

Многолетние аэрокосмические наблюдения температуры земной поверхности Северо-Западного региона РФ

А. А. Тронин, В. И. Горный, В. Н. Груздев, Б. В. Шилин

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

Рассмотрены специфические для тепловой аэрокосмической съёмки подходы к извлечению информации, заключённой во временных рядах температуры земной поверхности. Особенностью тепловой аэрокосмической съёмки, использующей инфракрасный тепловой диапазон электромагнитных волн является наличие суточной, годовой и многолетней тепловой ритмики экзогенного источника тепла (солнечной радиации), действие которого формирует закономерную тепловую реакцию земной поверхности. Показано, что в последние десятилетия наблюдаются устойчивые многолетние тенденции роста температуры поверхности как у водоёмов, так и урбанизированных территорий. Применение теплоинерционного подхода к анализу временных рядов, отражающих суточные вариации температуры земной поверхности, позволило картировать теплофизические характеристики земной поверхности и на этой основе прогнозировать детальное пространственное распределение её температуры при любых сценариях изменения климата и урбанизации. Отсутствие отечественных измерительных авиационных тепловизионных систем ограничило набор алгоритмов, используемых для извлечения информации, заключённой во временных рядах температуры земной поверхности. Пришлось использовать, в основном, статистические методы выделения аномалий температуры земной поверхности и методы, основанные на изменении ситуации на материалах повторных съёмок (change detection). Тем не менее, технологии применения тепловой аэросъёмки для выявления сбросов промышленных и бытовых вод в акватории рек и контроля технического состояния городских систем теплоснабжения доведены до уровня широкой практической реализации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, температура, тепловые ритмы, временной ряд, изменение климата, урбанизация, информация, прогноз, экологическая безопасность

Одобрена к печати: 03.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-73-96

Введение

Создание многолетних архивов материалов регулярной космической тепловой съёмки спутниками NOAA (AVHRR) и Terra/Aqua (MODIS) открыло возможность строить и анализировать многолетние ряды наблюдений и на этой основе разрабатывать методики решения практических задач различных уровней обзорности, начиная с глобального и континентального уровней (Горный, 2000), заканчивая картированием в масштабе 1:200 000 (Крицук и др., 2016). Материалы тепловой космической съёмки, выполняемой спутниками серии Landsat и Terra (ASTER) (пространственное разрешение 60–90 км, см. ниже табл. 1), позволили приступить к разработке методик детального экологического мониторинга и крупномасштабного геологического картирования (Горный и др., 2013) и поисков месторождений полезных ископаемых (Горный и др., 2014).

За пятидесятилетний срок применения тепловой аэросъёмки при решении различных практических задач мониторинга окружающей среды и состояния экологической безопасности Северо-Западного региона России (Шилин, Тронин, 2015) также накоплен огромный материал, который может быть рассмотрен с позиций анализа временных рядов.

К настоящему моменту опубликовано большое количество работ, посвящённых алгоритмам извлечения информации из материалов аэрокосмических тепловых съёмок (Price, 1982; Saradjian, Akhoondzadeh, 2011; Sekioka, Yuhara, 1974; Singh Ashbindu, 1989; Tramutoli et al., 2015; Watson et al., 1971; Xue, Cracknell, 1995). Во многих случаях используется легко реализуемый статистический метод выделения аномалий температуры земной поверхности над уровнем фона и анализ изменений теплового состояния земной поверхности по повторным

