Оригинальное практическое исследование
УДК 536.24:628.32
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ БЕРЕГОВОГО ВЫПУСКА СТОЧНЫХ ВОД МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Илья Александрович Шишкин[1], Лидия Владимировна Романова[2], Халид Османович Барххуев[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, Россия

© Шишкин И. А., Романова Л. В., Барххуев Х. О., 2026

Автор-корреспондент: Х. О. Барххуев, e-mail: axado111@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Цель работы — экспериментально оценить тепловую нагрузку берегового выпуска сточных вод после локальных очистных сооружений и параметры формирования температурного поля в малом водотоке. Натурные исследования выполнены 15 марта 2026 г. на Смолячковом ручье в посёлке Молодёжное Ленинградской области. Измерительная схема включала контактный анализатор BLE-C600, наземный радиометрический тепловизор FLIR ThermaCAM E300 и установленную на беспилотной платформе камеру Seek CompactXR. Съёмку проводили до восхода солнца при температуре воздуха от –0,8 до –0,6 °C и скорости ветра 1,1–1,3 м/с. Зону смешения выделяли по превышению температуры поверхности воды над фоновым уровнем; порог контраста составил 0,6 °C. Сопоставление результатов в шести контрольных точках дало для FLIR среднее смещение +0,43 °C и RMSE 0,51 °C, для Seek — +0,23 и 0,42 °C соответственно. Контактная температура уменьшалась от 6,5 °C на срезе выпуска до 2,0 °C на расстоянии 6 м при фоне 1,0 °C. Площадь поверхностной аномалии равнялась 10,6 м^2, максимальные длина и ширина — 6,8 и 2,4 м. Эмпирическая аппроксимация нормированного контраста экспонентой дала эффективный коэффициент затухания 0,27 м$^{-1}$ и характерную длину 3,7 м. При оценочном расходе 1,0 м^3/ч начальная тепловая мощность потока составила 6,4 кВт. Показано, что совместное применение контактных и тепловизионных измерений позволяет оперативно локализовать температурно возмущённую зону и получить параметры, необходимые для инженерной оценки теплового воздействия. Результаты относятся к одной зимней серии наблюдений и не заменяют расходометрических, гидродинамических и гидрохимических исследований.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, сточные воды, инфракрасная термография, температурное поле, зона смешения, беспилотный летательный аппарат, малый водоток

Для цитирования: Шишкин И. А., Романова Л. В., Барххуев Х. О. Экспериментальная оценка тепловой нагрузки берегового выпуска сточных вод методом инфракрасной термографии // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 60–70. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THERMAL LOAD FROM A SHORE WASTEWATER OUTFALL BY INFRARED THERMOGRAPHY

Ilya Alexandrovich Shishkin[1], Lidia Vladimirovna Romanova[2], Khalid Osmanovich Barkhhuev[2]

[1]Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, 190000, Russia
[2]Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia

Corresponding Author: Kh. O. Barkhhuev, e-mail: axado111@gmail.com

ABSTRACT

The study aims to experimentally assess the thermal load from a shore wastewater outfall after local treatment facilities and the parameters of temperature field formation in a small watercourse. Field investigations were conducted on 15 March 2026 at the Smolyachkov Creek located in the village of Molodyozhnoye, Leningrad Region. The measurement configuration comprised a BLE-C600 contact analyzer, a FLIR ThermaCAM E300 ground-based radiometric thermal imaging system, and a Seek CompactXR camera mounted on an unmanned aerial platform. The survey was conducted before sunrise at –0.8 to –0.6 °C and 1.1–1.3 m/s wind speed. The mixing zone was delineated by the excess of surface water temperature above the background level. The contrast threshold was 0.6 °C. Comparison of the results at six control points gave for FLIR an average bias of +0.43 °C and an RMSE of 0.51 °C, for Seek — +0.23 and 0.42 °C, respectively. The contact temperature decreased from 6.5 °C at the outfall cross-section to 2.0 °C at a distance of 6 m, while the background temperature was 1.0 °C. The surface anomaly area was 10.6 m², with a maximum length and width of 6.8 and 2.4 m, respectively. Empirical approximation of the normalized contrast with an exponential yielded an effective attenuation coefficient of 0.27 m^{-1} and a characteristic length of 3.7 m. The study demonstrates that the combined application of contact and thermal imaging measurements allows the thermally disturbed zone to be rapidly localized and yields the parameters required for an engineering assessment of thermal impact. The results are based on a single winter observation series and are not intended to replace discharge, hydrodynamic or hydrochemical studies.

Keywords: thermal load, wastewater, infrared thermography, temperature field, mixing zone, unmanned aerial vehicle, small watercourse

For citation: Shishkin I. A., Romanova L. V., Barkhuev Kh. O. (2026) 'Experimental assessment of thermal load from a shore wastewater outfall by infrared thermography', Technology and Energy, vol. 3, no. 3, pp. 60–70. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_60–70.

ВВЕДЕНИЕ

Температурное воздействие выпусков сточных вод представляет собой перенос в водный объект не только вещества, но и энтальпии. Даже при нормативном химическом составе локальная тепловая нагрузка изменяет плотностную стратификацию, интенсивность турбулентного перемешивания и кислородный режим приёмника. Для малых водотоков особенно существенны кратковременные и малорасходные выпуски: их вклад трудно характеризовать редкой сетью точечных проб, тогда как пространственная форма температурного возмущения меняется на масштабе нескольких метров. Инфракрасная термография рассматривается как средство быстрого поиска подобных участков; современная полевая апробация показала её применимость для выявления сбросов с обязательной наземной верификацией [1]. Российские исследования беспилотного мониторинга водных объектов также подчёркивают необходимость объединения оптических, тепловых и контактных каналов [2].

