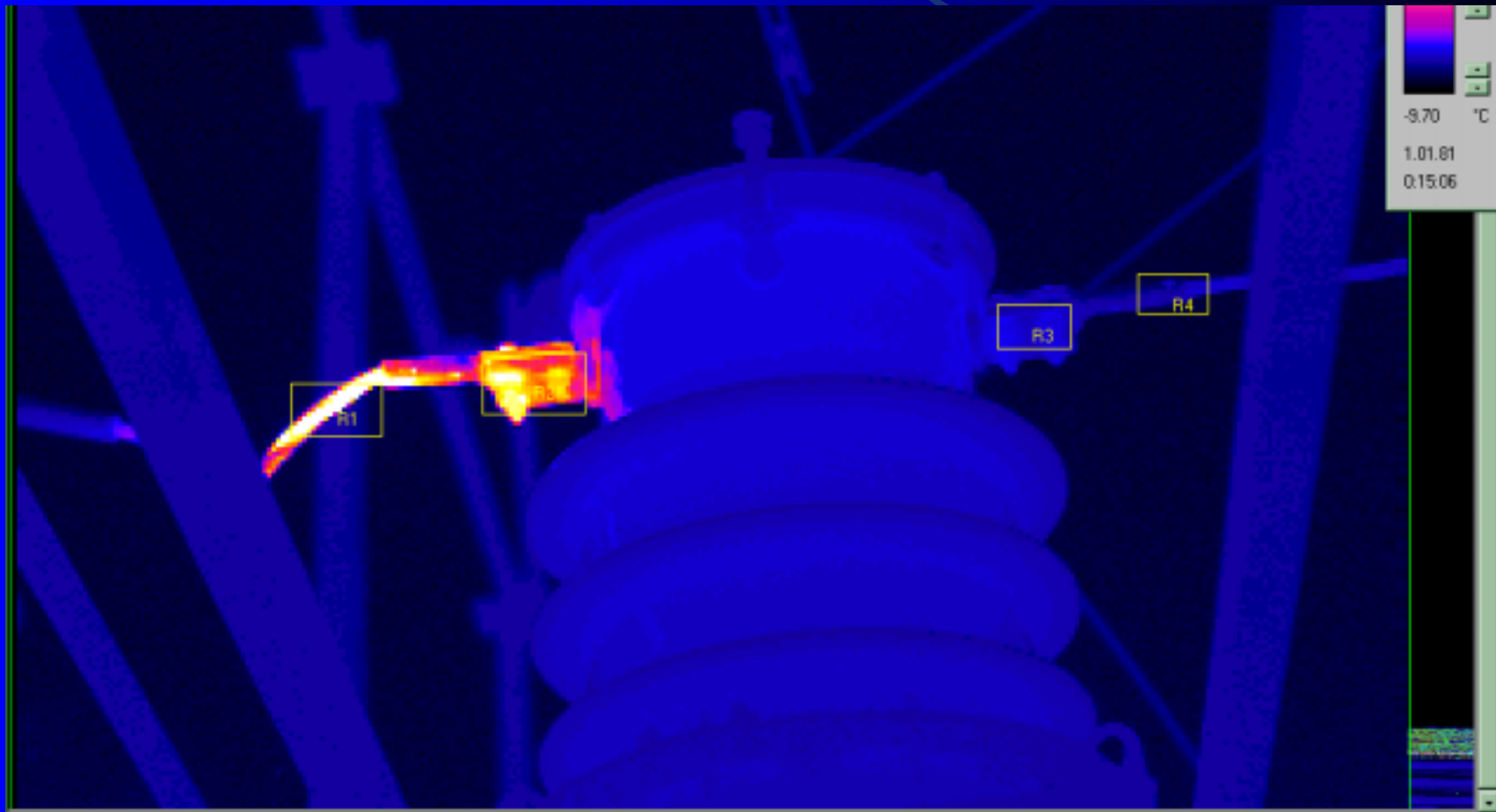
Присоединение к разъединителю



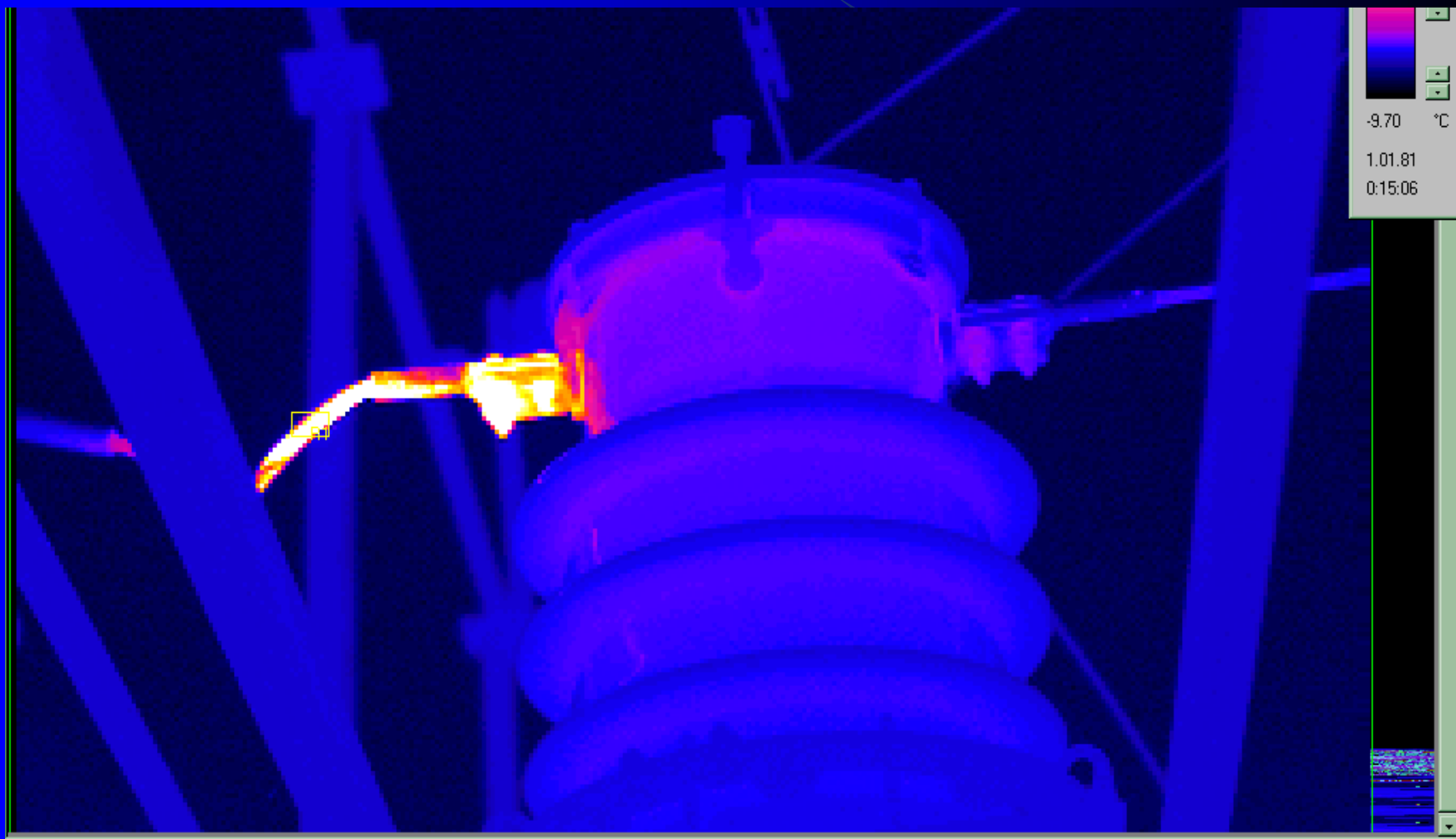
Контакт нож-губка



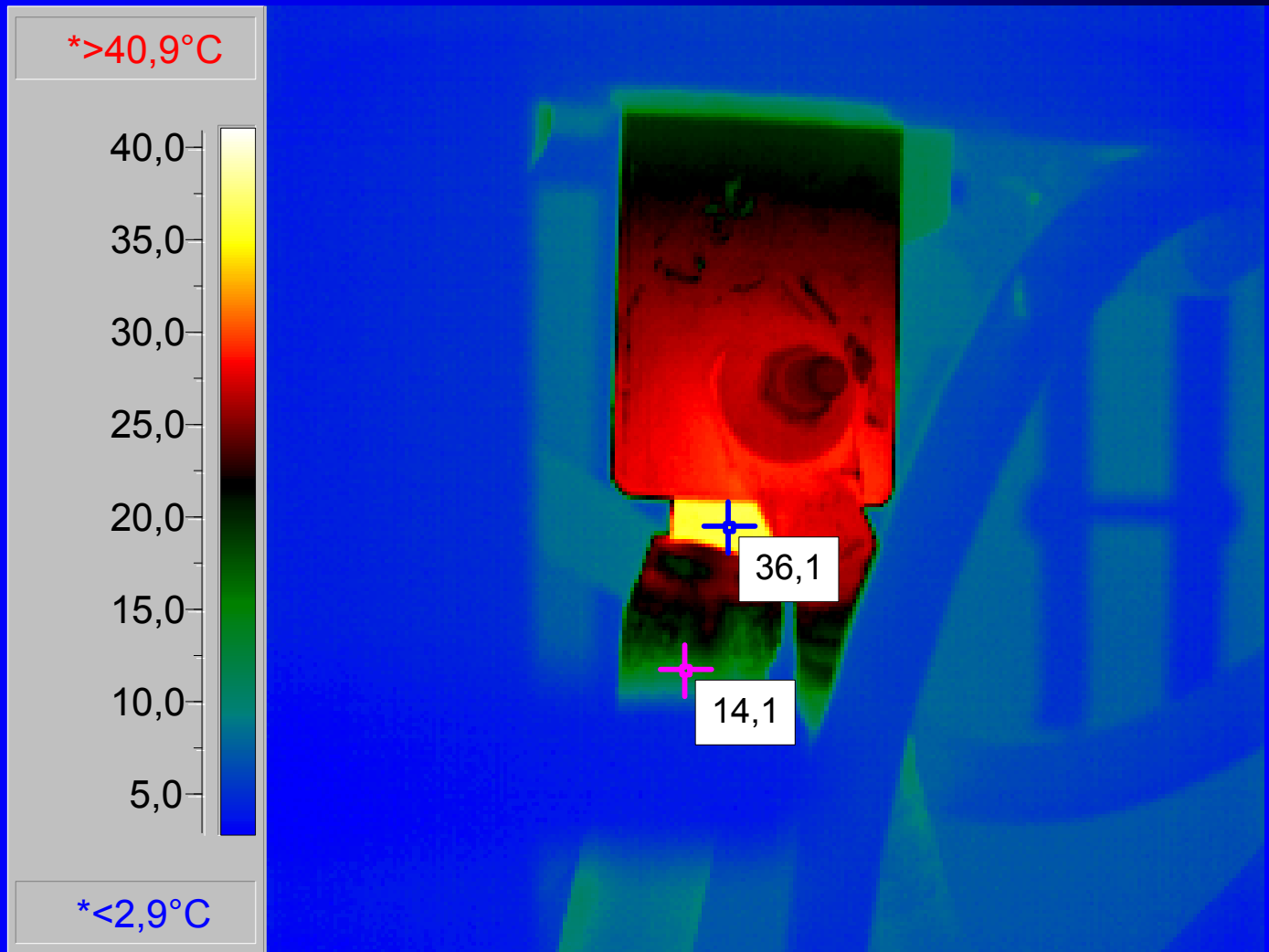
Дефектный контакт



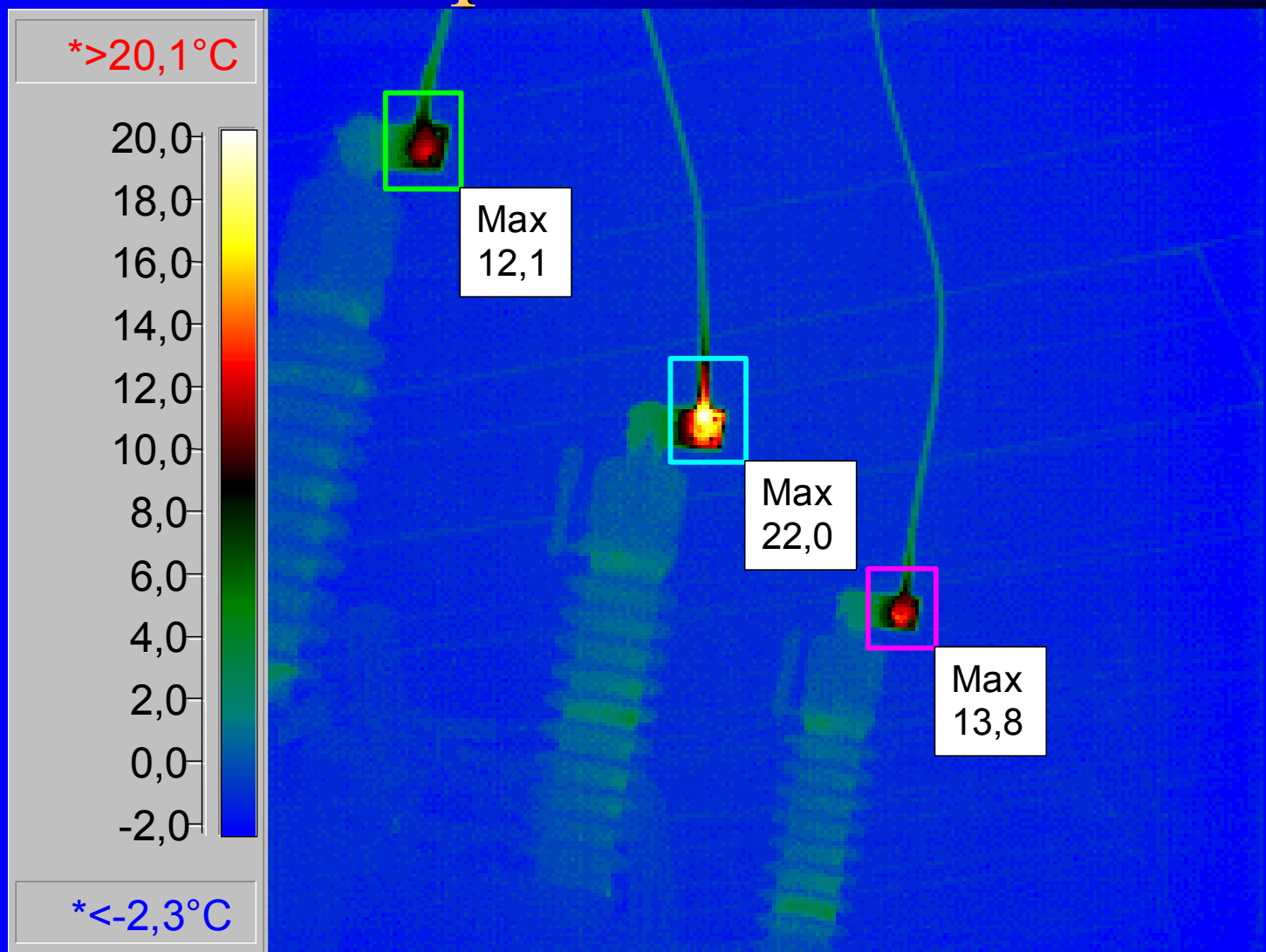
Дефектный контакт



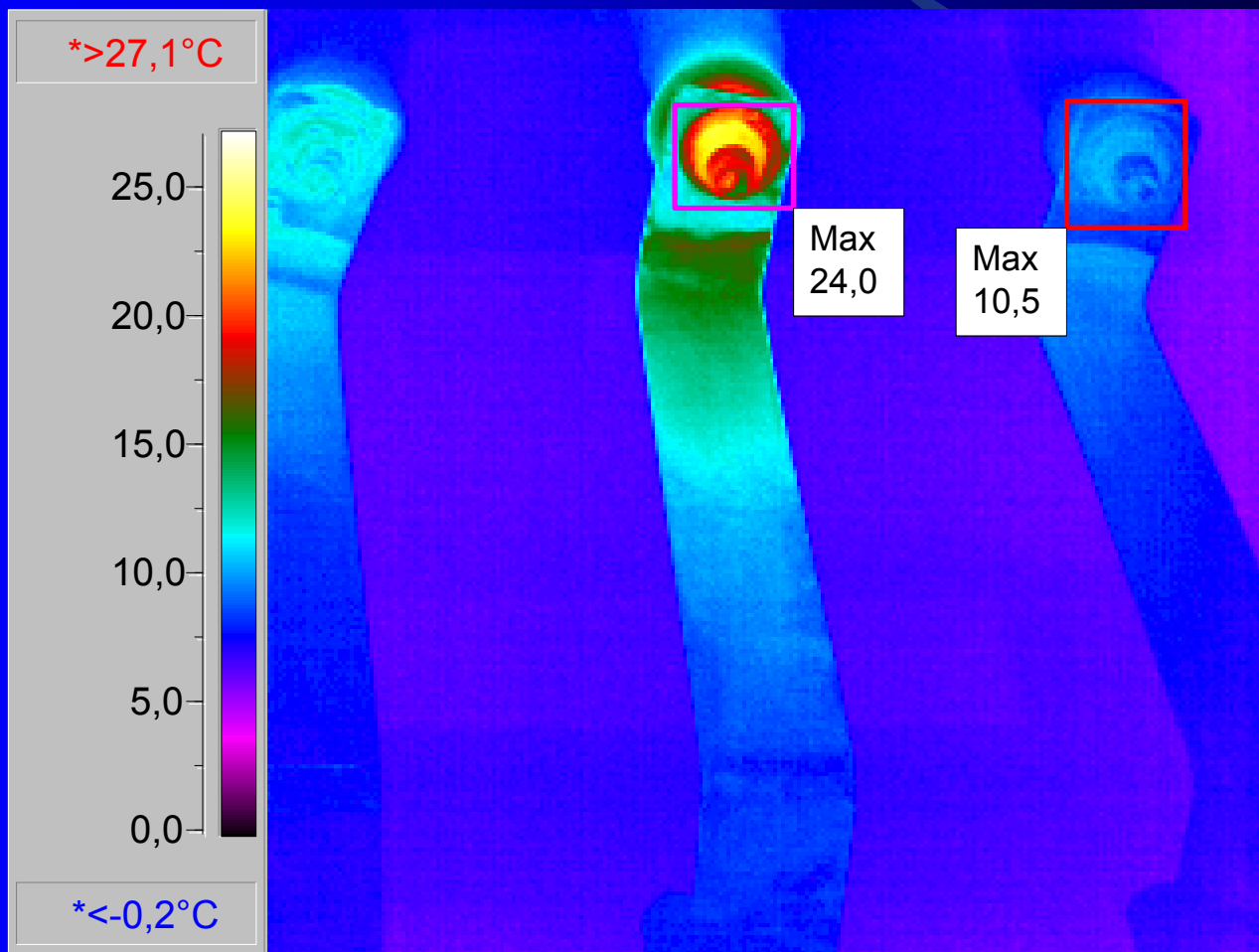
Дефектный контакт



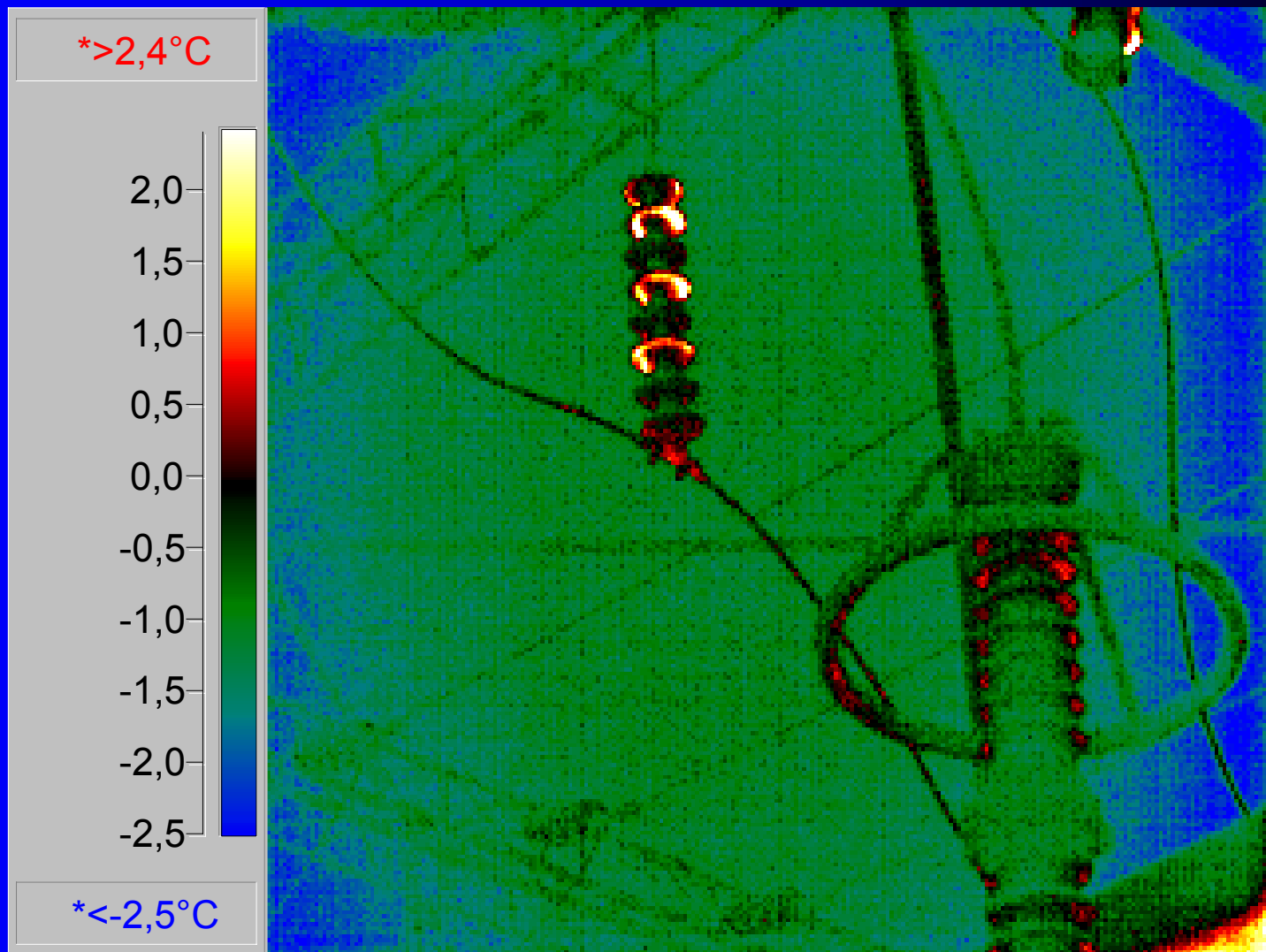