съёмкам (change detection) (Singh Ashbindu, 1989; Tramutoli et al., 2015). Следует отметить пионерские работы К. Ватсона (Watson, 1971), применившего к анализу материалов тепловой аэрокосмической съёмки теплоинерционный подход, разработанный Дж. К. Егером (Jaeger, 1953) для моделирования температуры поверхности Луны. Этот алгоритм использует закономерности суточной тепловой ритмики земной поверхности при анализе тепловых аэрокосмических материалов. На его основе ещё в эпоху фоторегистрации разработана методика проведения тепловой аэросъёмки, позволившая на качественном уровне анализа использовать теплоинерционный подход (Горный и др., 1993). Дальнейшим развитием этого направления явилось повышение «глубинности» тепловой аэрокосмической съёмки на основе анализа закономерностей годовой тепловой ритмики (Горный и др., 1993), разработка и широкая реализация технологии картирования теплофизических характеристик земной поверхности: тепловой инерции, теплового потока, скорости испарения, коэффициента излучения, альbedo (Горный, 2004; Cracknell, Хуе, 1996). Тем не менее до настоящего времени при анализе материалов тепловой аэрокосмической съёмки не были показаны возможности комплексного использования закономерностей изменения температуры земной поверхности, вызванные воздействием как многолетних изменений климата, так и годовых и суточных тепловых ритмов. Поэтому целью настоящей статьи является демонстрация возможностей комплексного анализа временных закономерностей изменения температуры земной поверхности, регистрируемых многократными тепловыми аэрокосмическими съёмками. Её актуальность обусловлена расширением и доступностью архивов тепловой аэрокосмической съёмки, что определяет возможность широкой практической реализации комплексного подхода.

1. Технические средства, материалы и методы

1.1. Характеристики съёмочных систем и материалов съёмки

1.1.1. Космическая тепловая съёмка

Впервые гражданская спутниковая система дистанционного зондирования Земли, имевшая инфракрасные тепловые каналы, была установлена на метеорологическом спутнике TIROS-N, запущенном в 1978 г. (Cracknell, 1997). В настоящее время тепловая космическая съёмка выполняется несколькими космическими аппаратами (Тронин, Шилин, 2015). Для изучения многолетних тенденций в изменениях температуры земной поверхности нами использовались две спутниковые системы: NOAA/AVHRR и AQUA/MODIS (табл. 1). Обе системы имеют близкие технические характеристики и обеспечивают абсолютную ошибку определения температуры не хуже 0,1 К. Значительно реже для мониторинга многолетних изменений температуры земной поверхности использовались данные спутников Landsat и Terra (ASTER).

Таблица 1. Технические характеристики материалов тепловой космической съёмки (Cracknell, 1997; Brown, Minnett, 1999)

| Характеристики | NOAA (AVHRR) | AQUA (MODIS) |
|--|--------------|--------------|
| Число ИК-тепловых каналов | 3 | 16 |
| Разрешение на местности, м | 1100 | 1000 |
| Угол поля зрения, град | 110,8 | 110 |
| Мгновенный угол зрения, мрад | 1,3 | 1 |
| Ширина полосы обзора, км | 2700 | 2330 |
| Периодичность съёмки, сут | 12 | 12 |
| Чувствительность на уровне фона в 300 К | 0,12 | 0,05 |
| Абсолютная ошибка определения температуры, К | <0,1±0,5 | 0,06±0,29 |
| Количество уровней квантования сигнала, бит | 10 | 12 |

Для анализа температуры водных поверхностей был выбран набор данных NEO (NASA Earth Observations, 2016), как обеспечивающий разрешение на земной поверхности около 10 км. Существуют и другие базы данных по температуре поверхности воды, включающие как данные тепловой инфракрасной съёмки, так и микроволновые наблюдения (SST..., 2016). Последние имеют огромное преимущество — не зависят от облачности, но их пространственное разрешение значительно хуже — 50 км, что не позволяет провести анализ температуры озёр и заливов морей.

Для мониторинга шлейфов очистных сооружений были использованы данные спутников Terra (ASTER) и Landsat (TM и ETM). Для обнаружения полыней во льду, образующихся в зимний период над шлейфами сбросов с очистных сооружений, использовались материалы съёмки видимого диапазона, полученные системами сверхвысокого геометрического разрешения IKONOS и QuickBird. Набор данных, использованных для мониторинга сбросов, показан в *табл. 2*.