Высокое пространственное разрешение беспилотной тепловой съёмки позволяет заполнить масштабный разрыв между контактной точкой и спутниковым пикселем. Для тепловых стоков в ручьях и прибрежных акваториях продемонстрирована возможность картирования градиентов после полевой радиометрической калибровки [3]. Совмещение тепловизионного изображения с сетью погружных датчиков выявляет как локальную поверхностную структуру факела, так и ограничения интерпретации поверхностной температуры в качестве температуры всего водного столба [4]. Поэтому с теплотехнической точки зрения информативен не только факт наличия аномалии, но и её начальный температурный напор, закономерность затухания контраста, геометрические параметры и оценка переносимой тепловой мощности.

Главным метрологическим затруднением является различие между радиационной температурой тонкого поверхностного слоя и контактной температурой воды. Показания неохлаждаемых микроболометрических камер зависят от собственного нагрева корпуса, угла визирования, излучательной способности воды, отражения холодного неба и атмосферного пути. Снижение внешнего нагрева датчика и полевая привязка повышают точность определения температуры воды [5], а сравнительные испытания разных беспилотных тепловизоров показывают, что абсолютная погрешность конкретного канала должна быть установлена в условиях съёмки [6]. Из этого следует практический принцип: для локализации зоны смешения первичным показателем является контраст внутри одного кадра, а абсолютные значения должны контролироваться погружным датчиком.

Тепловые изображения применяются для обнаружения воды в малых руслах [7], картирования выходов грунтовых вод [8], поиска наземных и прибрежных источников тепла с беспилотных платформ [9]

и по космическим данным [10]. Дистанционные методы расширяют охват мониторинга водных объектов [11], а видимый диапазон дополняет тепловой канал при распознавании береговой линии и поверхностных загрязнений [12]. Вместе с тем опубликованные результаты недостаточно описывают малые зимние береговые выпуски с расходом порядка единиц кубических метров в час, для которых температурный контраст велик, а пространственный размер возмущённой зоны мал.

Цель работы — экспериментально оценить тепловую нагрузку берегового выпуска сточных вод после локальных очистных сооружений и параметры зоны смешения по совместным контактным, наземным и аэротепловизионным данным. Для достижения цели решались задачи: (1) сформировать согласованную измерительную схему и условия съёмки, снижающие влияние инсоляции; (2) сопоставить температуры, полученные тремя каналами; (3) определить порог, площадь и линейные размеры поверхностной термоаномалии; (4) рассчитать эффективный коэффициент затухания температурного контраста и оценочную тепловую мощность выпуска. Объект исследования — температурное поле ручья в зоне берегового выпуска; предмет — измеряемые и расчётные параметры переноса теплоты на начальном участке смешения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследован береговой выпуск сточных вод после локальных очистных сооружений «Молодёжное» в Смолячков ручей (пос. Молодёжное, Курортный район Санкт-Петербурга; 60,191703° с. ш., 29,526627° в. д.). Выпуск выполнен трубой, внутренний диаметр которой по визуальной оценке составлял около 0,30 м; глубина потока на срезе — около 0,08 м. Поступление воды имело периодический характер. Общий вид участка приведён на рисунке 1. Вода, прошедшая заглублённые участки сети и сооружения, была теплее почти замерзающего водотока, что формировало положительную поверхностную температурную аномалию.



Рисунок 1. Общий вид берегового выпуска в Смолячков ручей
Figure 1. General view of the coastal discharge into the Smolyachkov Stream

Наблюдения выполнены 15 марта 2026 г. в интервале 06:30–07:10 местного времени во время активной фазы выпуска. Съёмка до восхода солнца исключала прямой солнечный нагрев поверхности. Снежный покров на берегах повышал визуальный тепловой контраст, однако одновременно создавал резкие границы «вода — берег», поэтому при обработке применяли маску водной поверхности. Метеорологические параметры и геометрия измерений приведены в таблице 1. Изменение температуры воздуха за серию не превышало 0,2 °C, а скорость ветра оставалась в диапазоне 1,1–1,3 м/с, что позволяет рассматривать серию как квазистационарную в пределах 40 мин.

Расход выпуска определяли ориентировочно по геометрии видимой струи и скорости её движения; получено $q \approx 1{,}0$ м³/ч (0,278 л/с). Это значение использовано только для оценки порядка тепловой мощности. Поскольку расходомер и профиль скоростей в трубе не применялись, результат не рассматривается как аттестованное измерение расхода и не используется для расчёта массы загрязняющих веществ.

Измерительные каналы и размещение точек. Контактную температуру измеряли многопараметрическим анализатором BLE-C600 с погружным датчиком. Датчик располагали на глубине 0,05 м, выдерживали в точке не менее 60 с и фиксировали среднее трёх последовательных показаний. Дискретность регистрации составляла 0,1 °C; расширенная неопределённость контактного канала принята равной 0,2 °C при коэффициенте охвата $k = 2$.

Таблица 1. Условия выполнения измерительных серий
Table 1. Conditions of the measurement series

Канал	Время	Метеоусловия	Геометрия / режим
Контактный	06:30–06:52	t_a=−0,8 °C; φ=86%; v=1,1 м/с	глубина датчика 0,05 м
Наземный FLIR	06:35–06:55	t_a=−0,7 °C; φ=85%; v=1,2 м/с	дистанция 2 м; высота 1,4 м
Беспилотный Seek	06:56–07:08	t_a=−0,6 °C; φ=84%; v=1,3 м/с	высота 30 м; скорость 2 м/с

Обозначения: t_a — температура воздуха; φ — относительная влажность; v — скорость ветра.