Нагрев контакта



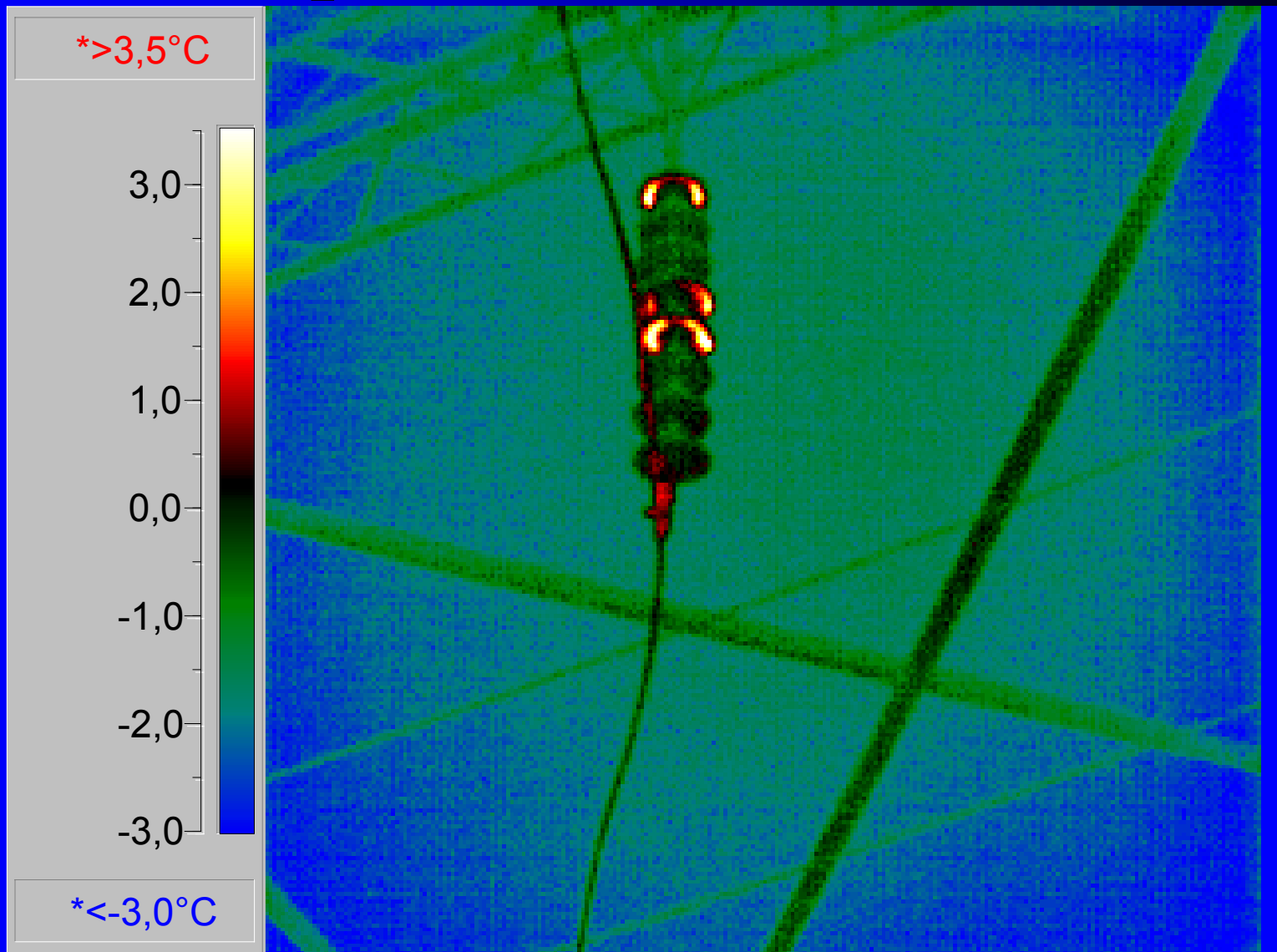
Присоединение ошиновки к выключателю ФС



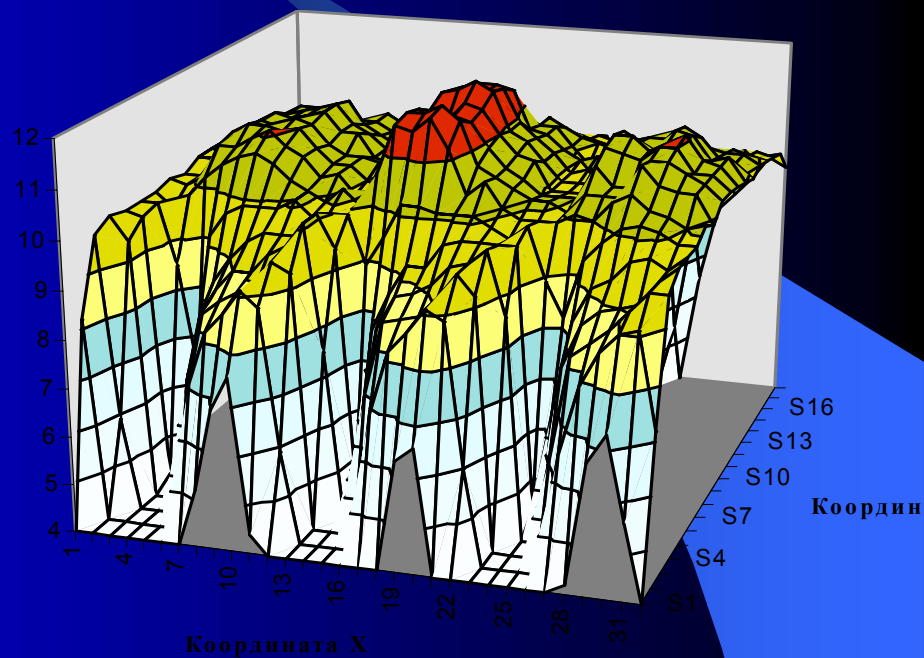
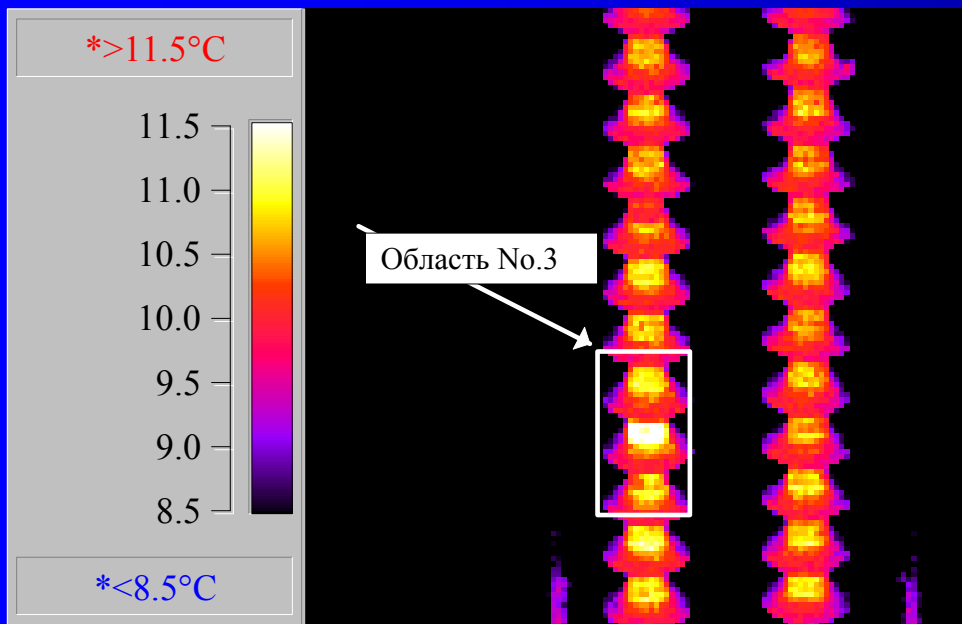
Гирлянда 110 кВ-вертикальная



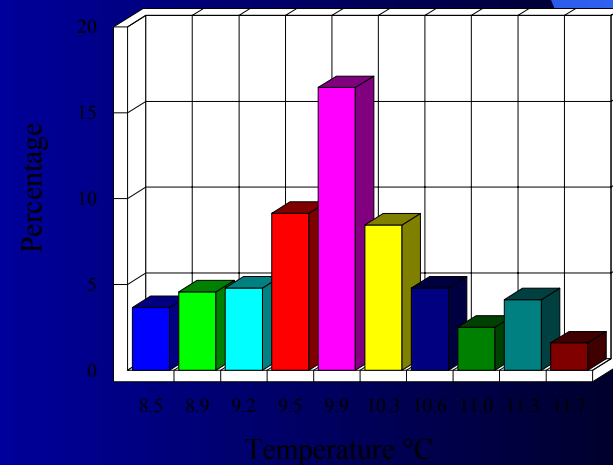
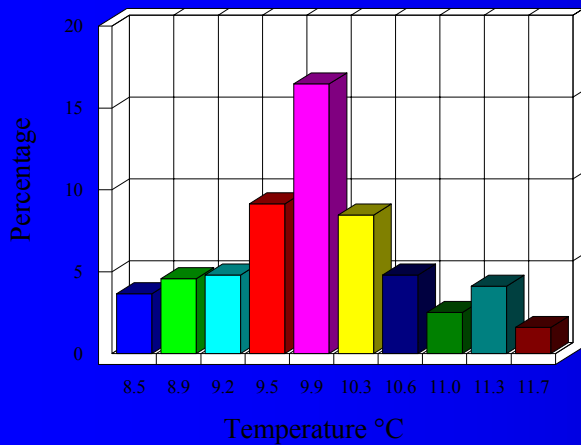
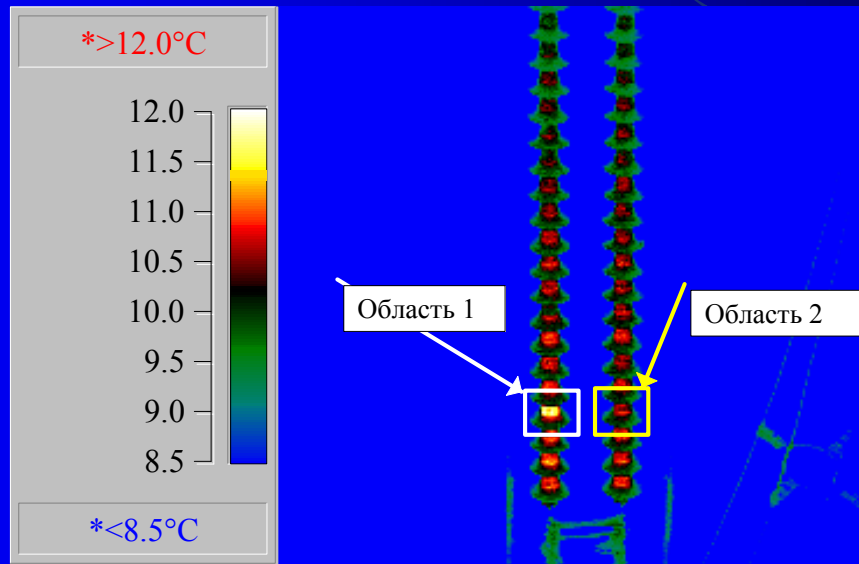
Гирлянда ФС 110 кВ