Таблица 2. Набор данных для мониторинга Невской губы

| Данные | Количество снимков (вылетов) | Годы съёмки |
|--------------------|------------------------------|-------------|
| Landsat (TM и ETM) | 7 | 1986–2006 |
| Terra (ASTER) | 10 | 2000–2006 |
| IKONOS и QuickBird | 4 | 2005–2006 |
| Аэросъёмка | 7 | 1989–2006 |

Для изучения многолетних изменений температуры поверхности суши в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области с 1983 по 2014 г. на наиболее тёплый период года в формате Hierarchical Data Format было получено более 1500 цифровых карт температуры земной поверхности, восстановленных по материалам съёмки спутниками NOAA (AVHRR), Aqua (MODIS) — 8-суточные композиты на период с 4 июля по 5 августа каждого года — время наибольшего прогрева поверхности городской среды. Время съёмки для спутника Aqua — днём приблизительно в 13 ч МСК.

1.1.2. Тепловая аэросъёмка

Тепловая аэросъёмка в режиме мониторинга применялась для городских агломераций с целью контроля состояния систем теплоснабжения, оценки теплопотерь и контроля источников загрязнения акваторий. Практически все материалы тепловой аэросъёмки были получены отечественными тепловизионными авиационными системами (*табл. 3*). В последние годы для абсолютной привязки температуры на тепловых аэроснимках проведены экспериментальные тепловые аэросъёмки комплексной системой «Малахит-М» (инфракрасный радиометр, направленный в надир).

Таблица 3. Технические характеристики авиационных сканирующих тепловизоров Азовского оптико-механического завода

| Параметр | Марка прибора/начало эксплуатации, г. | | |
|---|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| | «Вулкан»/1981 | «Малахит»/1991 | «Малахит-М»/2002 |
| Спектральный интервал, мкм | 3–5, 8–13 | 8–13 | |
| Угол мгновенного поля зрения, мрад | 1,7 | 1,0 | |
| Чувствительность на фоне +20 °С и отношении сигнала к шуму, равном единице, не хуже | 0,2 | 0,15 | |
| Полный угол обзора, град | 80 | 120 | |
| Система охлаждения детектора | Заливная, жидким азотом | Замкнутая газовая | Замкнутая газовая |
| Масса аппаратуры, не более, кг | 50 | 20 | 10 |

| Параметр | Марка прибора/начало эксплуатации, г. | | |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| | «Вулкан»/1981 | «Малахит»/1991 | «Малахит-М»/2002 |
| Энергопотребление от бортсети 27 В не более, А | 30 | 40 | 35 |
| Тип регистратора | Аналоговый на базе ЭЛТ | Аналоговый на базе светодиода | Цифровой |
| Число пикселей в строке | — | — | ~5000 |
| Разрядность АЦП, бит | — | — | 14 |

При проведении площадных работ перекрытие составляло 30–40 %, а высота полётов — около 300 м, что обеспечивало обнаружение малоконтрастных мелких объектов. При мониторинге сбросов бытовых и промышленных вод в водотоки Санкт-Петербурга полёты выполнялись ранней весной или поздней осенью в пасмурную погоду, когда влияние солнечного нагрева минимально, а контраст значений температуры сброса и вмещающего водоёма максимален.

1.2. Методы обработки материалов тепловой съёмки

1.2.1. Космическая тепловая съёмка

Обработка результатов съёмки включала первичную коррекцию: учёт влияния атмосферы, восстановление термодинамической температуры земной поверхности, геометрические трансформации и приведение материалов космической тепловой съёмки к заданной картографической проекции.

Учёт влияния атмосферы для спутников серий NOAA (AVHRR) и EOS (Terra/Aqua), как правило, выполнялся методом разделённых окон (Jiménez-Muñoz, Sobrino, 2008). Для снимков Landsat восстановление термодинамической температуры земной поверхности выполнялось на основе учёта влияния атмосферы с помощью программы MODTRAN или назначением коэффициентов излучения различных типов земной поверхности в зависимости от проективного покрытия растительности (Станкевич и др., 2015).

Геометрическая коррекция материалов компенсировала сдвиг изображений за счёт вращения Земли и искажений, вызванных сферичностью земной поверхности. При необходимости на материалах устранялись пропуски между пакетами сканов на краях полосы обзора, полученных спутниками Terra/Aqua (MODIS). Приведение к картографической проекции выполнялось на основе баллистических данных.