Таблица 2. Характеристики тепловизионных каналов
Table 2. Characteristics of the thermal imaging channels

Параметр	FLIR ThermaCAM E300	Seek CompactXR
Приёмник	неохлаждаемый микроболометр	VOx-микроболометр
Разрешение	320 × 240 пикс.	206 × 156 пикс.
Спектральный диапазон	7,5–13 мкм	7,5–14 мкм
Температурная чувствительность	0,10 °C при 30 °C	не заявлена
Паспортная точность	±2 °C или ±2%	не заявлена
Поле зрения	15° (установленный объектив)	20°
Частота кадров	до 50/60 Гц	менее 9 Гц
Фокусировка	ручная	ручная
Формат данных	радиометрический JPEG	фото/видео смартфона

Наземную радиометрическую серию регистрировали тепловизором FLIR ThermaCAM E300. Аэросъёмку выполняли камерой Seek CompactXR, установленной вместе с двумя оптическими камерами на беспилотной платформе (см. рисунок 2). Основные паспортные характеристики двух тепловых каналов систематизированы в таблице 2 по материалам изготовителей [13, 14]. Поскольку для Seek CompactXR не заявлена метрологическая точность абсолютного измерения температуры и записывался не полноценный радиометрический массив, этот канал использован для пространственной реконструкции и приведён к контактным точкам; независимым радиометрическим каналом считался FLIR.

Паспортные данные приведены для идентификации измерительных каналов; фактическая сопоставимость с контактным каналом оценивалась по полевым данным.

FLIR располагали на расстоянии около 2 м от поверхности при высоте 1,4 м и угле визирования 35–45°. В настройках камеры использовали коэффициент излучения ε=1,00. Для воды реальное значение обычно несколько ниже; поэтому возможное систематическое смещение абсолютной температуры не корректировали по одному предположительному значению ε, а оценили по контактным точкам. При таком подходе диагностическим признаком служит разность температур внутри кадра, полученного при неизменных настройках.

Беспилотный маршрут выполняли на высоте 30 м со скоростью около 2 м/с, продольным перекрытием

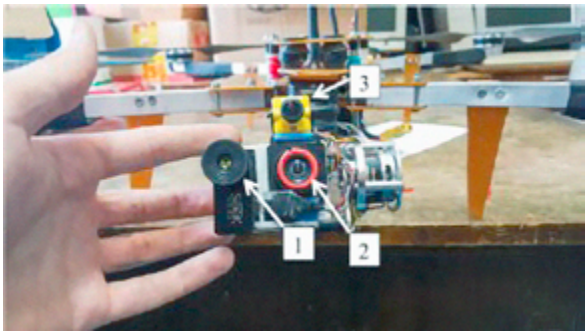


Рисунок 2. Компоновка полезной нагрузки беспилотной платформы
Figure 2. Payload layout of the unmanned platform

80% и поперечным 70%. При поле зрения 20° расчётная ширина полосы составляла 10,6 м, а проекция пикселя на местность — около 0,051 м. Два взаимно перпендикулярных прохода покрывали выпуск и участок русла длиной около 40 м. Точки измерения показаны на рисунке 3: Ф-1 — фон в 30 м выше выпуска; С-1 — срез выпуска; А-1 — центр аномалии; А-2 — её граница; Д-1 — точка на 6 м ниже выпуска; К-1 — контрольная точка без визуально выраженного влияния струи.

Обработка температурных данных. Из радиометрических JPEG-файлов FLIR извлекали 16-битную матрицу сигнала и встроенные параметры преобразования Планка. Для каждого из четырёх кадров анализировали прямоугольную область 106 × 80 пикселей после



Рисунок 3. Схема размещения контрольных точек у берегового выпуска
Figure 3. Layout of control points at the coastal discharge

исключения пикселей берега, снега и растительности. Рассчитывали минимум, среднее, медиану, 95-й процентиль и максимум. Использование процентиля наряду с максимумом уменьшает влияние одиночных горячих пикселей.

Температурный контраст в i-й точке определяли относительно фоновой точки Ф-1:

$$\Delta T_i = T - T_F, \qquad (1)$$

где T_i — температура поверхности или контактная температура в исследуемой точке;
T_F — фоновая температура выше выпуска.

Порог выделения аномалии задавали консервативно как

$$\Delta T_{thr} = max\,(3s_F,\, u_{\Delta T}), \qquad (2)$$

где s_F — стандартное отклонение температуры фоновой области кадра;
$u_{\Delta T}$ — оценка неопределённости разности температур.

Для рассматриваемой серии по исходным матрицам принят $\Delta T_{thr} = 0{,}6$ °C. Связная область водной маски, удовлетворяющая $\Delta T \geq \Delta T_{thr}$ и начинающаяся у среза выпуска, интерпретировалась как поверхностная зона температурного возмущения. Её площадь и максимальные линейные размеры определяли по масштабу беспилотного изображения.

Согласованность дистанционных каналов с контактным оценивали для шести точек. Рассчитывали среднее смещение b, среднюю абсолютную ошибку MAE, среднеквадратическую ошибку RMSE и коэффициент корреляции Пирсона r:

$$b = (1/n)\,\Sigma(T_{IR,\,i} - T_{C,\,i}). \qquad (3)$$

$$MAE = (1/n)\,\Sigma|T_{IR,\,i} - T_{C,\,i}|;$$
$$RMSE = \sqrt{\,[(1/n)\,\Sigma(T_{IR,\,i} - T_{C,\,i})^2]}. \qquad (4)$$

Для теплотехнического описания затухания возмущения использовали нормированный контактный температурный контраст $\theta(x)$ и его экспоненциальную аппроксимацию:

$$\theta(x) = [T\,(x) - T_F] \,/\, [T_S - T_F] \approx exp(-k_{eff}\,x), \qquad (5)$$

где T_S — температура на срезе выпуска;
x — расстояние вниз по течению;
k_{eff} — эффективный коэффициент затухания.