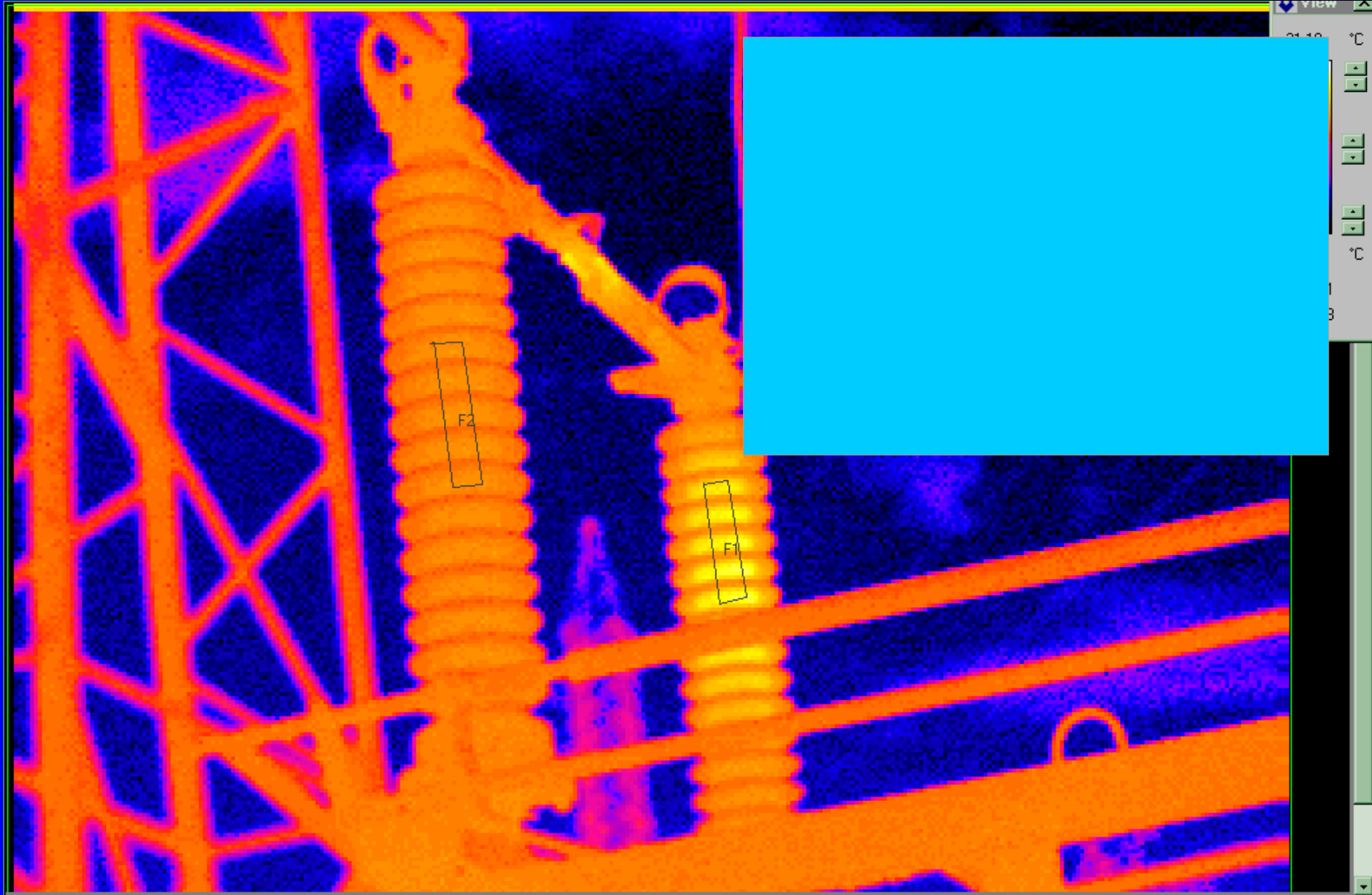
Гирлянда изоляторов



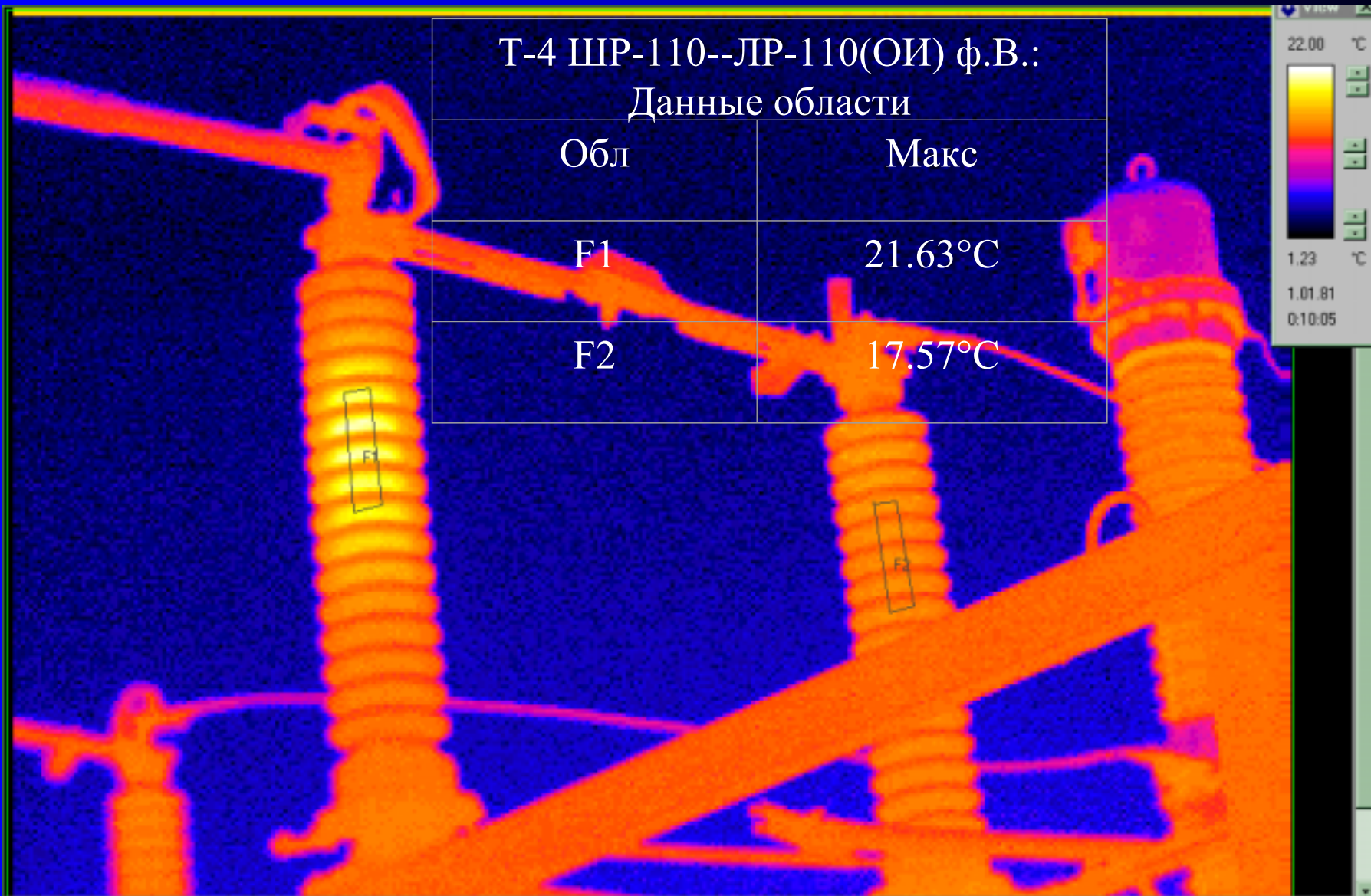
Гирлянда изоляторов



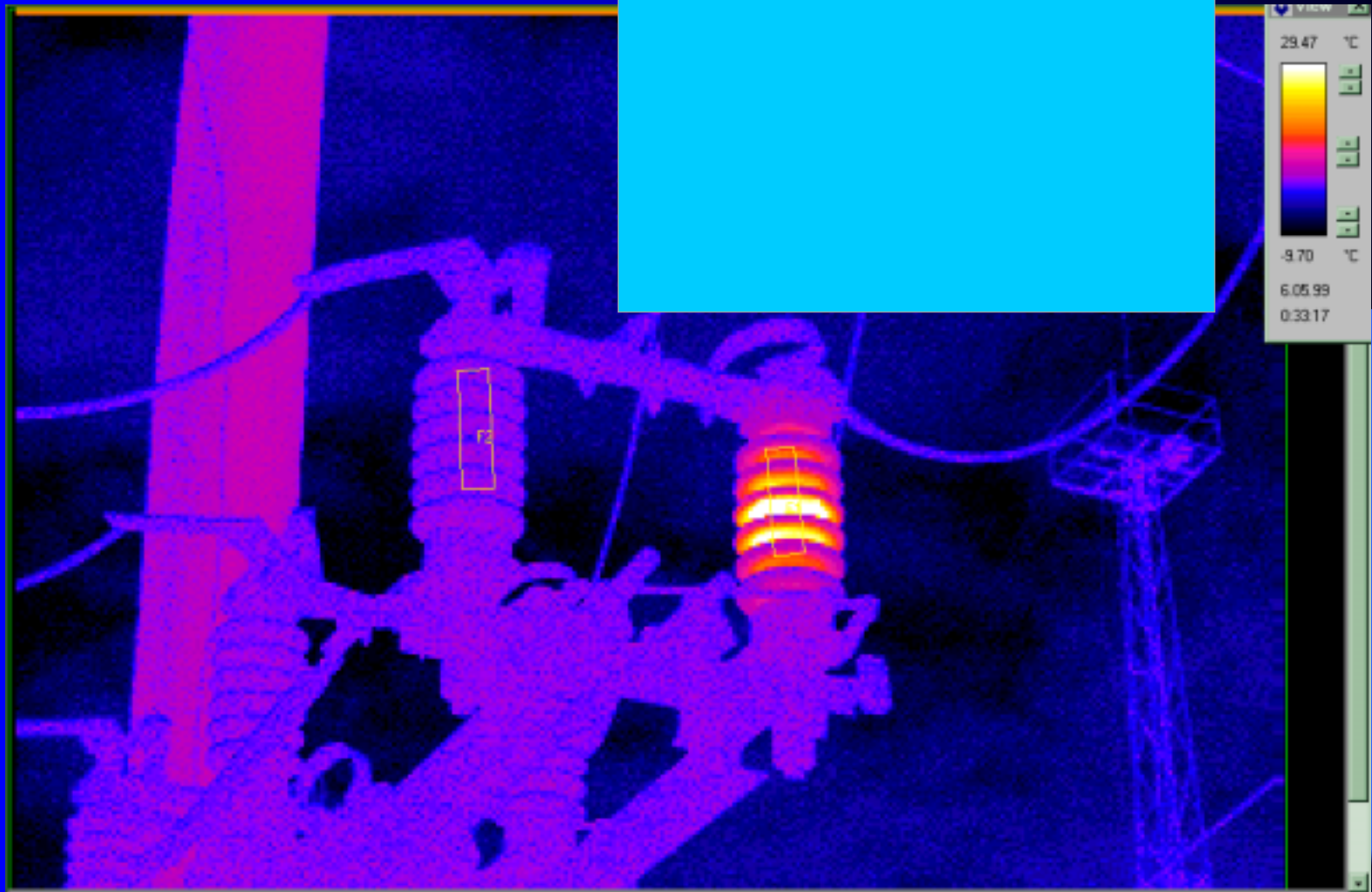
Опорные изоляторы



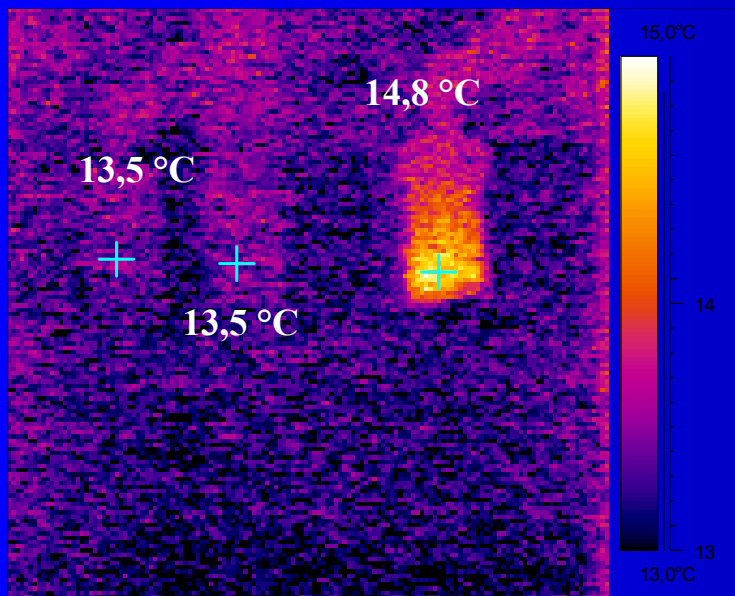
Опорные изоляторы



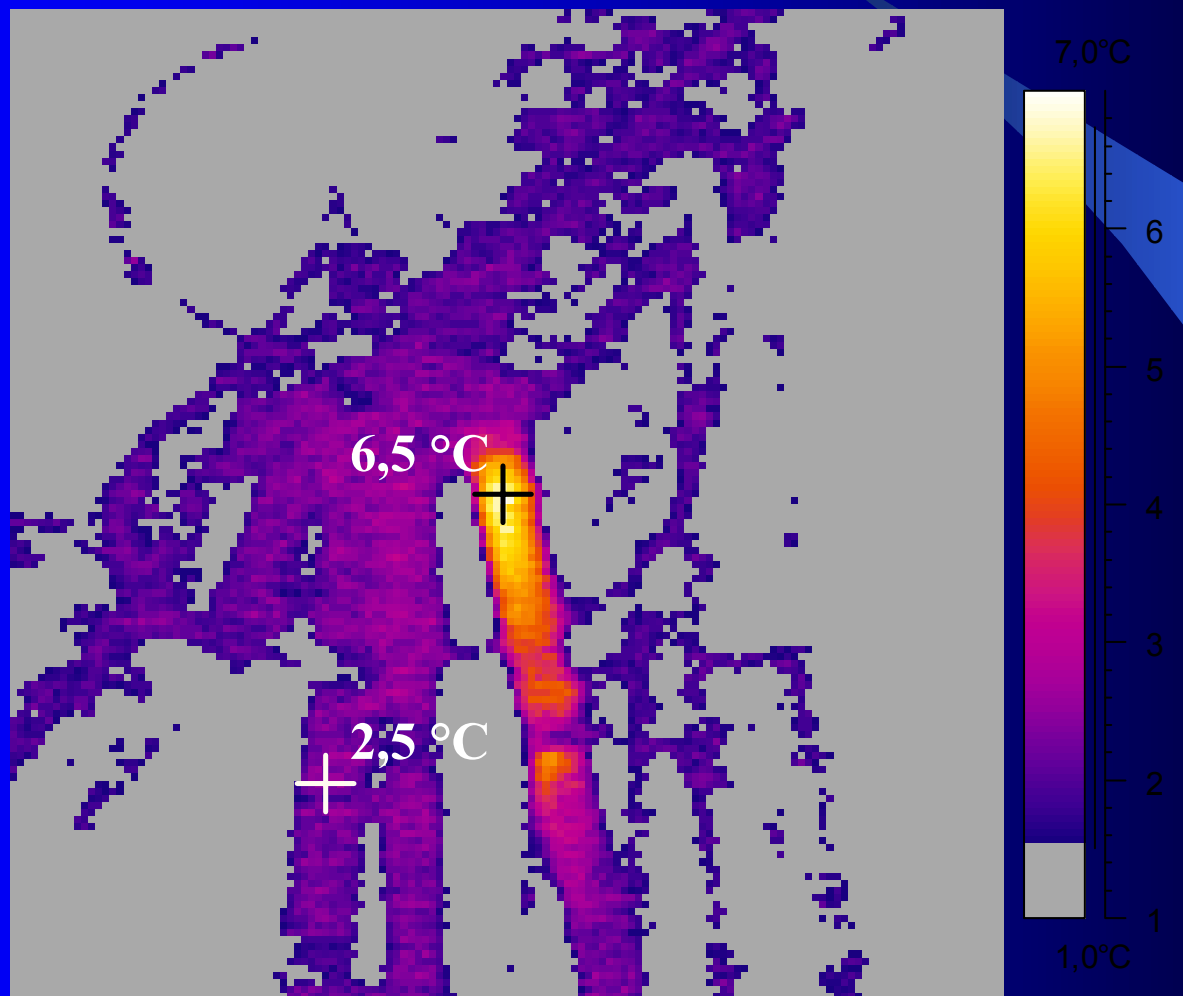
Дефектный изолятор ОНС-35



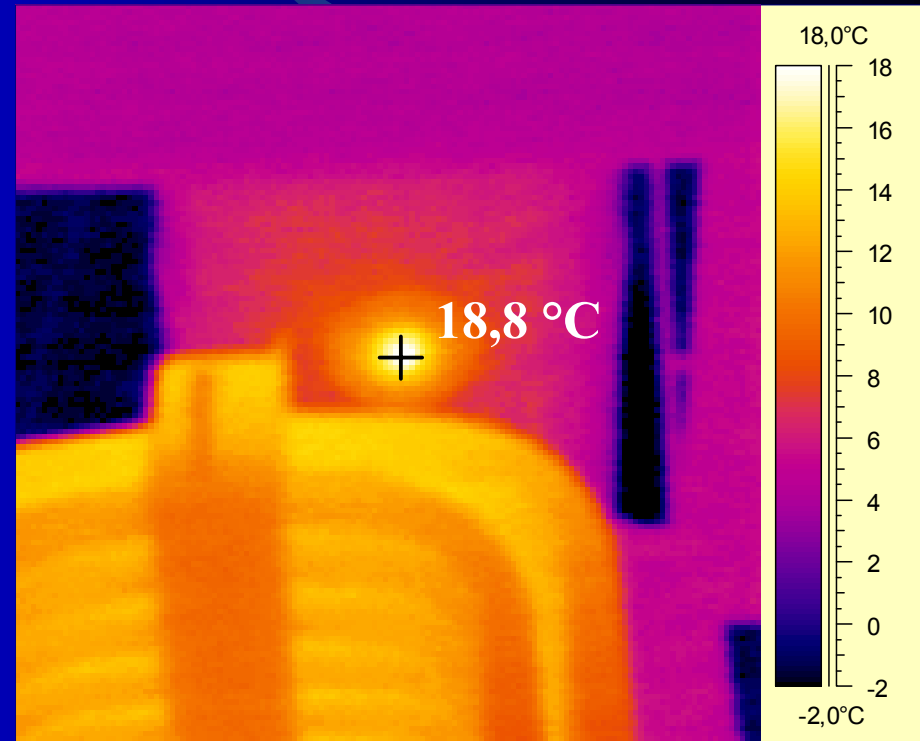
Изоляторы тяг выключателя



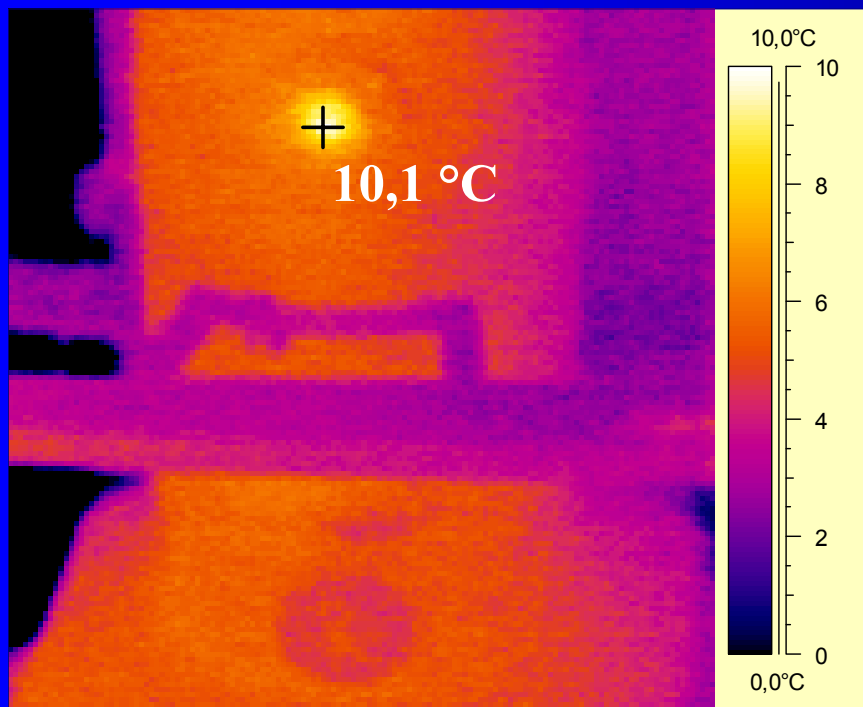
Опорный изолятор разъединителя 750 кВ (п/с Ленинградская).