Простейшим видом тематической обработки являлось вычисление средних значений по заданной площади и стандартных отклонений температуры земной поверхности. Далее выполнялось построение временных рядов, характеризующих изменчивость температуры земной поверхности в течение заданного промежутка времени (многолетний, сезонный, суточный). Временные ряды представлялись в форме таблиц, по которым рассчитывались статистические характеристики изменчивости температуры земной поверхности во времени, а для визуального анализа — в виде графиков, включающих средние по площади значения, доверительные интервалы и линии трендов (Горный и др., 2016). Так, для водоёмов Северо-Западного региона России были вычислены среднемесячные значения температуры поверхности воды, по которым вычислялись сезонные и среднегодовые значения (Тронин, 2017). Были получены надёжные данные о температуре поверхности водоёмов, осреднённые на несколько временных интервалов: годовой интервал и сентябрь–октябрь. Сентябрь и октябрь выбраны не случайно — именно в этот период наблюдается минимум облачности над озёрами, обусловленный более высокой температурой водной поверхности по сравнению с окружающей сушей.

При необходимости выполнялся корреляционный анализ, позволявший выявить статистические связи температуры с характеристиками исследуемых объектов.

Для решения задач экологического мониторинга использовались несколько алгоритмов. Оценка вклада атомных станций в энергетический баланс Балтийского моря выполнялась на основе уравнения теплового баланса водной поверхности (Gorny et al., 2000; Sekioka, Yuhara, 1974). Дистанционный геотермический метод, реализующий теплоинерционный подход (Горный, 2004; Cracknell, Xue, 1996; Watson et al., 1971), использовался для построения карт теплового потока, тепловой инерции, скорости испарения влаги с земной поверхности.

1.2.2. Тепловая аэросъёмка

Обработка материалов тепловой аэросъёмки включала в себя формирование координатно-привязанных растровых карт температурных контрастов — тепловых карт. Основными этапами создания растровой карты являлись (Груздев и др., 2008):

- геометрическая коррекция материалов съёмки для устранения разномасштабности изображения в центре и на краях полосы захвата (эффект «панорамы»);
- автоматическая привязка маршрутов съёмки вдоль траектории с учётом переменных угла курса и высоты полёта и постоянного угла разворота плоскости сканирования (сноса);
- привязка тепловых данных к опорной топографической основе путём сопоставления изображений опорных точек;
- объединение отдельных маршрутов в единое изображение и трансформация в требуемую картографическую проекцию;
- привязка к относительным температурам.

Результатом предварительной обработки являлась геопривязанная цифровая мозаика снятой территории. Мозаика разбивалась на номенклатурные листы с сохранением привязки в единой системе координат, по которым выполнялось обнаружение и опознавание исследуемых объектов.

При мониторинге эффективности мероприятий по сбросам бытовых и промышленных вод в водотоки Санкт-Петербурга тепловая аэросъёмка выполнялась на вертолёте Ми-8 по маршрутам полётов вдоль береговой линии (1990, 2010) или по всей территории города (2002).

Для анализа изменения состояния исследуемых объектов проводился регулярный мониторинг тепловой аэросъёмкой. На основании дешифрирования материалов тепловой аэросъёмки составлялись каталоги тепловых аномалий, проводилось сравнение состояния объектов.

При всех направлениях применения материалов тепловой аэросъёмки дешифрирование исследуемых объектов (сбросы промышленных и коммунальных вод в акватории, подземные теплопроводы) выполнялось с применением двух подходов: выделением аномально нагретых объектов с положительным температурным контрастом; анализом результатов разновременных тепловых аэросъёмок, выполненных в различные годы, позволяющий выявить появление или исчезновение температурных аномалий (change detection).

2. Информативность временных рядов температуры земной поверхности

2.1. Акватории

2.1.1. Крупнейшие внутренние водоёмы Северо-Западного региона России

Спутниковые методы давно и успешно используются для определения температуры водных объектов. Целью исследований было установление по спутниковым данным долгосрочных тенденций изменения температуры поверхности морей и крупных озёр Северо-Запада России.

В качестве объекта исследования были выбраны Балтийское море, Финский залив, Невская губа, Белое море, Чудское, Ладожское и Онежское озёра, а также Рыбинское водохранилище (рис. 1).