Коэффициент определяли методом наименьших квадратов для $\ln\theta$ при нулевом интерсепте по четырём точкам С-1, А-1, А-2 и Д-1. Характерную длину вычисляли как $L_T = 1/k_{eff}$. Аппроксимация является описательной и не заменяет решение уравнений конвективно-диффузионного теплопереноса, поскольку скорости, глубины и поперечное распределение температуры не измерялись.

Начальную тепловую мощность выпуска относительно фоновой воды оценивали по выражению 6:

$$\dot{Q}_T = \rho c_p q (T_S - T_F) \qquad (6)$$

при $\rho = 1000$ кг/м^3 и $c_p = 4180$ Дж/ (кг·К).

В расчёт подставляли оценочный расход q; поэтому $\dot{Q}_T$ используется как инженерная оценка порядка величины, а не как метрологически подтверждённая энергетическая характеристика выпуска.

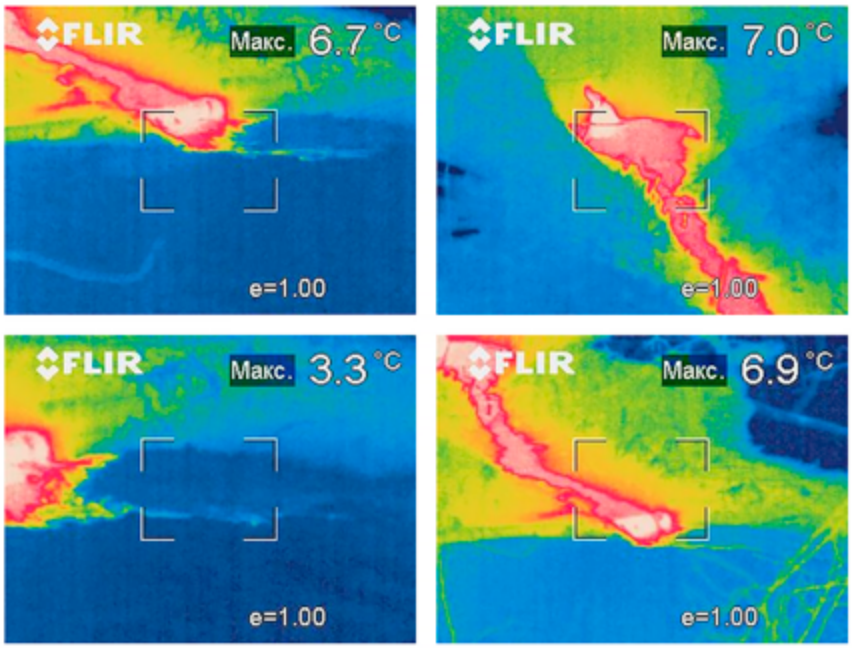


Рисунок 4. Репрезентативные термограммы берегового выпуска: вверху слева — IR_{0070}; вверху справа — IR_{0072}; внизу слева — IR_{0076}; внизу справа — IR_{0079}

Figure 4. Representative thermograms of the coastal discharge: top left — IR_{0070}; top right — IR_{0072}; bottom left — IR_{0076}; bottom right — IR_{0079}

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На всех четырёх радиометрических кадрах FLIR тёплая струя отделялась от более холодной поверхности ручья (рисунок 4). Максимальная температура была локализована у среза сооружения и вдоль начального участка зоны смешения. Кадр IR_{0076} имел иной ракурс и включал меньшую долю горячей области, чем остальные кадры; поэтому его максимум 3,35 °C нельзя интерпретировать как достоверное кратковременное снижение температуры выпуска без синхронного расходометрического наблюдения.

Статистики выбранной измерительной области приведены в таблице 3. Максимумы изменялись от 3,35 до 7,05 °C, а медиана четырёх максимальных значений составляла 6,81 °C. Для трёх кадров с полным охватом струи 95-й процентиль находился в узком диапазоне 6,11–6,24 °C, что устойчивее единичного максимума и согласуется с контактной температурой 6,5 °C у выпуска. Среднее и медиана кадра изменялись сильнее, поскольку зависели от доли фоновой воды внутри фиксированной прямоугольной области.

Сопоставление измерительных каналов. Результаты синхронизированного сопоставления в контрольных точках представлены в таблице 4. На срезе выпуска контактный канал зарегистрировал 6,5 °C при фоне 1,0 °C, то есть исходный температурный напор относительно фоновой воды равнялся 5,5 °C. На расстоянии 6 м контактная температура снизилась до 2,0 °C, однако оставалась на 1,0 °C выше фоновой. Все три канала воспроизводили одинаковую последовательность точек по температуре.

Таблица 3. Статистики радиометрических кадров FLIR в измерительной области, °C

Table 3. Statistics of FLIR radiometric frames in the measurement region, °C

Кадр	Минимум	Среднее	Медиана	P95	Максимум
IR_{0070}	1,05	2,47	1,59	6,24	6,72
IR_{0072}	2,04	4,39	4,39	6,16	7,05
IR_{0076}	1,56	2,12	2,08	2,61	3,35
IR_{0079}	1,65	3,67	3,30	6,11	6,89

P95 – 95-й процентиль распределения температуры пикселей после применения водной маски.