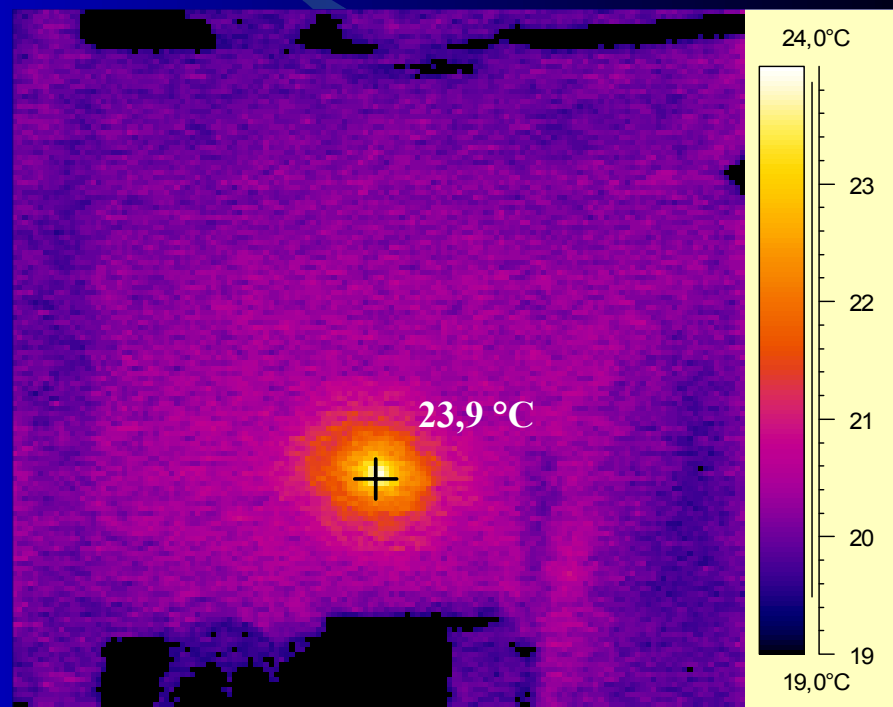
Экранированный токопровод



Экранированный токопровод

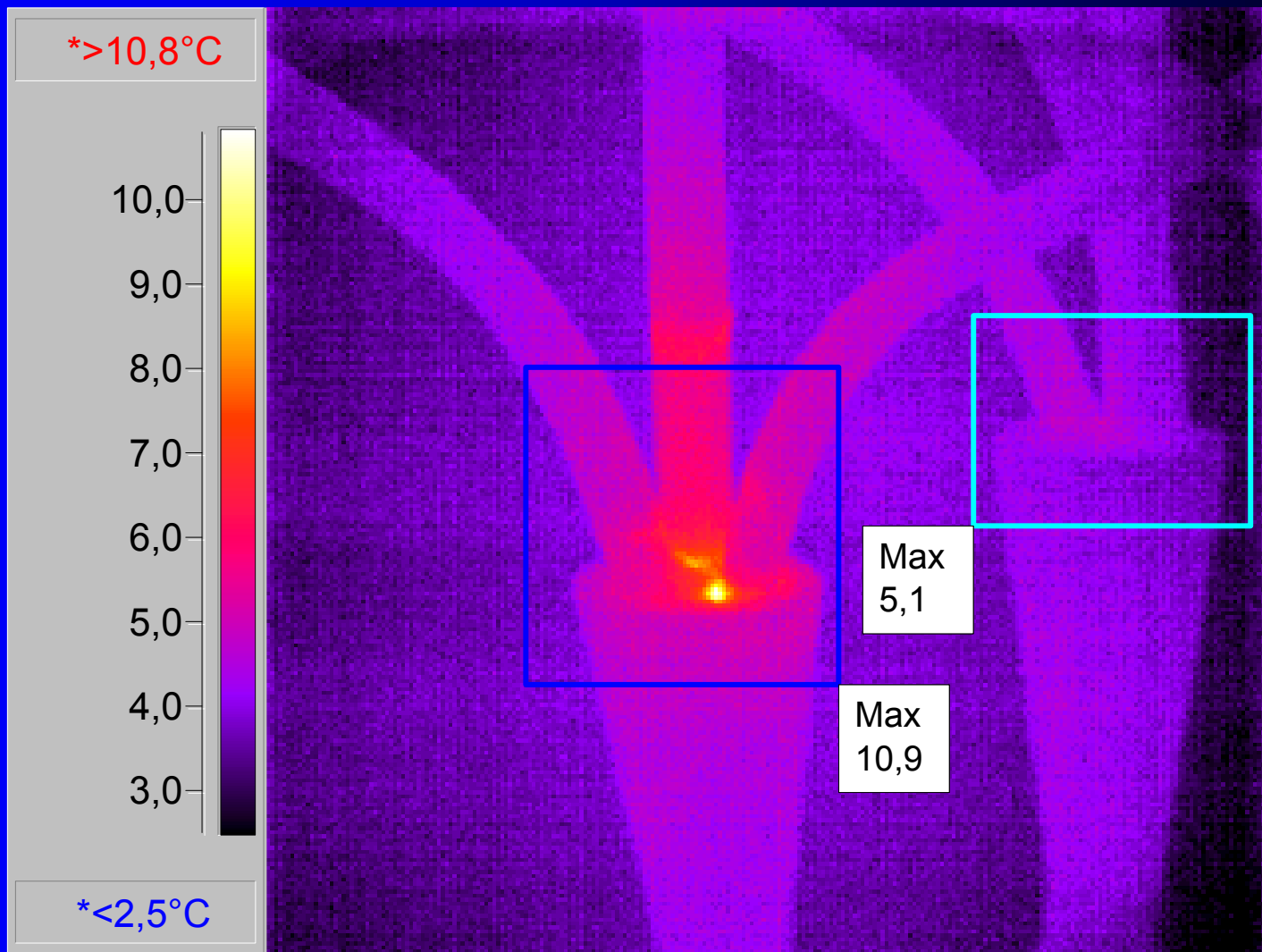


Дефектный изолятор экранированного токопровода 2Т Череповецкой ГРЭС

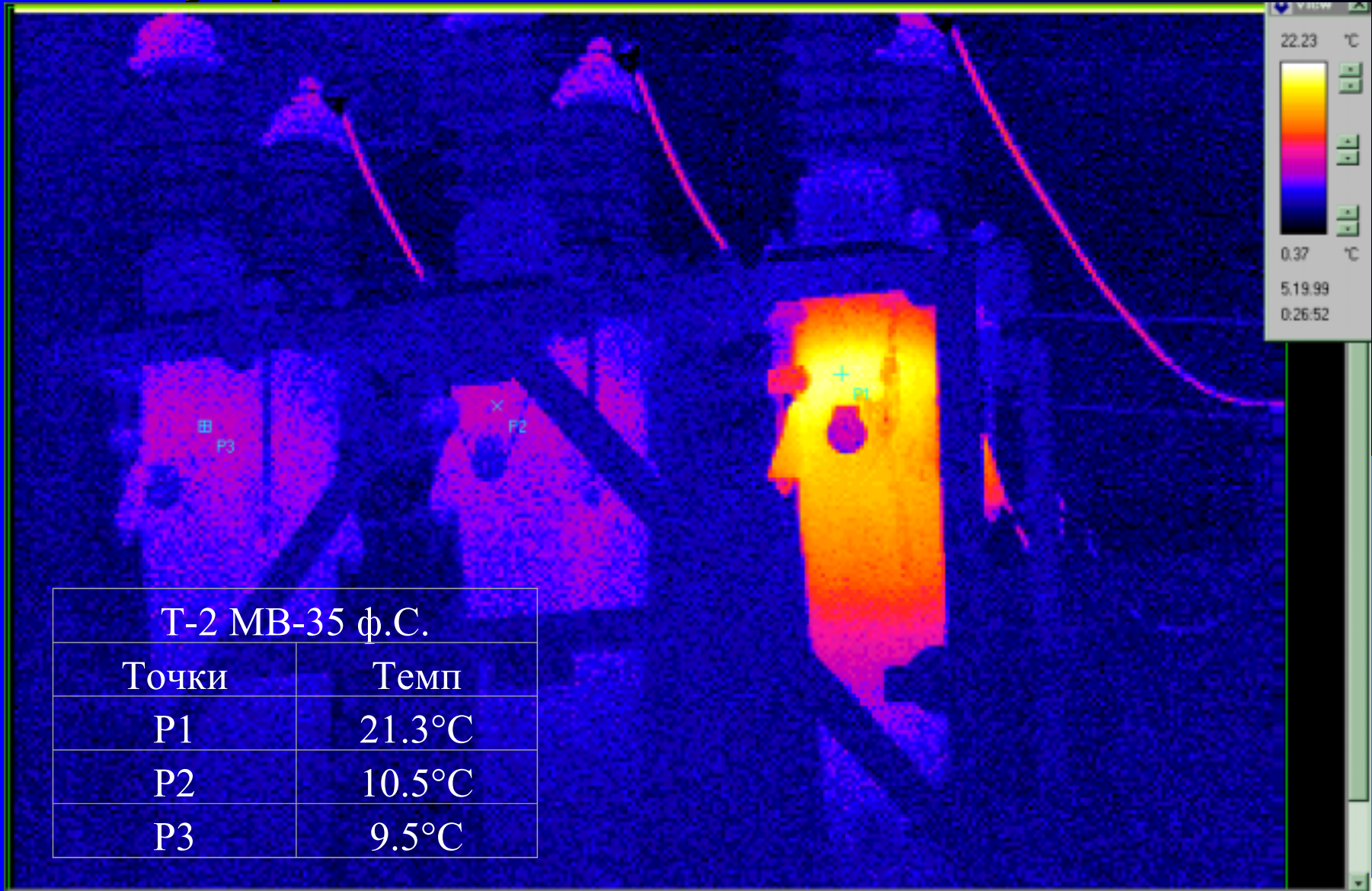


Дефектный изолятор экранированного токопровода 36Т Сургутской ГРЭС-1

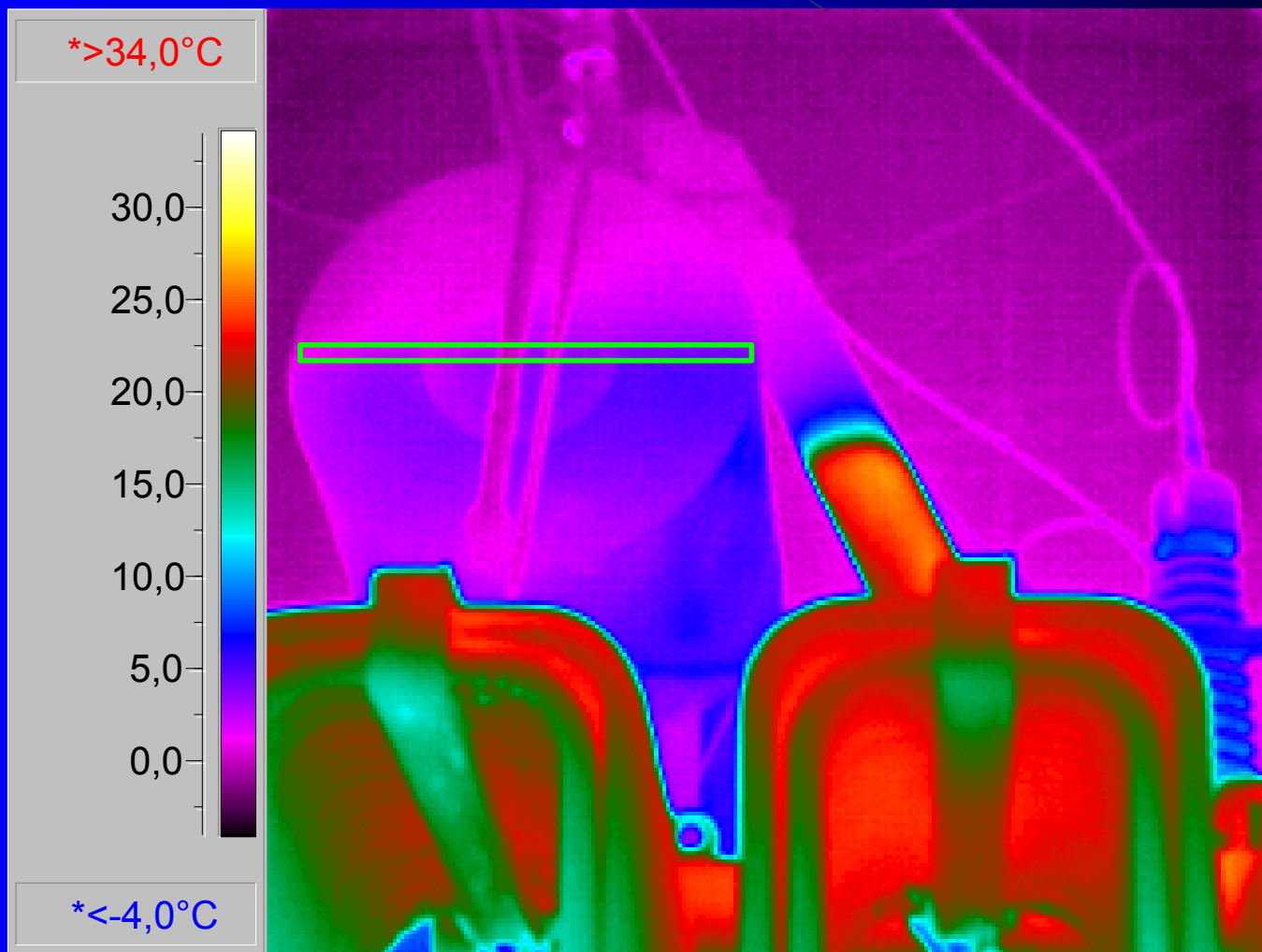
Разделка кабеля



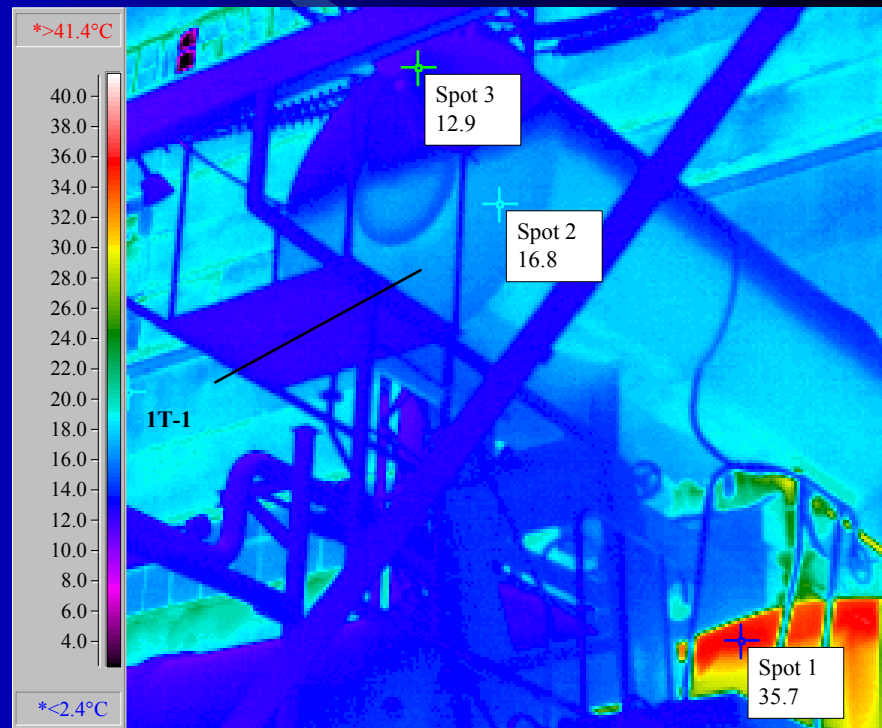
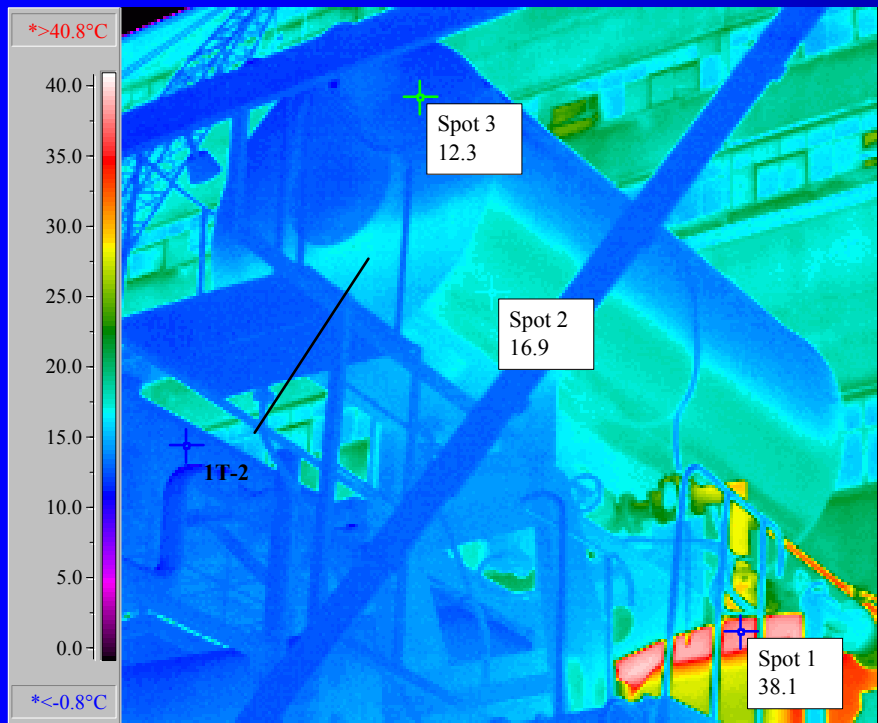
Внутрибаковая изоляция МВ