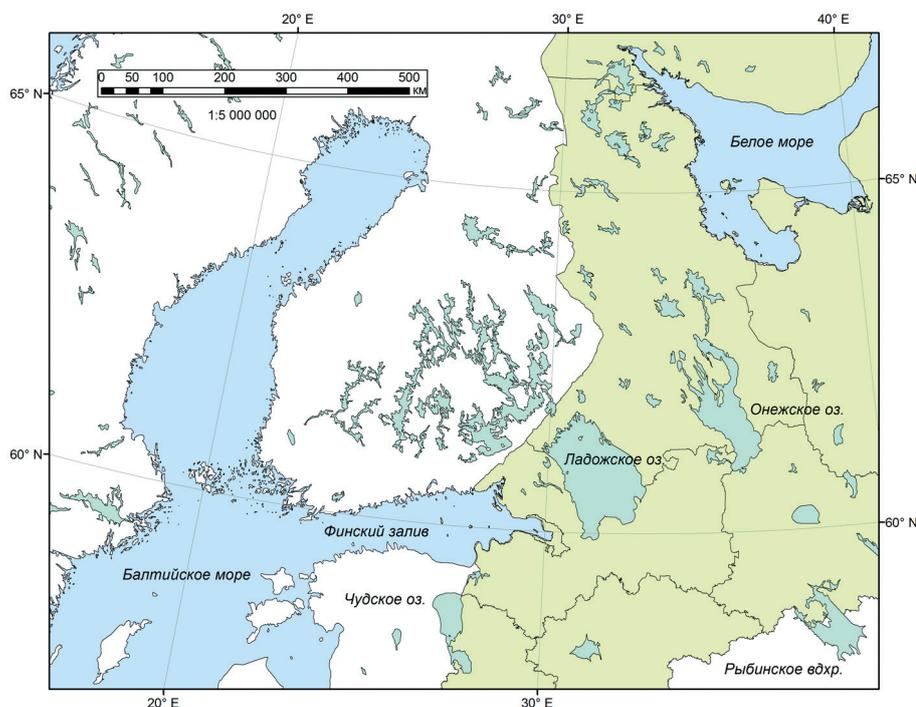


Рис. 1. Водоёмы Северо-Западного региона России

Среднегодовая температура воздуха в Северо-Западном регионе колеблется в интервале от 0 до +6 °С. Для изучаемых водоёмов характерен значительный сезонный ход температуры поверхности воды, обусловленный суточными и годовыми вариациями солнечной радиации, нестабильностью теплового вклада рек и водообмена морей с океаном. Зимой на всех водоёмах наблюдается ледяной покров. Солёность колеблется от пресных вод озёр и слабосолёных (2–8 ‰) вод Балтийского моря до солёных (26 ‰) вод Белого моря. Значительное влияние на гидрологический и термический режимы водоёмов оказывают крупные реки: Нева, Нарва, Северная Двина, Онега, Свирь, Волхов, Волга.

Все водоёмы Северо-Запада, и в первую очередь Балтийское море, испытывают воздействие природных и антропогенных факторов. Это воздействие заключается как в поступлении экотоксикантов в водоёмы, так и в интенсивном влиянии энергетики и морского транспорта на водные экосистемы. Наблюдающийся в последние десятилетия на Северо-Западе рост температуры воздуха (Второй..., 2014) приводит к нагреву водоёмов, что является угрозой экологической безопасности. Повышение температуры воды приводит к трансформации экосистем, инвазии чужеродных видов (Алимов, Голубков, 2008), росту бактериальной активности, уменьшению ледового покрова, необходимого для поддержания популяций нерп и тюленей, ускорению химических реакций (Encyclopedia..., 2012), повышению pH воды из-за возрастания концентрации углекислого газа в атмосфере (Caldeira, Wickett, 2003). При этом влияние охладителей атомных станций на тепловой баланс Балтийского моря незначительно по сравнению с тепловым вкладом рек, впадающих в Балтику (Gorny et al., 2000).

Ранее проведённые исследования показали наметившийся рост температуры поверхности Балтийского моря и Ладожского озера (Науменко и др., 2013; Bradtke et al., 2010; Stramska, Białogrodzka, 2015).