Таблица 4. Температура в контрольных точках по трём измерительным каналам
Table 4. Temperature at control points across three measurement channels

Точка	Положение	Контактный канал, °C	FLIR E300, °C	Seek CompactXR, °C
Ф-1	фон, 30 м выше	1,0 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,7 ± 0,2
С-1	срез, 0 м	6,5 ± 0,1	6,7 ± 0,1	6,3 ± 0,2
А-1	центр, 0,8 м	6,1 ± 0,1	6,5 ± 0,1	6,2 ± 0,2
А-2	граница, 2,5 м	4,2 ± 0,1	4,5 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Д-1	ниже, 6,0 м	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,2
К-1	контроль, 8,0 м	1,1 ± 0,1	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,2

Значения после знака ± воспроизводят разброс повторных показаний исходной серии и не являются доверительными интервалами. Для контактного канала расширенная неопределённость U=0,2 °C (k=2).

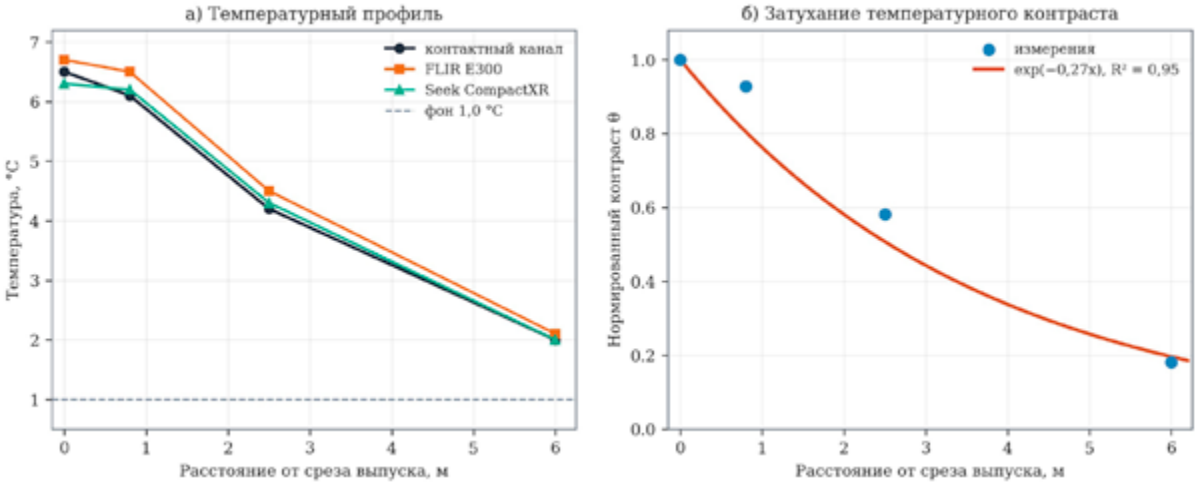


Рисунок 5. Изменение температуры и нормированного температурного контраста вниз по течению. Источник: расчёт автора по данным таблицы 4

Figure 5. Variation of temperature and normalized temperature contrast downstream. Source: calculated by the author from Table 4 data

Продольные профили на рисунке 5а показывают близость трёх каналов в тёплой части диапазона и положительное смещение бесконтактных измерений в холодных фоновых точках. Для FLIR получены $b = +0{,}43$ °C, MAE = 0,43 °C, RMSE = 0,51 °C и $r = 0{,}994$; для Seek — $b = +0{,}23$ °C, MAE = 0,30 °C, RMSE = 0,42 °C и $r = 0{,}994$. Диаграмма согласования приведена на рисунке 6. Высокий коэффициент корреляции обусловлен широким диапазоном 1,0–6,5 °C и малым объёмом выборки $n = 6$; он подтверждает совпадение пространственного тренда, но не является самостоятельной полной метрологической валидацией.

Наибольшие расхождения обоих бесконтактных каналов наблюдались в точках Ф-1 и К-1 с низкой температурой. Для FLIR разность с контактным датчиком там составляла +0,8 °C, для Seek — +0,7 °C. Это согласуется с влиянием отражённого излучения, угла наблюдения, доли береговых пикселей и температурного состояния корпуса неохлаждаемого детектора [5, 6]. В тёплой зоне С-1 — Д-1 расхождения FLIR с контактом не превышали 0,4 °C, Seek — 0,2 °C. Полученная RMSE Seek не должна трактоваться как паспортная точность: значения этого канала были полево привязаны, а выборка содержала те же контрольные точки.

Геометрия зоны смешения и теплотехнические параметры. При пороге $\Delta T_{thr} = 0{,}6$ °C на аэротепловизионной реконструкции выделена одна связная область, начинавшаяся у среза трубы и вытянутая вниз по течению (рисунок 7). Площадь области составила 10,6 м², максимальная длина — 6,8 м, ширина — 2,4 м. Связность с выпуском и монотонное снижение температуры отличают эту область от локальных тёплых фрагментов берега и растительности. Исходные аэроматериалы участка режимного объекта не публикуются; рисунок представляет пространственную реконструкцию по обработанным данным.