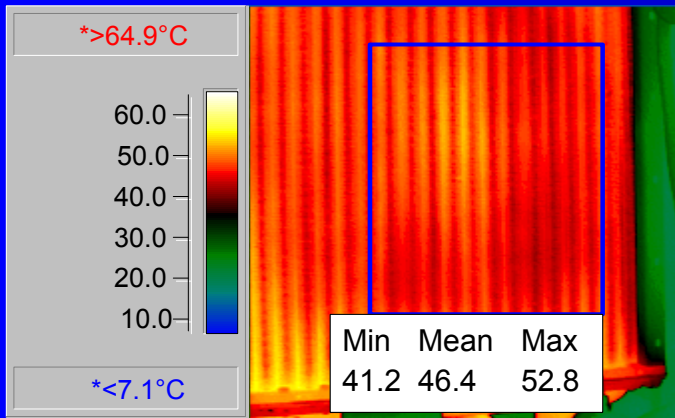
Уровень масла в расширителе АТ



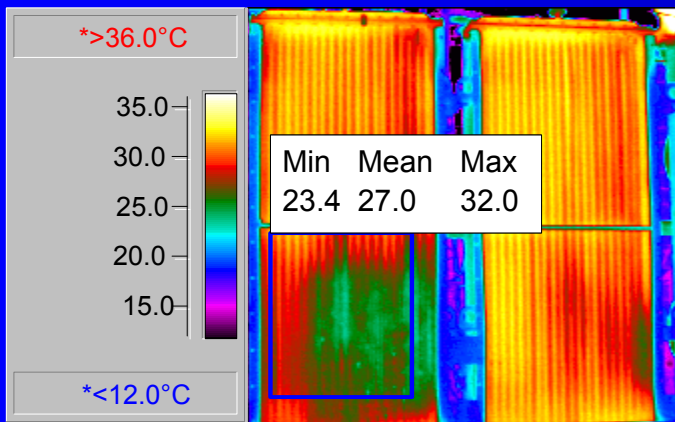
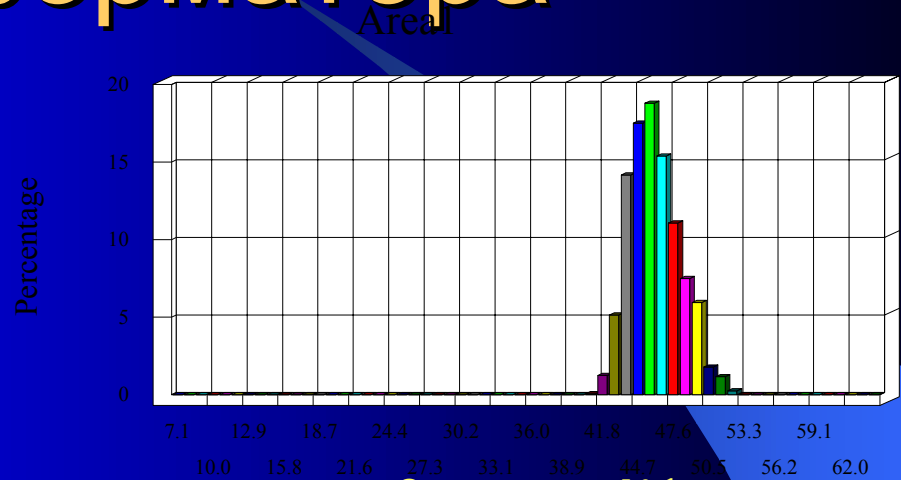
Уровень масла в радиаторе



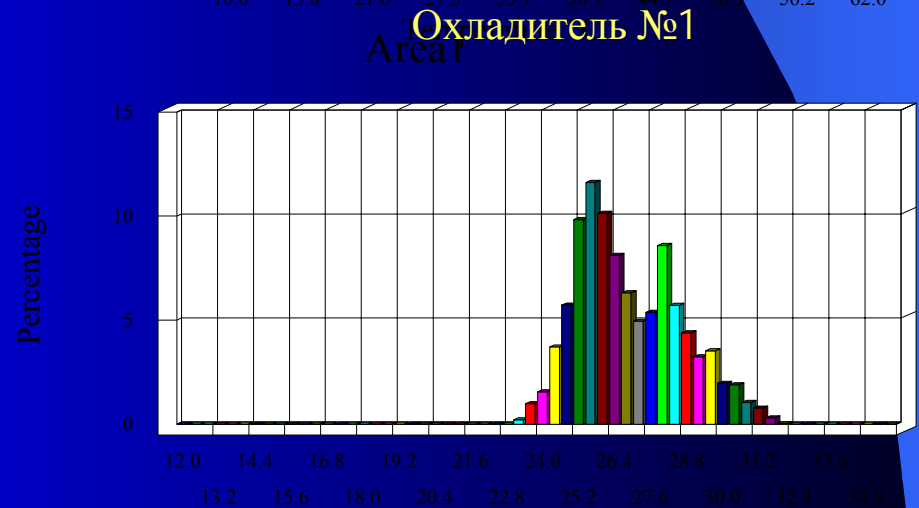
Дефекты охладителей трансформатора



Охладитель №1

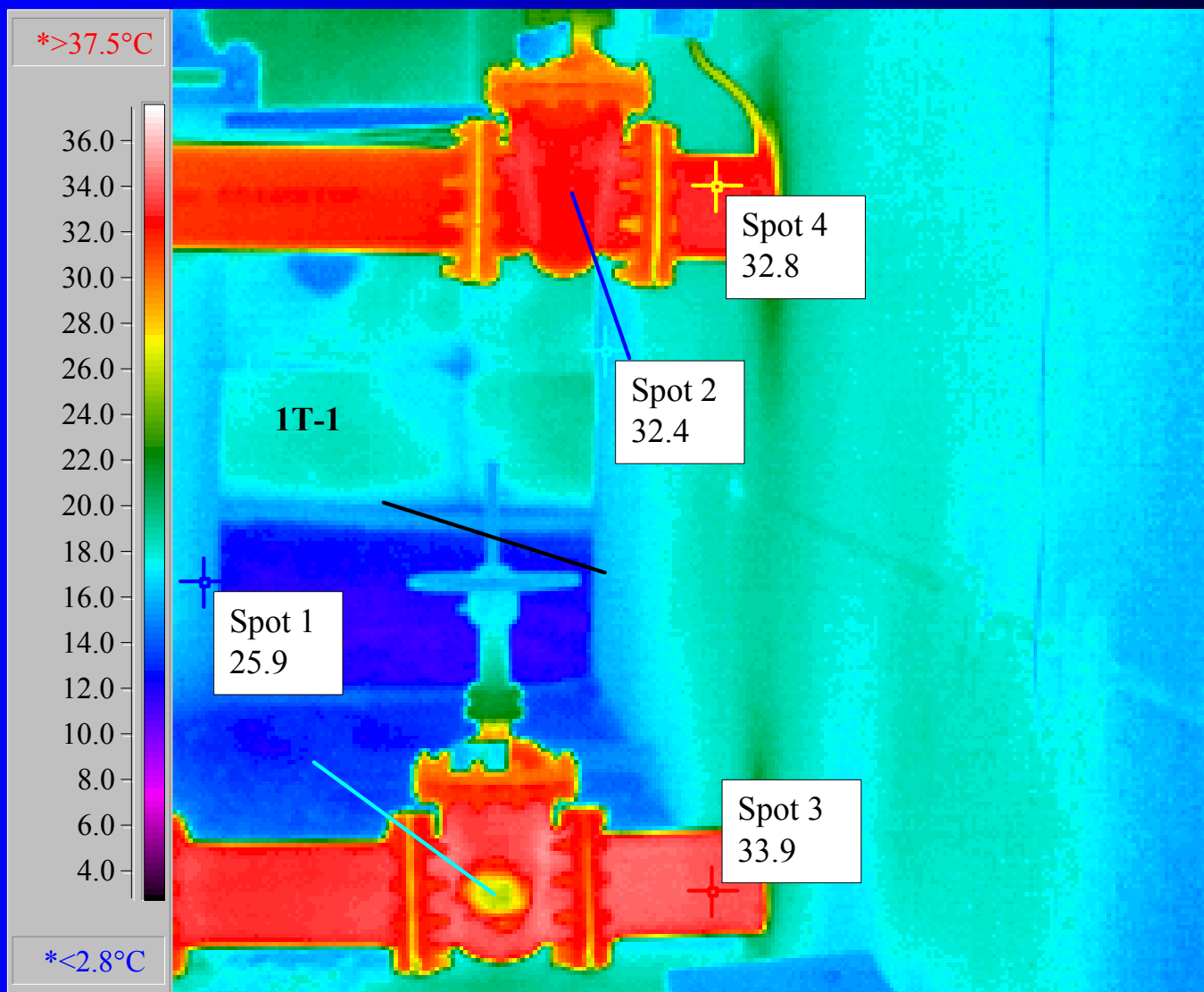


Охладитель №2

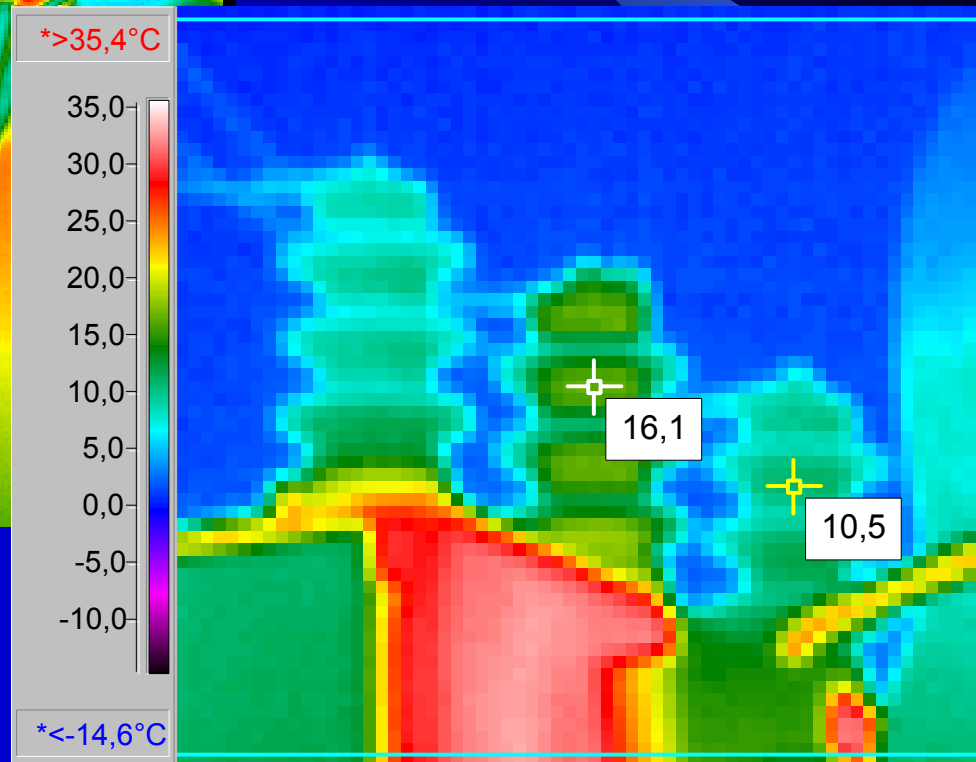
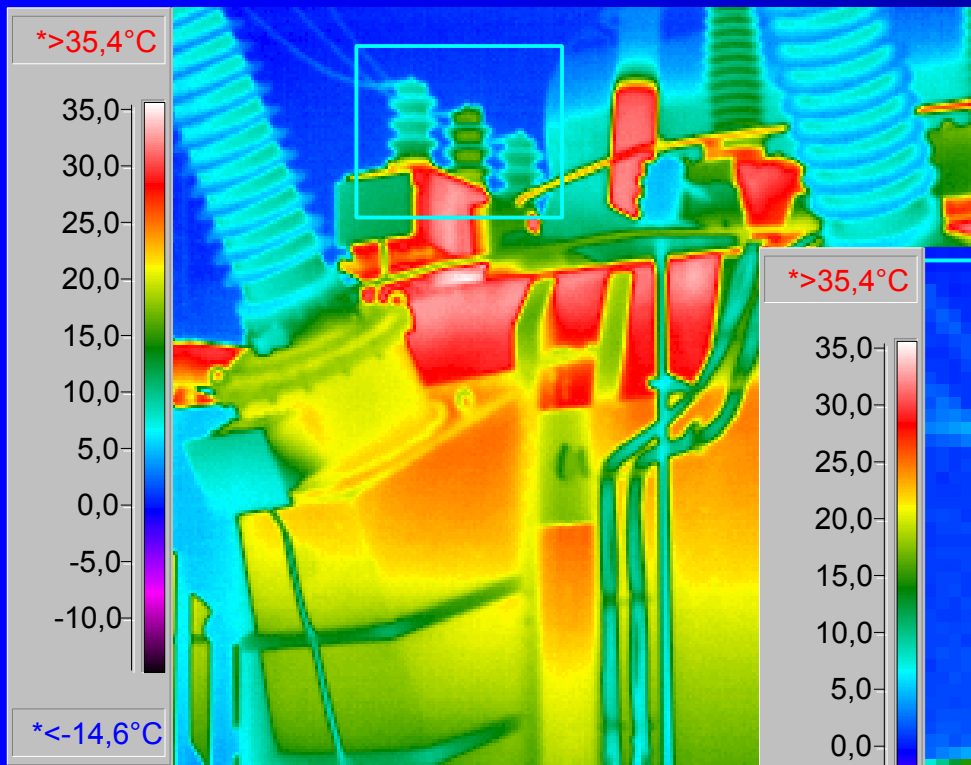


Охладитель №2

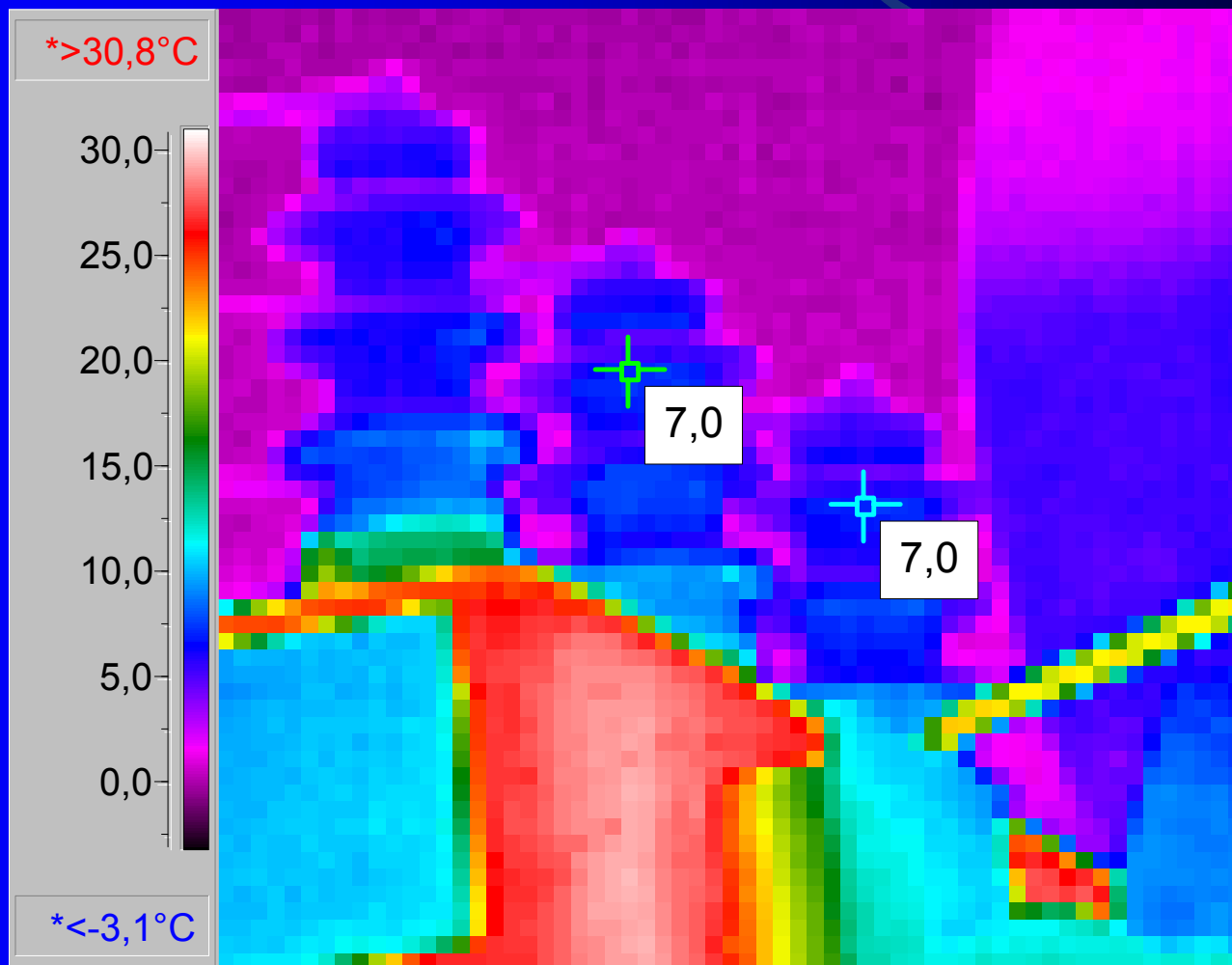
Система охлаждения тр-ра



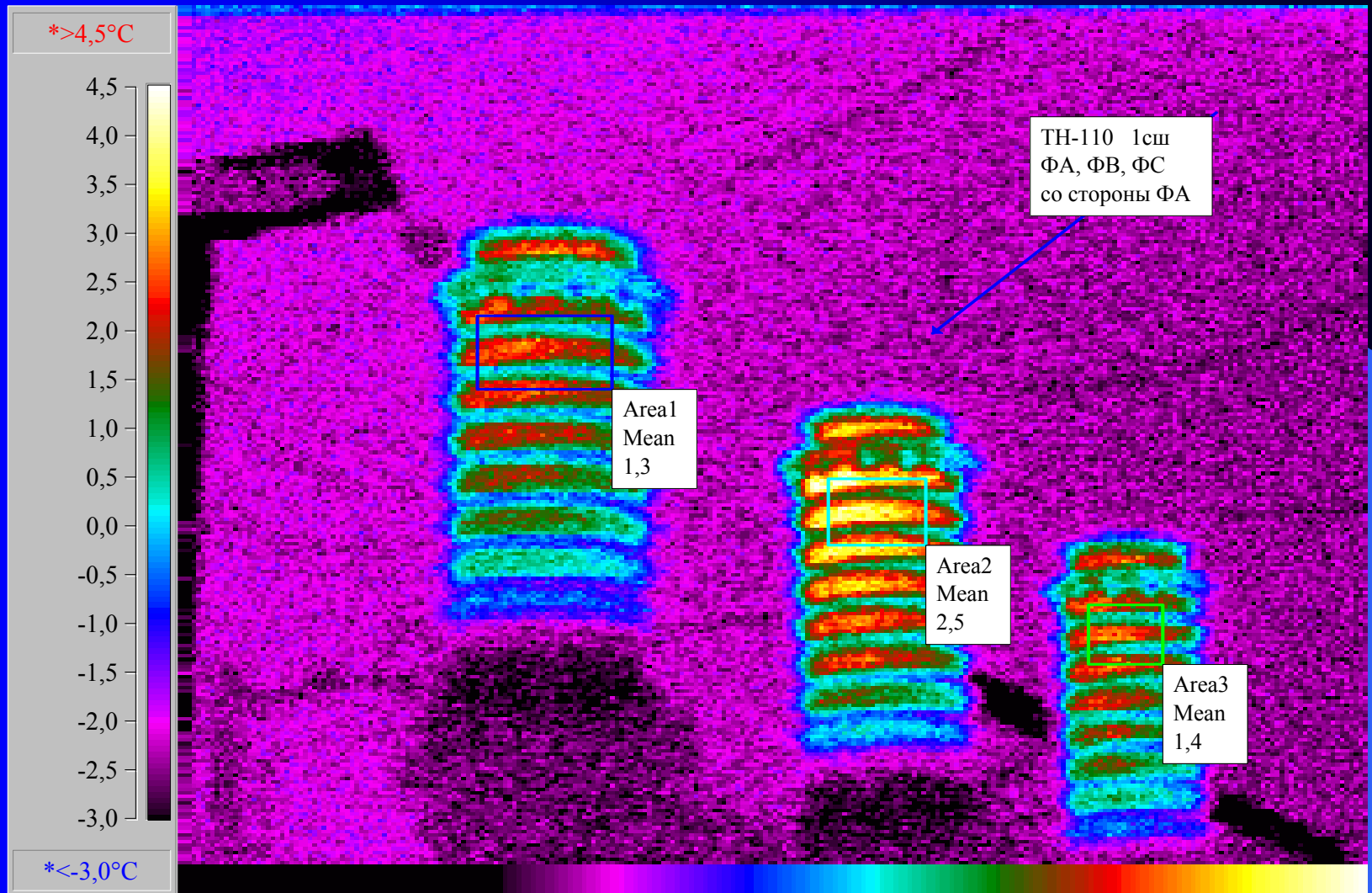
Маслонаполненные вводы



Маслонаполненные вводы



ТН 110 кВ



Уравнение теплового равновесия, преобразованное относительно $\text{tg}\delta$, позволяет вычислить его по измеренному превышению температуры поверхности аппарата (T_x) над температурой окружающей среды (T_0):