Результаты выполненного нами анализа многолетних тенденций изменения температуры поверхности крупнейших водоёмов Северо-Запада России приведены на рис. 2 и 3. Получены значения линейных коэффициентов тренда температуры поверхности воды (табл. 4). Коэффициент b показывает линейный тренд температур за 10 лет.

Температура поверхности воды водоёмов Северо-Запада значительно выросла с восьмидесятых годов прошлого века. Скорость роста среднегодовой температуры поверхности воды достигает +0,7 °С за 10 лет, для временного интервала сентябрь–октябрь — превышает +1 °С (табл. 4). Это соответствует изменениям температуры воздуха в Северо-Западном регионе по данным Росгидромета (Второй..., 2014): +0,51 °С за десятилетие в период 1976–2012 гг.

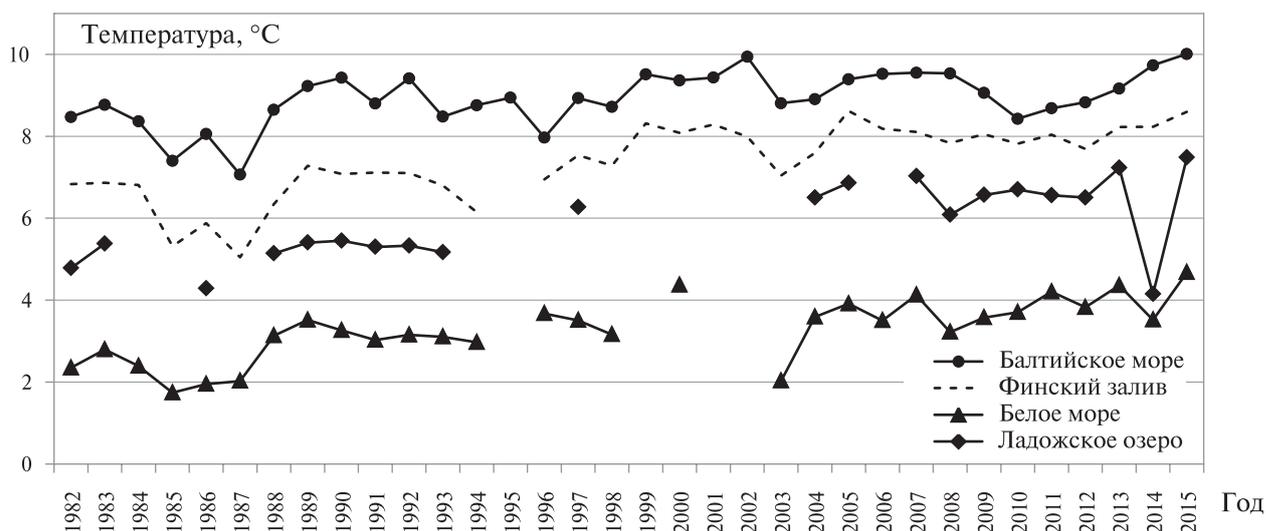


Рис. 2. Среднегодовые температуры поверхности водоёмов Северо-Запада

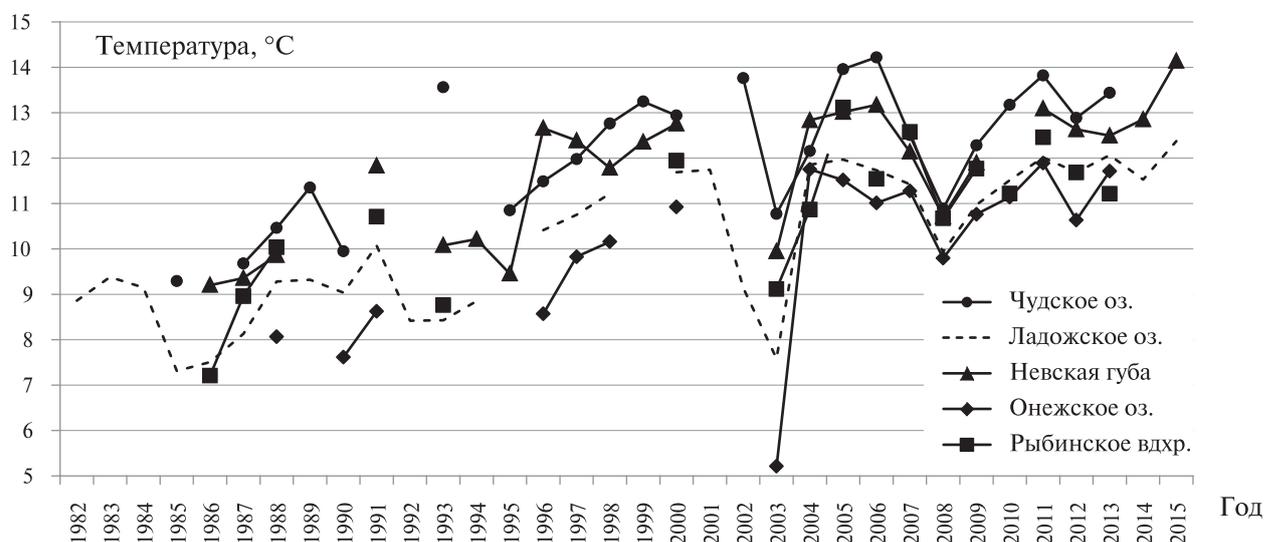


Рис. 3. Средняя температура поверхности водоёмов Северо-Запада за сентябрь-октябрь

Таблица 4. Линейные коэффициенты тренда температуры поверхности воды b

| Водоём, регион | Среда | Период наблюдения | Коэффициент b | |
|--|--------|-------------------|-----------------|------------------|
| | | | Среднегодовой | Сентябрь-октябрь |
| Балтийское море | Вода | 1982–2015 | 0,36 | 0,61 |
| Финский залив | | 1982–2015 | 0,70 | 0,87 |
| Ладожское озеро | | 1982–2015 | 0,57 | 1,17 |
| Белое море | | 1982–2015 | 0,53 | 0,98 |
| Чудское озеро | Воздух | 1982–2015 | | 1,14 |
| Невская губа | | 1982–2015 | | 1,16 |
| Онежское озеро | | 1982–2015 | | 1,41 |
| Рыбинское водохранилище | | 1982–2015 | | 1,21 |
| Финский залив | | 1982–2014 | 0,41 | |
| Северо-Запад РФ (Второй оценочный доклад..., 2014) | | 1976–2012 | 0,51 | |