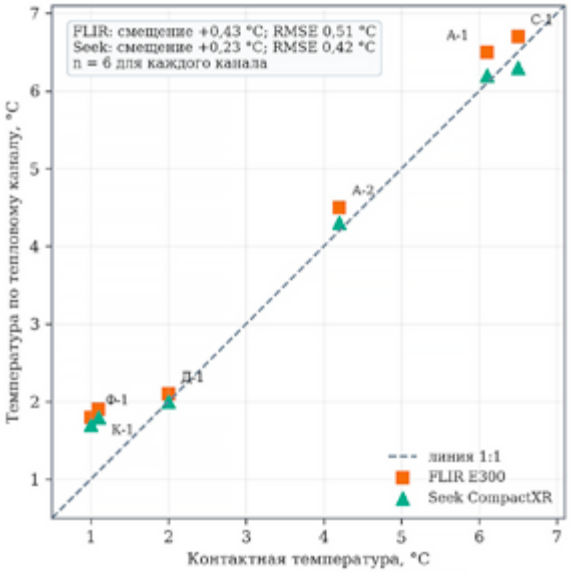


Рисунок 6. Согласование тепловизионных каналов с контактными измерениями в 6 точках. Источник: расчёт автора по данным таблицы 4

Figure 6. Agreement of thermal imaging channels with contact measurements at 6 points. Source: calculated by the author from Table 4 data



Рисунок 7. Реконструкция температурной аномалии в зоне выпуска сточных вод по данным аэротепловизионной съёмки

Figure 7. Reconstruction of the temperature anomaly in the wastewater discharge zone from aerial thermal imaging data

Таблица 5. Итоговые характеристики температурного воздействия выпуска

Table 5. Final characteristics of the thermal impact of the discharge

Показатель	Значение	Статус / основание
Фоновая температура	1,0 °C	контактное измерение, Ф-1
Температура на срезе	6,5 °C	контактное измерение, С-1
Начальный контраст	5,5 °C	расчёт по формуле (1)
Порог аномалии	0,6 °C	расчёт по формуле (2)
Площадь / длина / ширина	10,6 м² / 6,8 м / 2,4 м	обработка аэросъёмки
Эффективный коэффициент затухания	0,27 м$^{-1}$	аппроксимация, n=4
Характерная длина	3,7 м	обратная величина коэффициента
Расход	≈1,0 м³/ч	визуально-геометрическая оценка
Тепловая мощность	≈6,4 кВт	оценка по формуле (6)

Нормированный контактный контраст θ уменьшился от 1,00 на срезе до 0,93 в точке А-1, 0,58 в точке А-2 и 0,18 в точке Д-1. Следовательно, на расстоянии 6 м утрачено около 82% исходного поверхностного температурного контраста. Экспоненциальная аппроксимация четырёх точек дала k_{eff}=0,27 м$^{-1}$, L_T=3,7 м и R^2=0,95 (рисунок 5б). Параметр k_{eff} интегрально отражает совместное действие разбавления, турбулентного переноса и теплообмена с атмосферой и руслом только для данной серии; разделить вклады этих механизмов по имеющимся данным нельзя.

При q=1,0 м³/ч и ΔT_S=5,5 °C по формуле (6) получено $\dot{Q}_T$=6,39 кВт, округлённо 6,4 кВт. Даже небольшая по абсолютной величине мощность создаёт выраженный локальный сигнал из-за малого расхода и низкой фоновой температуры ручья. Основные измеренные и расчётные характеристики сведены в таблице 5. Разделение статуса показателей принципиально: геометрия аномалии получена из обработанного изображения, температуры — измерены, тогда как тепловая мощность и коэффициент затухания рассчитаны с указанными допущениями.

Обсуждение применимости и ограничений. Полученные ошибки дистанционных каналов сопоставимы с опубликованными результатами полевой калибровки недорогих беспилотных тепловизоров. В работе [3]

после линейной привязки к контактным измерениям для ручья и прибрежной акватории получены RMSE 0,43 и 0,42 °C. В настоящей серии RMSE составила 0,51 °C для радиометрического FLIR и 0,42 °C для полево приведённого Seek. Сходство величин подтверждает реалистичность порядка ошибки, но прямое сравнение ограничено различиями камер, диапазонов температур, высоты и процедуры калибровки.

Комбинация поверхности и погружного датчика важна не только для коррекции смещения. Исследования трёхмерного температурного поля показали, что тепловизор регистрирует «кожу» воды и может недооценивать максимум подводной струи [4]. В рассматриваемом случае датчик погружали лишь на 0,05 м, поэтому результаты характеризуют приповерхностный слой и начальный участок смешения. Нельзя утверждать, что выделенный контур совпадает со всей трёхмерной зоной воздействия. Для такого вывода необходимы вертикальные профили, батиметрия и измерение скорости течения.

Выбор предрассветного зимнего окна оказался методически оправдан: он усилил контраст между тёплой водой сети и холодным приёмником и снизил неоднородность от солнечного прогрева. Подобные условия используют при картировании водных выходов [8], а российские беспилотные наблюдения также демонстрируют сильную зависимость температурного изображения от времени суток, поверхности и высоты [9]. Однако зимний контраст нельзя переносить на тёплый сезон: при близких температурах стока и приёмника чувствительность метода снизится, а мелководье и нагретые берега могут давать ложные положительные области.

Практическое назначение предложенной измерительной схемы — инженерное экспресс-обследование: локализация выпуска, выделение приоритетной зоны для пробоотбора и получение исходных параметров для последующего расчёта теплопереноса. Температурная аномалия сама по себе не доказывает превышение нормативов по составу сточных вод и не раскрывает химическую природу загрязнения. Она также может быть вызвана грунтовым притоком, мелководьем или локальным теплообменом с сооружениями, поэтому обязательны проверка связности аномалии с выпуском, контрольная точка выше по течению и подтверждение контактными измерениями.