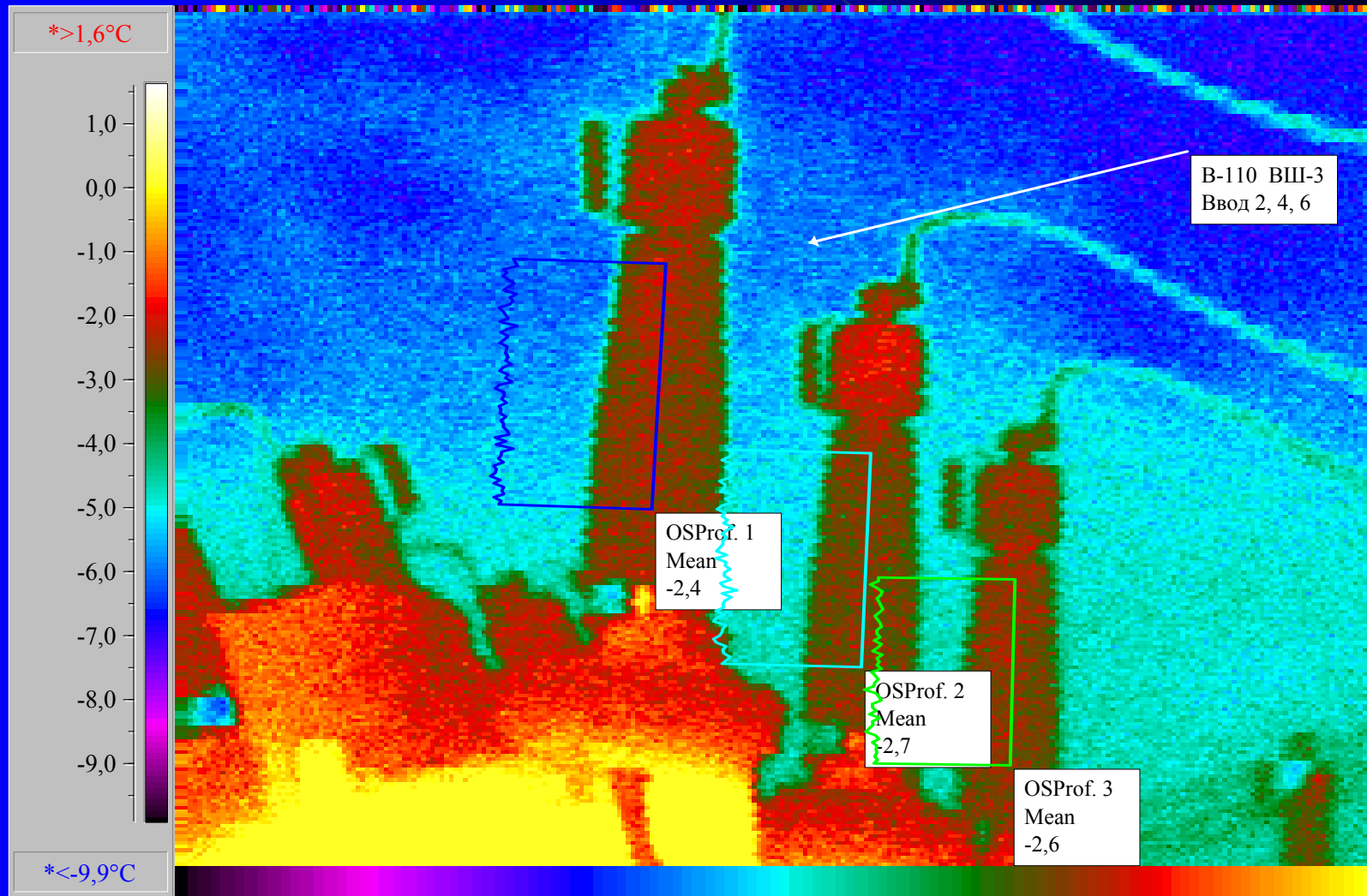
$$\text{tg}\delta_x = \frac{\alpha_{\text{эфф}} \cdot (T_x - T_0) \cdot F}{C \cdot U^2}$$

Уравнение теплового равновесия для таких аппаратов однозначно и линейно связывает величину диэлектрических потерь и превышение температуры изоляционной поверхности над температурой окружающей среды:

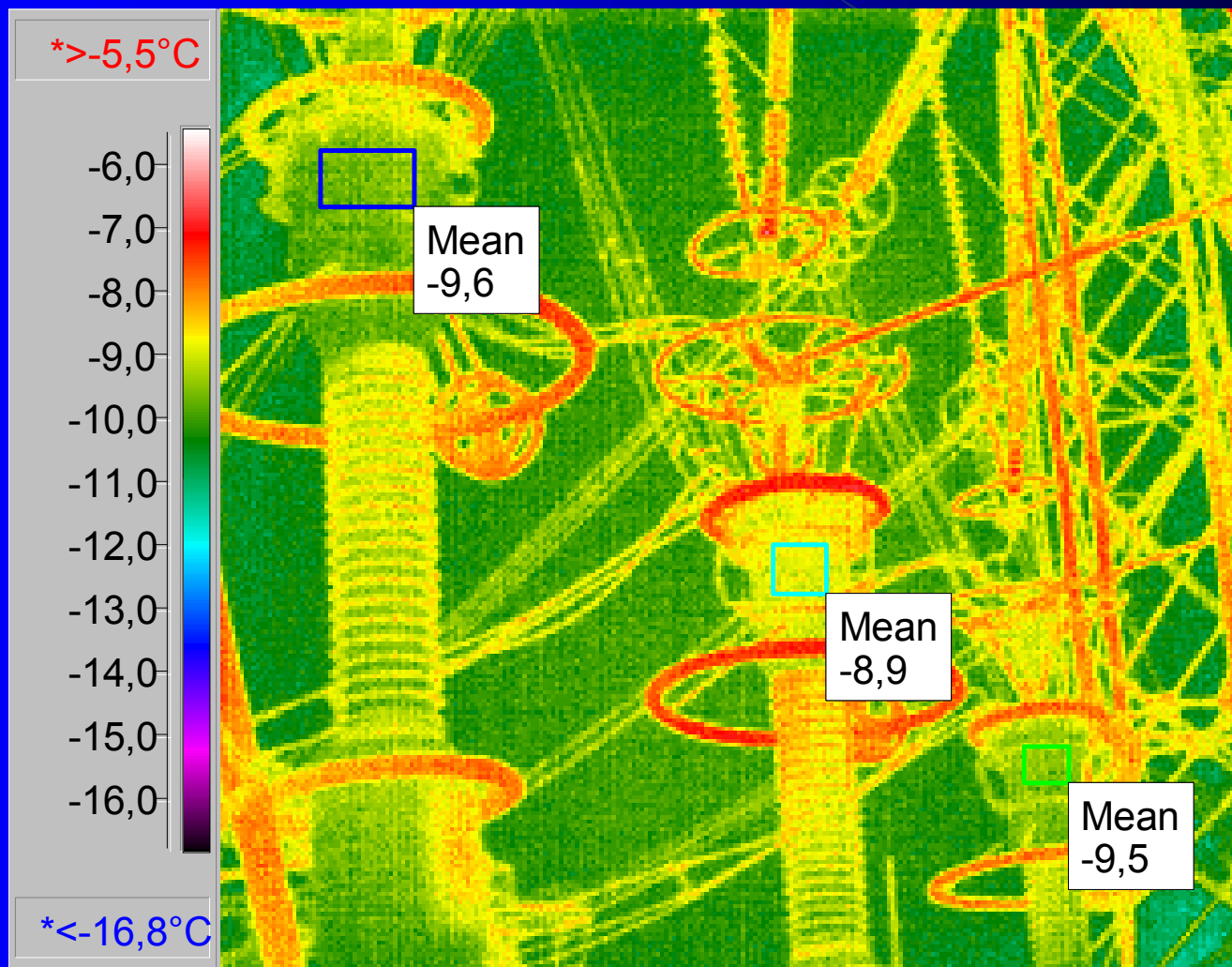
$$\alpha_{\text{эфф}} \cdot (T_x - T_0) \cdot F = \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta \cdot U^2 ,$$

где	$\alpha_{\text{эфф}}$	-	коэффициент эффективного излучения поверхности электрического аппарата, Вт/м · °К;
	U	-	величина напряжения, приложенного к электрическому аппарату, В;
	C	-	емкость электрического аппарата, Ф;
	ω	-	угловая частота приложенного напряжения, 1/с;
	F	-	площадь излучающей поверхности электрического аппарата, м ² ;
	T_x	-	температура поверхности электрического аппарата, °К;
	T_0	-	температура окружающей среды, К.

Вводы МВ 110 кВ



ТТ 750 кВ В-52 Калининской АЭС

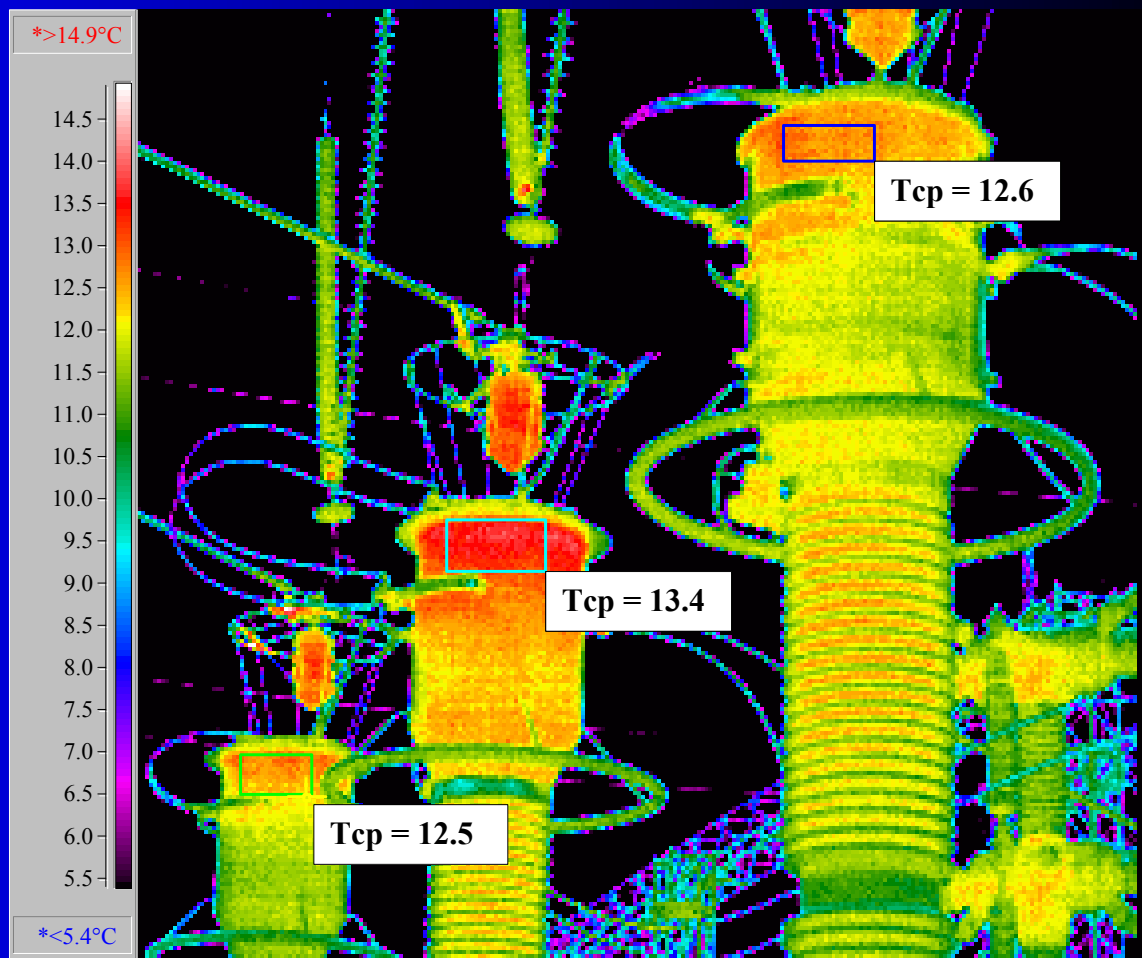


ТТ 750 кВ В-52 Калининской АЭС

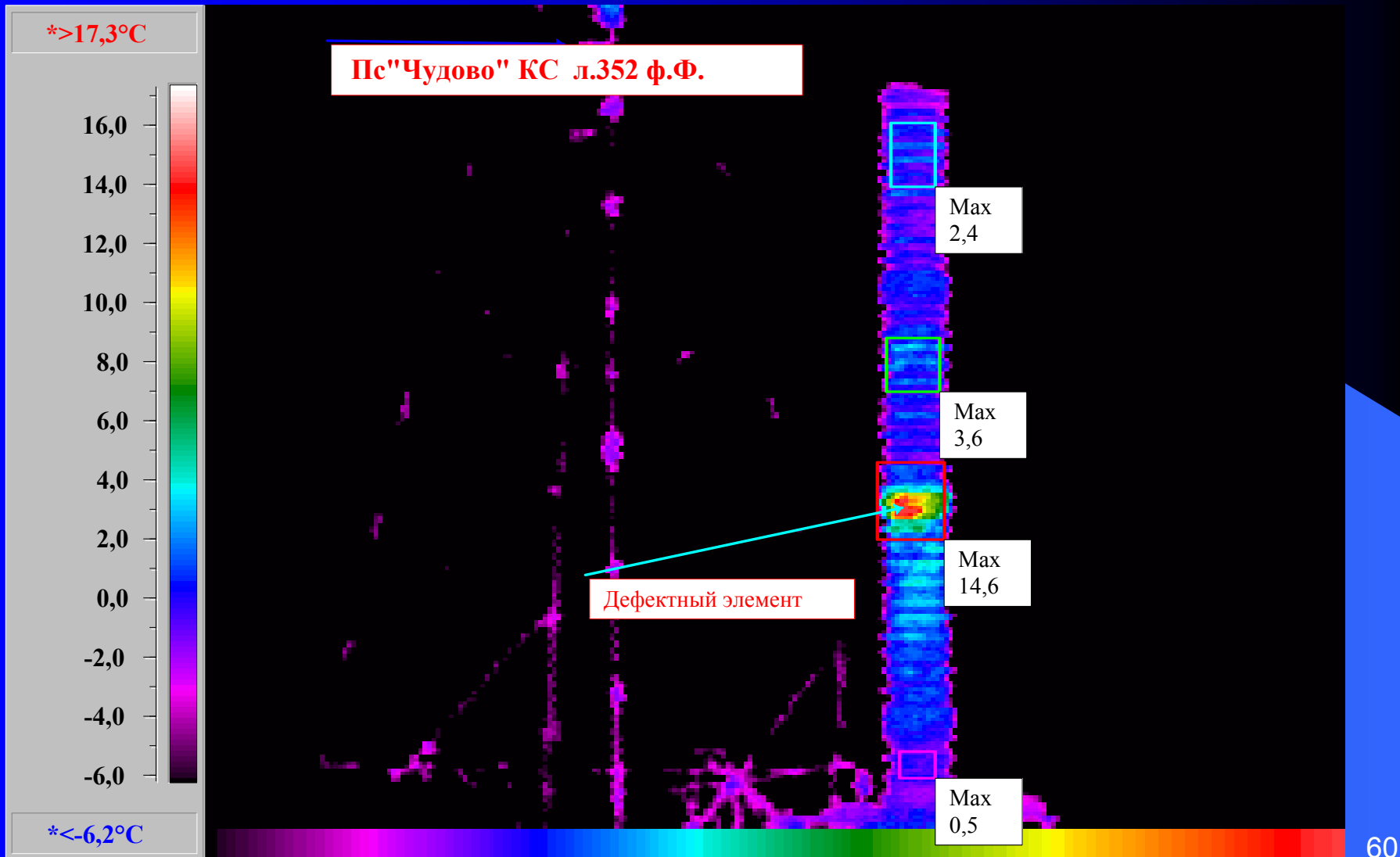
Верхний каскад ТТ фазы "В" отличается по температуре на $0,7^{\circ}\text{C}$ от соседних. Съёмки выполнены 03.02.98 г. ранним утром до восхода солнца коротковолновой камерой типа "THERMACAM-1000" при $T_{\text{ОКР}}=-15^{\circ}\text{C}$ (ночью $T_{\text{ОКР}}=-30^{\circ}\text{C}$). Тем не менее дефект четко выявлен. Через 20 дней ТТ выведен из работы из-за звуков разрядов в масле, выявленных при обходе ОРУ.