К ограничениям исследования относятся одна дата наблюдений, четыре радиометрических кадра, шесть контрольных точек, отсутствие независимой контрольной серии для калибровки Seek, оценочный расход, отсутствие профилей скорости и температуры по глубине, а также непубликация исходной беспилотной мозаики. Поэтому k_{eff} и $\dot{Q}_T$ не следует использовать как нормативные или годовые характеристики объекта. Для дальнейшей верификации необходимы повторные съёмки в разные сезоны и при разных расходах, радиометрический беспилотный тепловизор, измеритель расхода, несколько погружных логгеров по глубине, термостабильные наземные реперы и независимое разделение точек калибровки и проверки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным одной зимней натурной серии установлено, что береговой выпуск сточных вод после локальных очистных сооружений формировал устойчивое положительное температурное возмущение поверхности Смолячкова ручья. При фоне 1,0 °C температура на срезе выпуска составляла 6,5 °C, а на расстоянии 6 м — 2,0 °C. При пороге контраста 0,6 °C площадь связной аномалии равнялась 10,6 м², её длина и ширина — 6,8 и 2,4 м.

Сопоставление шести точек подтвердило воспроизводимость пространственного тренда: для FLIR получены смещение +0,43 °C и RMSE 0,51 °C, для полево приведённого Seek — +0,23 и 0,42 °C. Максимальные систематические расхождения наблюдались на холодном фоне, поэтому для абсолютной термометрии требуется контактная привязка, а для оперативного выделения зоны смешения целесообразно использовать внутрикадровый температурный контраст.

Нормированный контраст на участке 0–6 м описан экспонентой с эффективным коэффициентом 0,27 м$^{-1}$ и характерной длиной 3,7 м ($R^2 = 0{,}95$; $n = 4$). При оценочном расходе 1,0 м³/ч начальная тепловая мощность выпуска составила около 6,4 кВт. Эти расчётные параметры пригодны для постановки последующих гидротеплотехнических измерений и выбора границ детального обследования, но из-за ограниченного объёма данных не являются нормативными характеристиками объекта.

Таким образом, совместная контактная, наземная радиометрическая и беспилотная тепловая съёмка может применяться в экологическом инжиниринге как этап экспресс-оценки теплового воздействия малых выпусков. Для перехода от поверхностной диагностики к полному балансу теплоты методика должна быть дополнена прямым измерением расхода, скоростей и вертикального распределения температуры.

Список литературы

1. Калюжин А. С., Морозова М. А., Замараев В. С., Синицына О. О. Обнаружение несанкционированного сброса сточных вод в поверхностный водный объект методом

инфракрасной термографии // Гигиена и санитария. 2025. Т. 104, № 10. С. 1257–1262. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-10-1257-1262.
2. Шишкин И. А., Бархуев Х. О., Жильникова Н. А., Березина А. А., Смирнова В. О. Методы и средства дистанционной идентификации показателей качества воды в водном объекте с применением беспилотных летательных аппаратов // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 1 (55). С. 62–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-62-70.
3. Baek S., Jung J., Jung H.-S. High-Resolution Mapping of Thermal Effluents in Inland Streams and Coastal Seas Using UAV-Based Thermal Infrared Imagery // Remote Sensing. 2026. Vol. 18, No. 8. Art. 1121. DOI: 10.3390/rs18081121.
4. Loerke E., Wilkinson M., Pohle I., Daalmans R., Addy S., Geris J. Integration of Thermal Infrared Imagery With an In Situ Sensor System Reveals Effects of Thermal Discharge Against Natural Background Variations in Water Temperature // River Research and Applications. 2025. Vol. 41, No. 10. P. 2092–2106. DOI: 10.1002/rra. 70021.
5. O'Sullivan A. M., Kurylyk B. L. Limiting External Absorptivity of UAV-Based Uncooled Thermal Infrared Sensors Increases Water Temperature Measurement Accuracy // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 24. Art. 6356. DOI: 10.3390/rs14246356.
6. Niwa H. Comparison of the Accuracy of Two UAV–Mounted Uncooled Thermal Infrared Sensors in Predicting River Water Temperature // River Research and Applications. 2022. Vol. 38, No. 9. Pp. 1660–1667. DOI: 10.1002/rra. 4027.
7. Micieli M., Botter G., Mendicino G., Senatore A. UAV Thermal Images for Water Presence Detection in a Mediterranean Headwater Catchment // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, No. 1. Art. 108. DOI: 10.3390/rs14010108.
8. Watts C. L., Hatch C. E., Wicks R. Mapping Groundwater Discharge Seeps by Thermal UAS Imaging on a Wetland Restoration Site // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol. 10. Art. 946565. DOI: 10.3389/fenvs. 2022.946565.
9. Лунина О. В., Гладков А. А. Первые результаты тепловизионной съёмки геологических объектов на Байкале с использованием квадрокоптера // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506, № 1. С. 73–78. DOI: 10.31857/S2686739722600771.
10. Гурулев А. А., Замана Л. В., Куклин А. П., Казанцев В. А. Выявление термальных источников с использованием космических методов исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
11. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С., Виноградов К. П., Боголюбова А. А. Мониторинг водных объектов дистанционными методами // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 2. С. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
12. Барабанова Е. А., Вытовтов К. А., Гладких Т. Я., Мигачев А. Н. Экологический мониторинг загрязнений водной поверхности в видимом диапазоне с использованием БПЛА // Физические основы приборостроения. 2022. Т. 11, № 4 (46). С. 60–67. EDN: JEVQFL.
13. FLIR Systems AB. ThermaCAM E300: Technical Specifications. Danderyd, Sweden, 2006. URL: https://www. grimas. hu/wp-content/uploads/2014/02/SiteCollectionImages/700_FLIR/ThermaCAM_E300_hokamera/ThermaCAM_E300_infra_hokamera_EN.pdf (дата обращения: 11.04.2026).
14. Seek Thermal, Inc. Seek CompactXR: Technical Summary and Key Specifications. Santa Barbara, USA, 2015. URL: https://www. thermal. com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa_web.pdf (дата обращения: 11.04.2026).