Тангенс дельта расчетный фазы В :

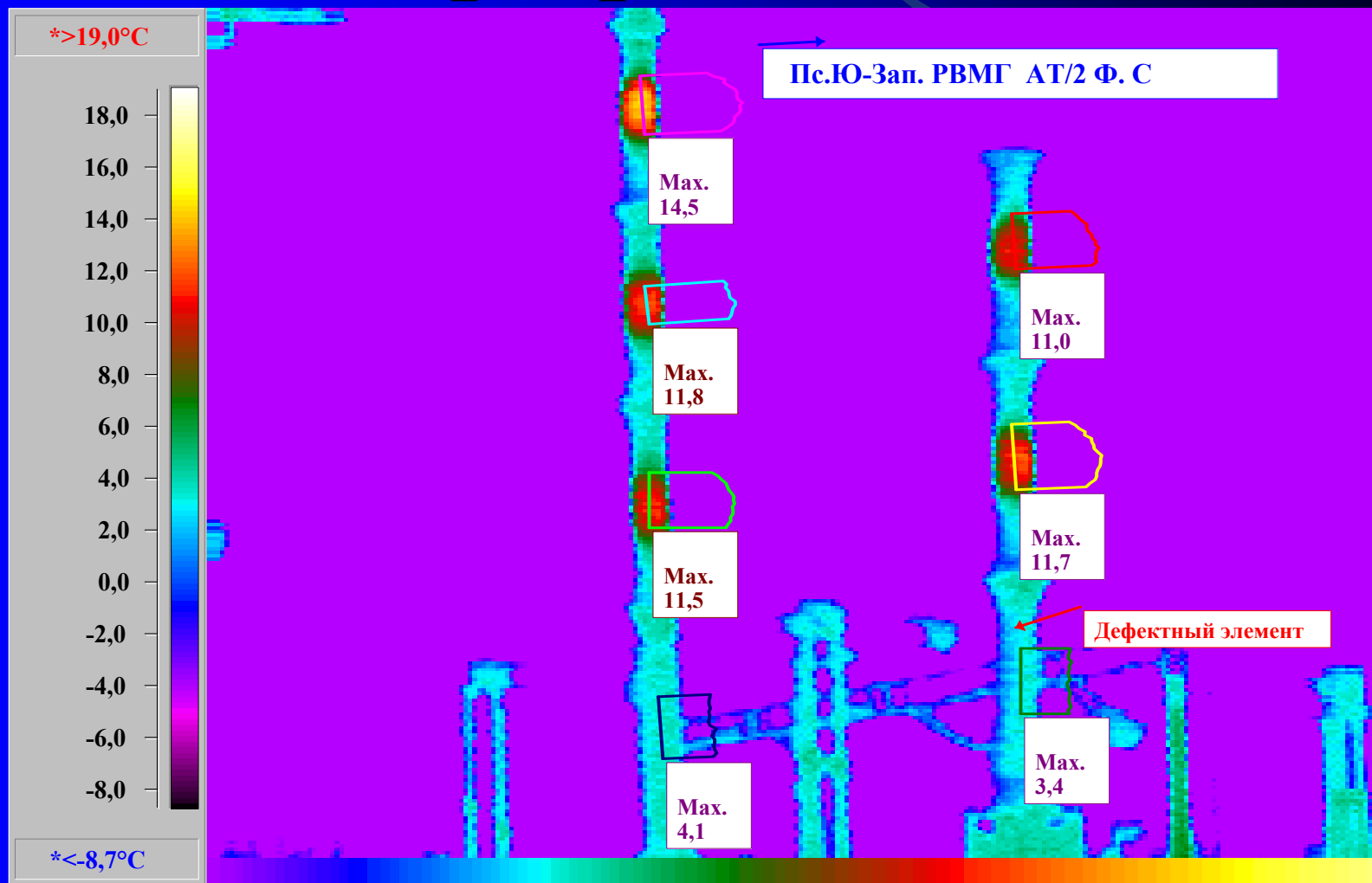
1. По температуре **1.5 %**
2. По влагосодержанию
масла при **10.3 г/т..... 1.7 %**
при **8.6 г/т 1.3 %**



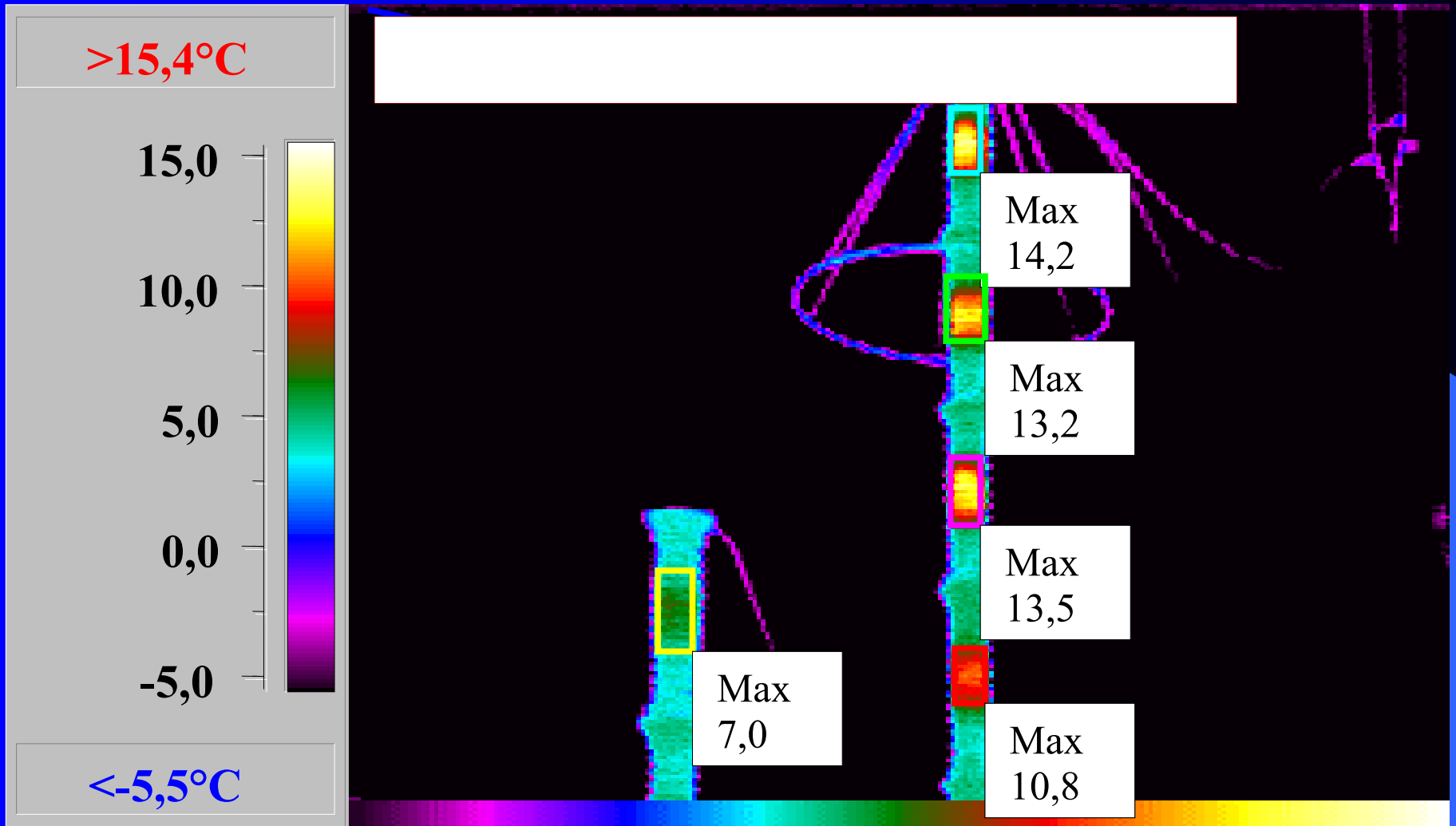
Конденсатор связи 330 кВ



Дефект нижнего 8-го элемента разрядника

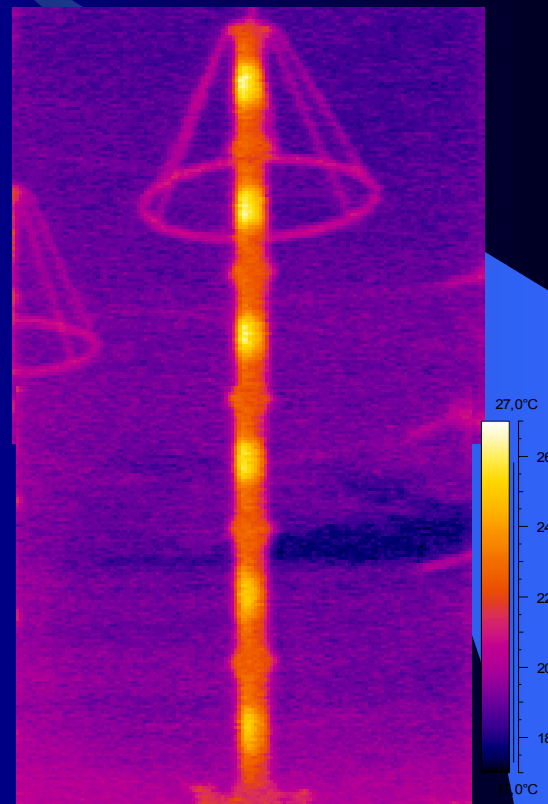


PBMΓ - 330



Разрядник РВМГ-220 (2Т фА)

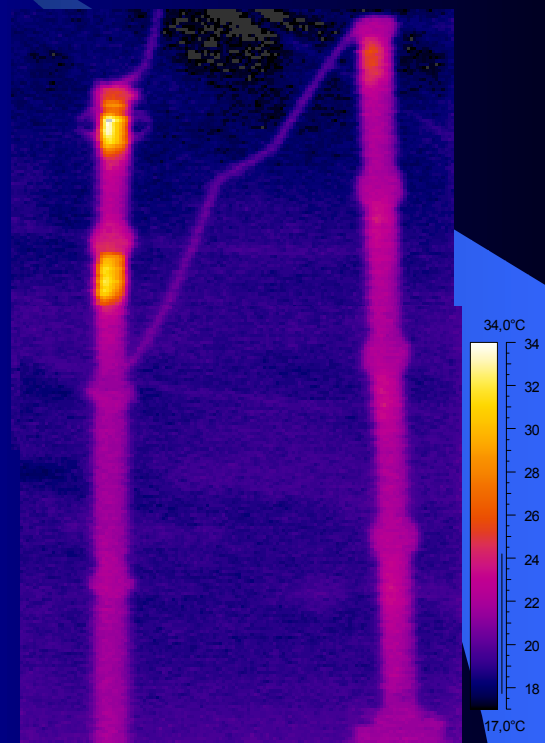
№ элемента	Уэл, кВ
1	23.1
2	23.1
3	22.6
4	22.6
5	19.0
6	19.5



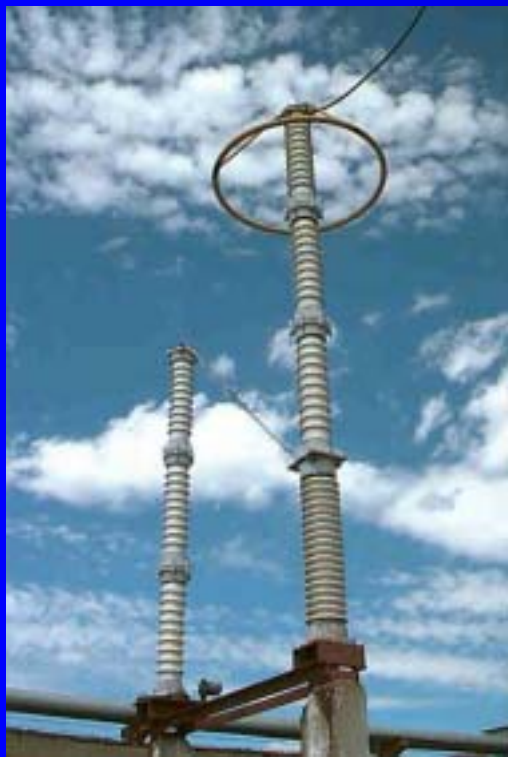
Разрядник РВС-220 (30Т фА)



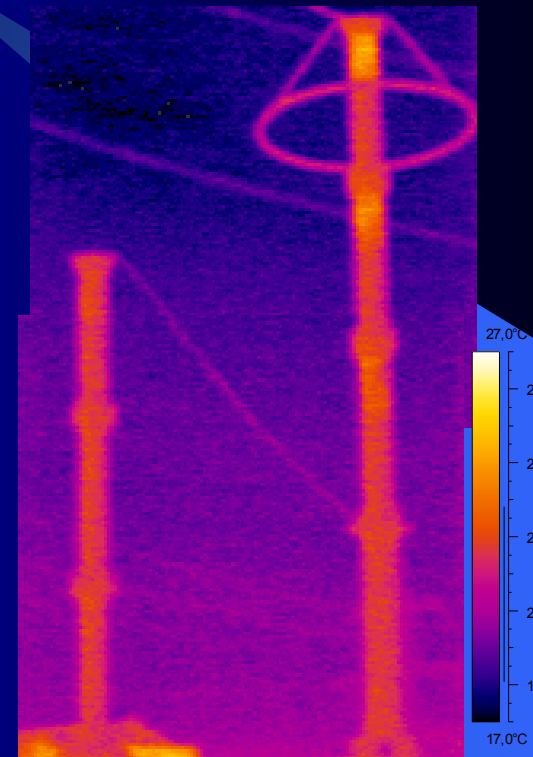
№ элемента	Uэл, кВ
1	40.7
2	37.7
3	17.2
4	11.7
5	11.7
6	10.9



Разрядник РВС-220 (20Т фС)

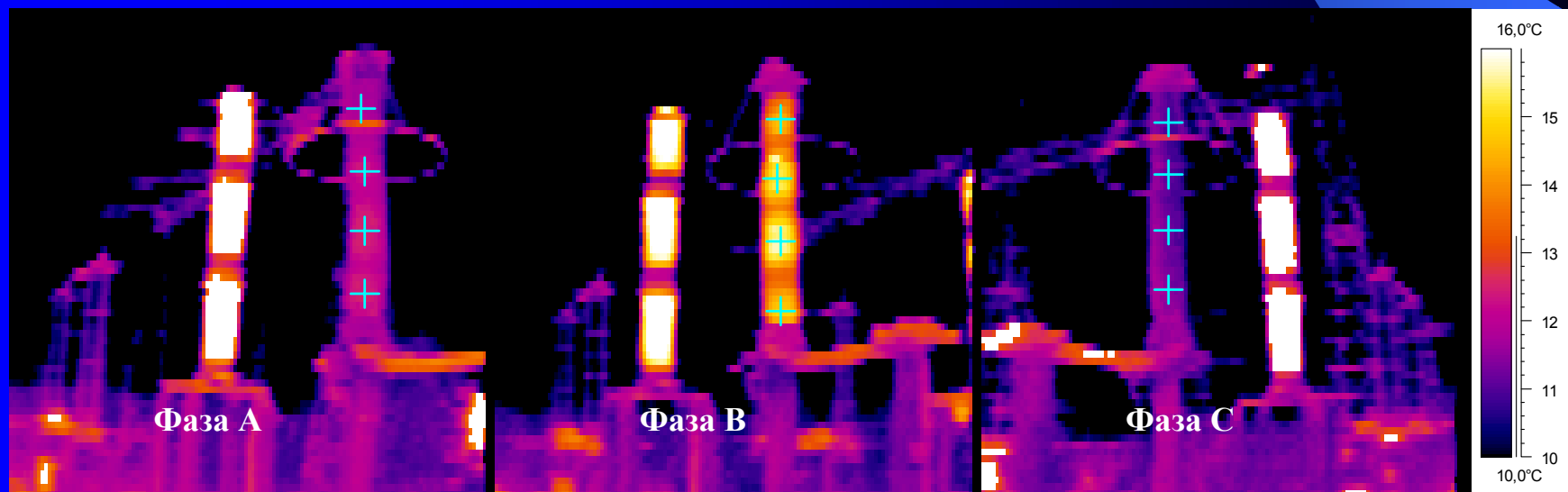


№ элемента	Uэл, кВ
1	35.1
2	28.1
3	19.9
4	16.4
5	15.2
6	15.2

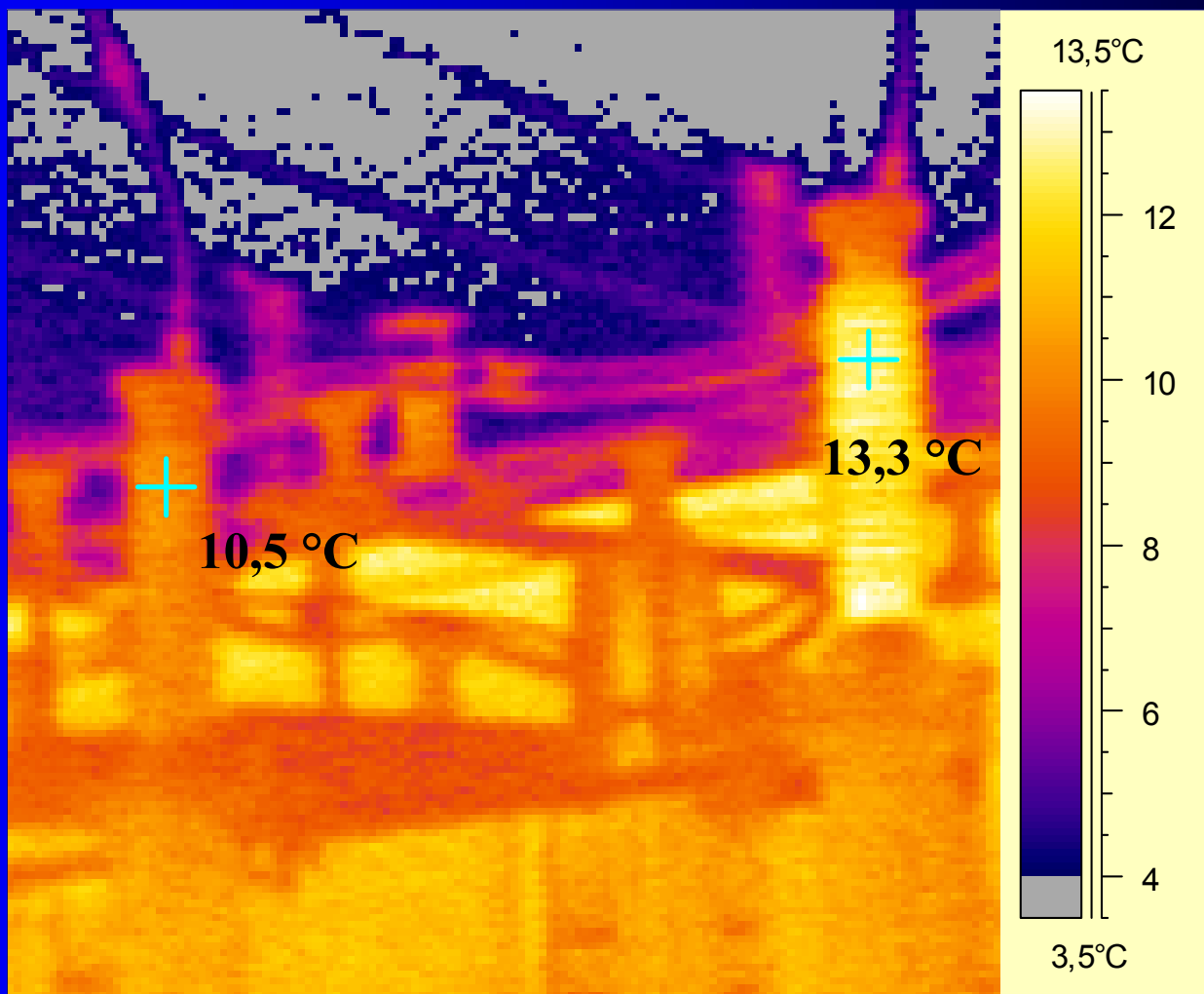


ОПН - 330 кВ 1 С.Ш. ОРУ Кольской АЭС

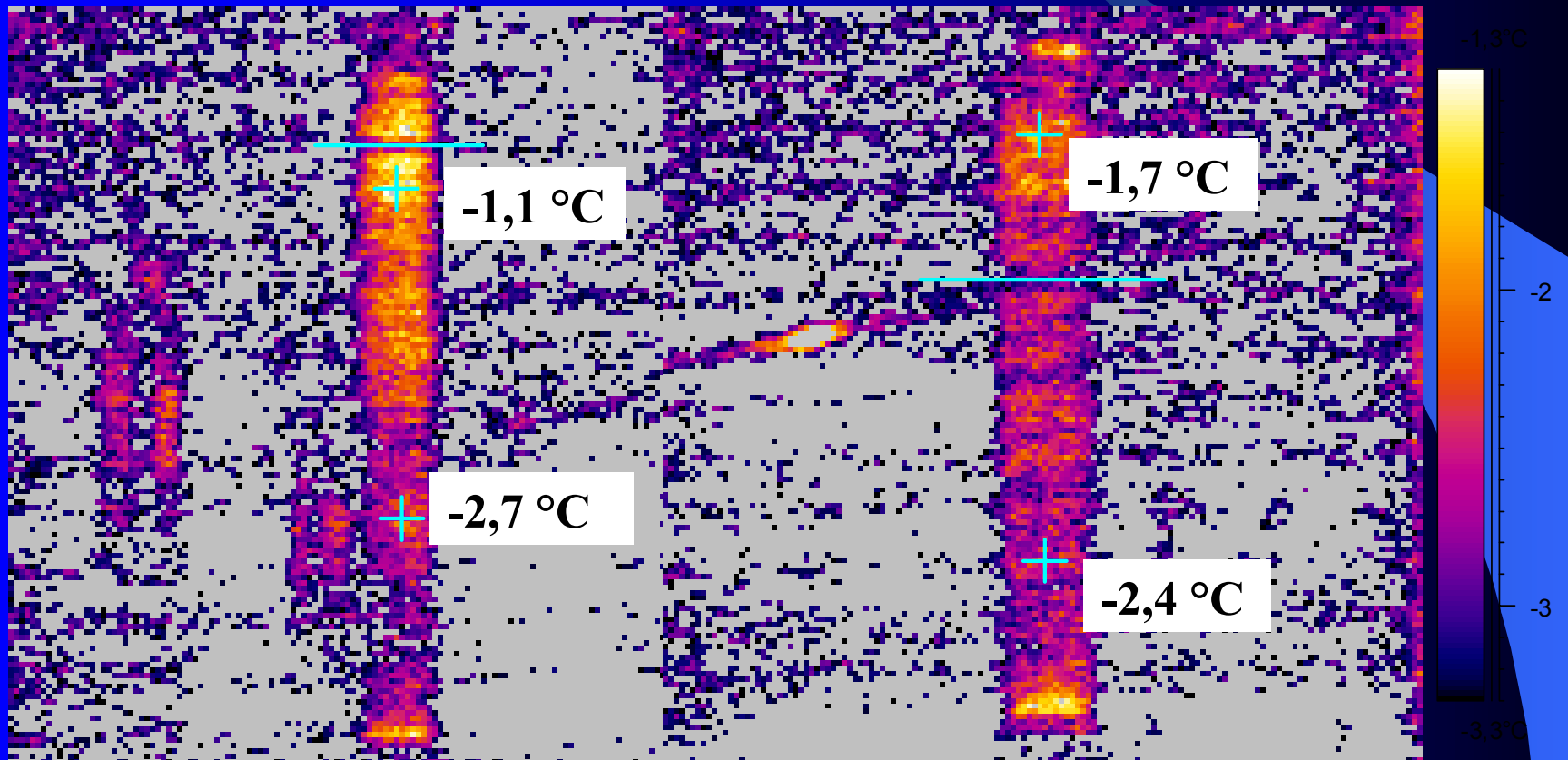
11,8°C	14,5°C	11,0°C
12,4°C	15,3°C	11,1°C
12,5°C	15,7°C	11,3°C
12,5°C	15,0°C	11,5°C



ОПН 110 кВ ПС РПП-1 Череповецких ЭС



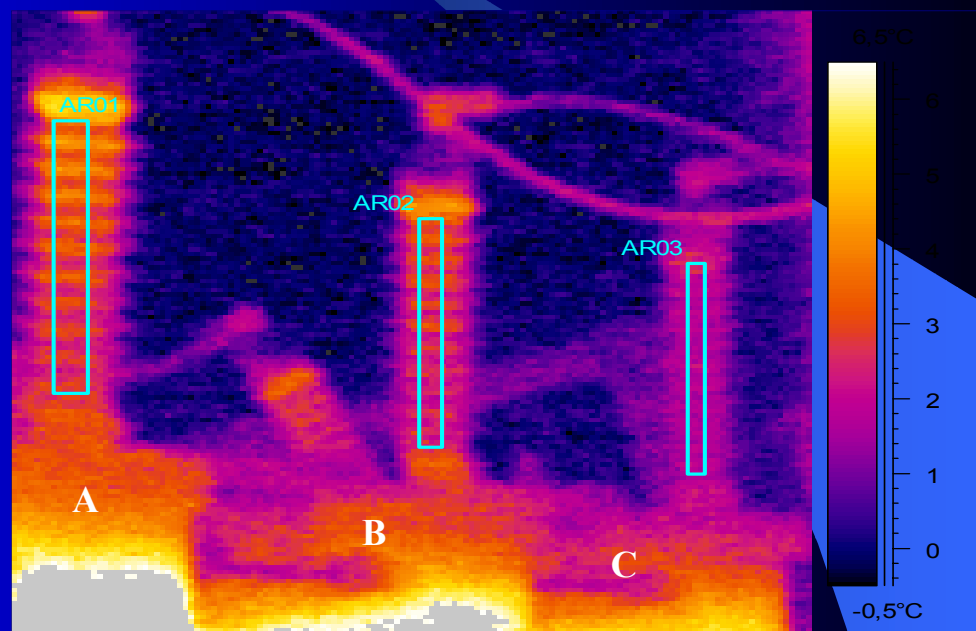
Кольская АЭС ОПН-330 с экранами различной формы



ПС Вологда-ЮжнаяОРУ – 110

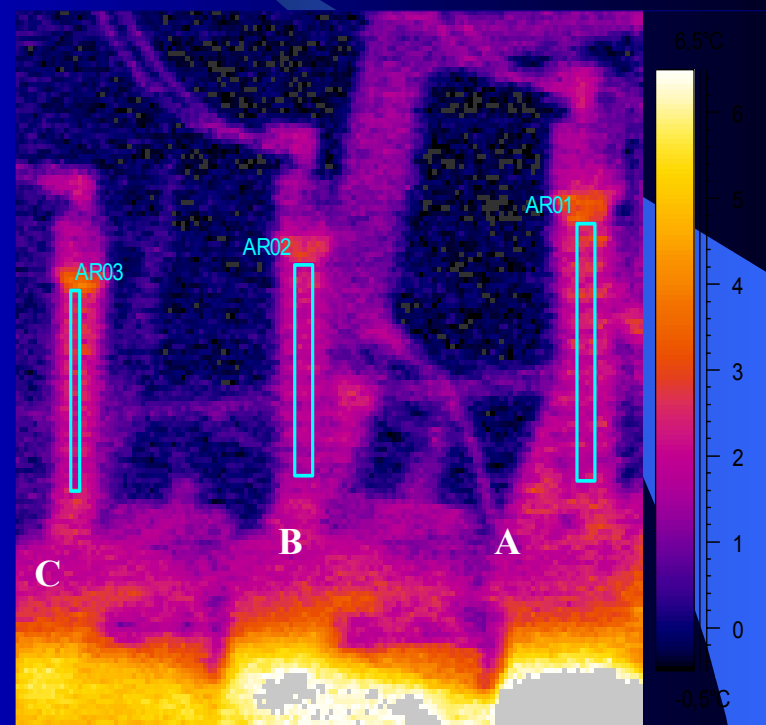
Вводы масляных выключателей АТ-1

Фаза	Эл-т	Макс.	Сред.
А	1	4,7°С	3,1°С
В	1	4,2°С	2,6°С
С	1	2,8°С	1,8°С



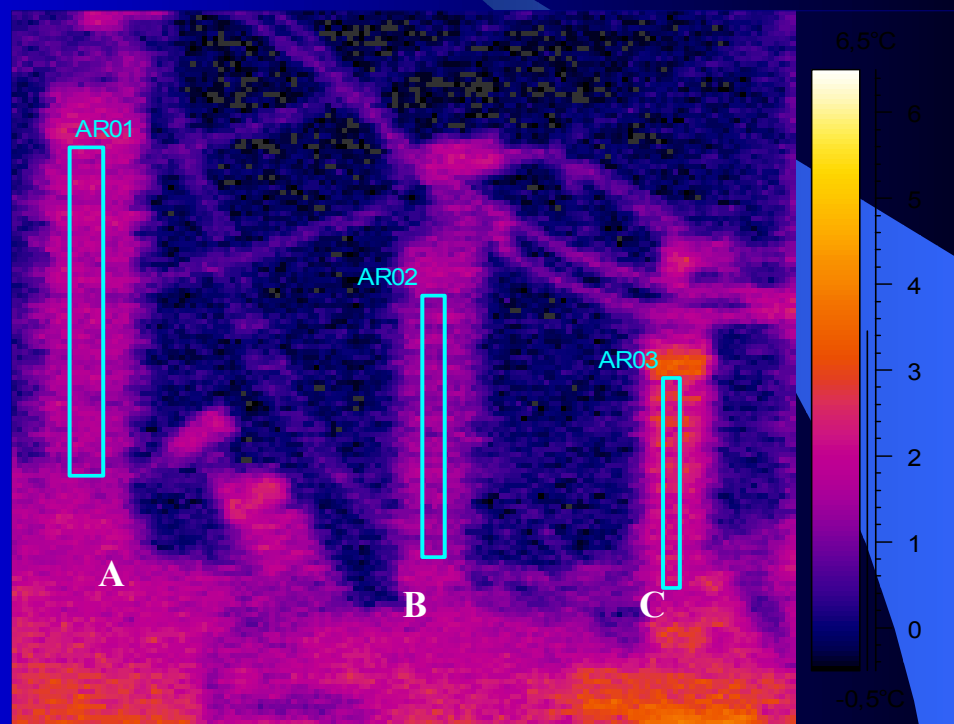
ПС Вологда-ЮжнаяОРУ – 110 Вводы масляных выключателей АТ-1

Фаза	Эл-т	Макс.	Сред.
А	2	3,1°C	2,2°C
В	2	2,7°C	1,9°C
С	2	3,3°C	2,3°C



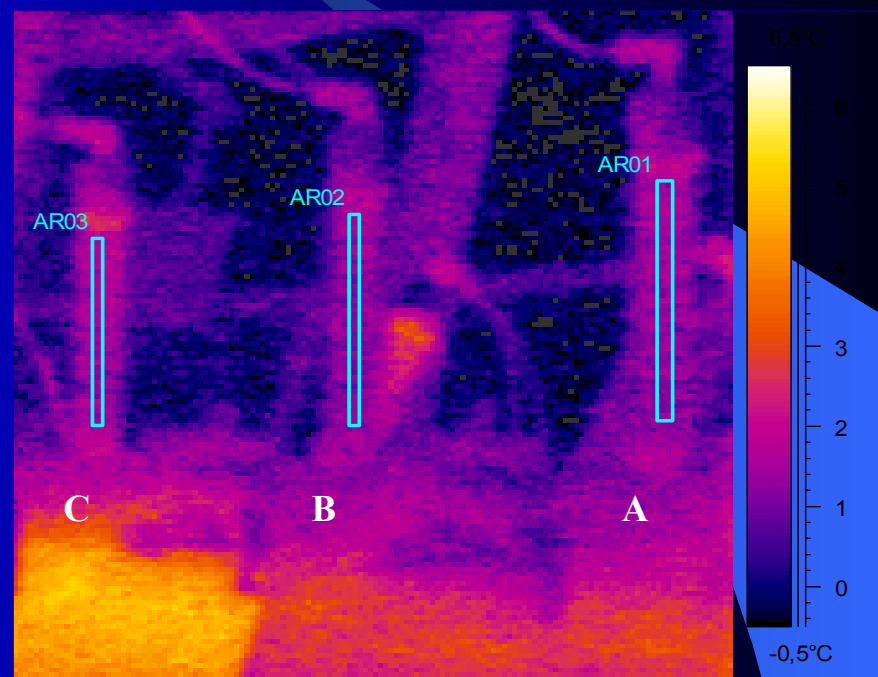
Вводы масляных выключателей АТ-2

Фаза	Эл-т	Макс.	Сред.
А	1	2,3°C	1,6°C
В	1	2,0°C	1,3°C
С	1	3,0°C	2,3°C

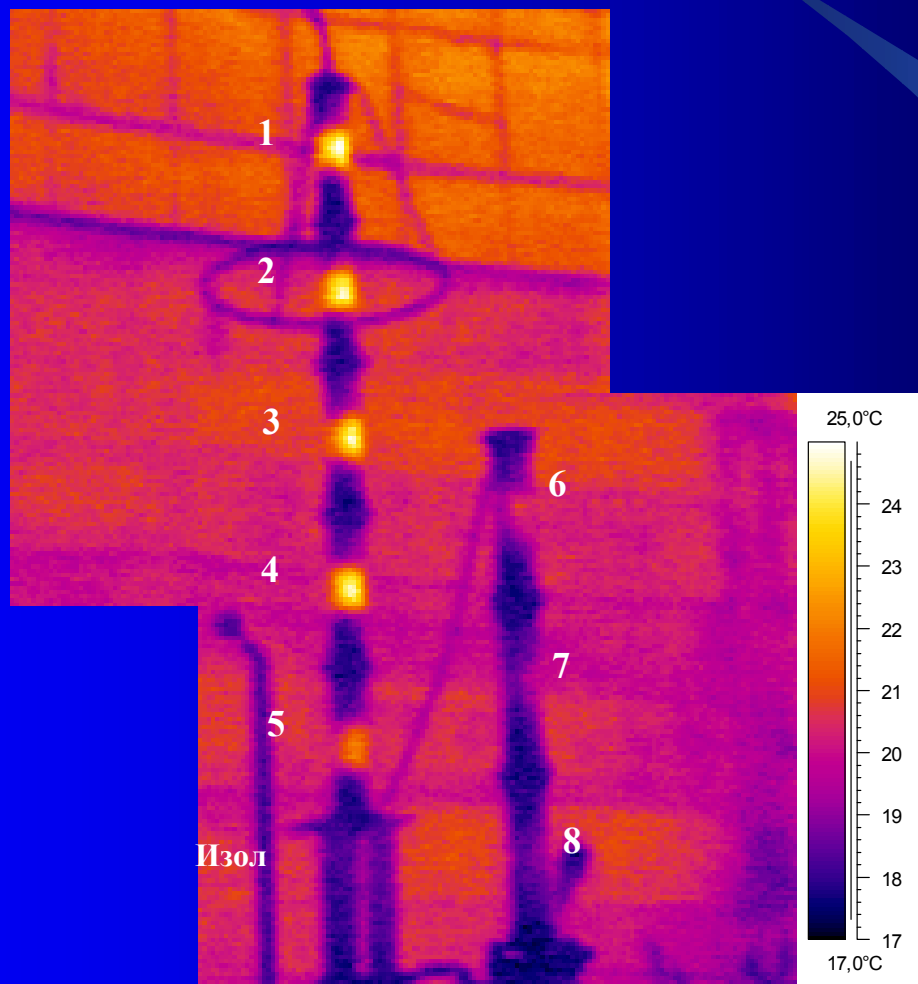


Вводы масляных выключателей АТ-2

Фаза	Эл-т	Макс.	Сред.
А	2	2,0°C	1,4°C
В	2	2,1°C	1,3°C
С	2	2,1°C	1,6°C



Разрядник РВМГ-330 ЗТР фаза С Смоленская АЭС (пристанционный узел)



Разрядники РВМГ 330 АТ-1

Таблица 6-1

фаза А				фаза В				фаза С			
№ эл.	Т	Т - Т _о	Uэл, кВ	№ эл.	Т	Т - Т _о	Uэл, кВ	№ эл.	Т	Т - Т _о	Uэл, кВ
1	14,0	8,9	34,4	1	15,6	10,7	45,1	1	14,2	9,4	45,4
2	14,0	8,9	34,4	2	14,2	9,3	39,2	2	13,2	8,4	40,6
3	14,1	9,0	34,7	3	13,8	8,9	37,6	3	13,5	8,7	42,0
4	12,1	7,0	27,0	4	11,5	6,6	27,8	4	10,8	6,0	29,0
5	10,1	5,0	19,3	5	9,9	5,0	21,1	5	7,0	2,2	10,6
6	8,8	3,7	14,3	6	8,1	3,2	13,5	6	6,9	2,1	10,1
7	9,5	4,4	17,0	7	6,5	1,6	6,8	7	7,0	2,2	10,6
8	10,0	4,9	18,9	8	7,0	2,1	8,9	8	7,2	2,4	11,6
ИЗО- лятор	5,1	Кн=>	2,4	ИЗО- лятор	4,9	Кн=>	6,6	ИЗО- лятор	4,8	Кн=>	4,5

Величину напряжения (U_i) на каждом элементе определяют по формуле

$$U_i = (U_{\phi} \cdot \Delta T_i) / (\sum \Delta T_i),$$

где i - номер элемента ТН;

ΔT_i - превышение температуры элемента ТН над температурой окружающей среды;

$\sum \Delta T_i$ - сумма всех превышений температуры элементов.

Эффективность тепловизионной
диагностики определяется
правильным выбором аппаратуры
и квалификацией оператора