References

1. Kalyuzhin A. S., Morozova M. A., Zamaraev V. S. and Sinitsyna O. O. (2025) 'Detection of unauthorized wastewater discharge into a surface water body by infrared thermography', Hygiene and Sanitation, 104 (10), pp. 1257–1262. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-10-1257-1262.
2. Shishkin I. A., Barkhkhuev Kh. O., Zhilnikova N. A., Berezina A. A. and Smirnova V. O. (2024) 'Methods and means of remote identification of water quality indicators in a water body using unmanned aerial vehicles', Environmental Control Systems, 1 (55), pp. 62–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-1-62-70.
3. Baek S., Jung J. and Jung H.-S. (2026) 'High-resolution mapping of thermal effluents in inland streams and coastal seas using UAV-based thermal infrared imagery', Remote Sensing, 18 (8), art. 1121. DOI: 10.3390/rs18081121.
4. Loerke E., Wilkinson M., Pohle I., Daalmans R., Addy S. and Geris J. (2025) 'Integration of thermal infrared imagery with an in situ sensor system reveals effects of thermal discharge against natural background variations in water temperature', River Research and Applications, 41 (10), pp. 2092–2106. DOI: 10.1002/rra. 70021.
5. O'Sullivan A. M. and Kurylyk B. L. (2022) 'Limiting external absorptivity of UAV-based uncooled thermal infrared sensors increases water temperature measurement accuracy', Remote Sensing, 14 (24), art. 6356. DOI: 10.3390/rs14246356.
6. Niwa H. (2022) 'Comparison of the accuracy of two UAV-mounted uncooled thermal infrared sensors in predicting river water temperature', River Research and Applications, 38 (9), pp. 1660–1667. DOI: 10.1002/rra. 4027.
7. Micieli M., Botter G., Mendicino G. and Senatore A. (2022) 'UAV thermal images for water presence detection in a Mediterranean headwater catchment', Remote Sensing, 14 (1), art. 108. DOI: 10.3390/rs14010108.
8. Watts C. L., Hatch C. E. and Wicks R. (2023) 'Mapping groundwater discharge seeps by thermal UAS imaging

on a wetland restoration site', Frontiers in Environmental Science, 10, art. 946565. DOI: 10.3389/fenvs. 2022.946565.
9. Lunina O. V. and Gladkov A. A. (2022) 'First results of thermal imaging of geological objects on Lake Baikal using a quadcopter', Doklady of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences, 506 (1), pp. 73–78. DOI: 10.31857/S2686739722600771.
10. Gurulev A. A., Zamana L. V., Kuklin A. P. and Kazantsev V. A. (2024) 'Identification of thermal springs using space research methods', Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 21 (2), pp. 131–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-131-140.
11. Mustafin M. G., Valkov V. A., Pavlov N. S., Vinogradov K. P. and Bogolyubova A. A. (2023) 'Monitoring of water bodies by remote methods', Vestnik SGUGiT, 28 (2), pp. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
12. Barabanova E. A., Vytovtov K. A., Gladkikh T. Ya. and Migachev A. N. (2022) 'Ecological monitoring of water surface pollution in the visible range using UAVs', Physical Foundations of Instrument Engineering, 11, 4 (46), pp. 60–67. EDN: JEVQFL.
13. FLIR Systems AB (2006) ThermaCAM E300: Technical Specifications. Danderyd, Sweden. Available at: https://www. grimas. hu/wp-content/uploads/2014/02/SiteCollectionImages/700_FLIR/ThermaCAM_E300_hokamera/ThermaCAM_E300_infra_hokamera_EN.pdf (Accessed: 11 April 2026).
14. Seek Thermal, Inc. (2015) Seek CompactXR: Technical Summary and Key Specifications. Santa Barbara, USA. Available at: https://www. thermal. com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa_web.pdf (Accessed: 11 April 2026).

Информация об авторах

Шишкин Илья Александрович, *кандидат технических наук, доцент, Институт фундаментальной подготовки и технологических инноваций (Институт ФПТИ), Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; 190000, Россия, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 67, лит. А; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN-код: 7628–5712; AuthorID РИНЦ: 964677; e-mail: _ilya@mail.ru.*

Романова Лидия Владимировна, *кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 7810–2141; AuthorID РИНЦ: 151370; e-mail: lv_romanova@mail.ru*

Бархуев Халид Османович, *инженер экологического компьютерного центра СПбГУПТД, заведующий лабораторией, ассистент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN-код: 7626–1362; AuthorID РИНЦ: 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*

Information about the authors

Shishkin Ilya Aleksandrovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Fundamental Training and Technological Innovations (Institute of FPTI), St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 67, lit. A Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, 190000, Russia; ORCID: 0000-0001-9220-1181; SPIN code: 7628–5712; RSCI AuthorID: 964677; e-mail: _ilya@mail.ru.*

Romanova Lidiya Vladimirovna, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN code: 7810–2141; RSCI AuthorID: 151370; e-mail: lv_romanova@mail.ru.*

Barkhhuev Khalid Osmanovich, *Engineer of the Environmental Computer Center of SPbGUPTD, Head of the Laboratory, Assistant of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; ORCID: 0000-0001-5415-7108; SPIN code: 7626–1362; RSCI AuthorID: 1141753; e-mail: axado111@gmail.com.*