| Россия (Второй оценочный доклад..., 2014) | | 1976–2012 | 0,43 | |

В это же время среднегодовая температура поверхности воды Северного Ледовитого океана, Севера Атлантики и Баренцева моря как минимум не растёт. Таким образом, можно сделать вывод о более интенсивной тепловой реакции внутренних водоёмов Северо-Западного региона России на наблюдающиеся климатические изменения.

2.1.2. Сбросы сточных вод Санкт-Петербурга в Финский залив (по данным тепловой космической съёмки)

В девяностых годах прошлого века экологическая ситуация в Невской губе и Восточной части Финского залива существенно улучшалась из-за снижения антропогенной нагрузки вследствие общего промышленного спада и постоянного уменьшения сбросов сточных вод в акватории. Однако после 2000 г. с началом в России экономического роста объёмы производства росли, резко увеличились морские перевозки, что, безусловно, отразилось на экологической обстановке в акватории.

В сентябре 2005 г. после пуска и ввода в эксплуатацию Юго-Западных городских очистных сооружений (ЮЗОС) была завершена многолетняя программа по канализованию большей части сточных вод Санкт-Петербурга. Эпизодический аэрокосмический мониторинг выполнялся путём проведения дистанционного обследования и картографирования выпусков сточных вод (1989, 1991, 2002, 2010). Пример теплового космического снимка Невской губы приведён на *рис. 4*.

На отдельных участках акваторий проводилась тепловая аэросъёмка в 2005 и 2006 гг. Целью дистанционного мониторинга экологического состояния Невской губы было исследование закономерностей распространения сбросов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга (Тронин, Шилин, 2008).

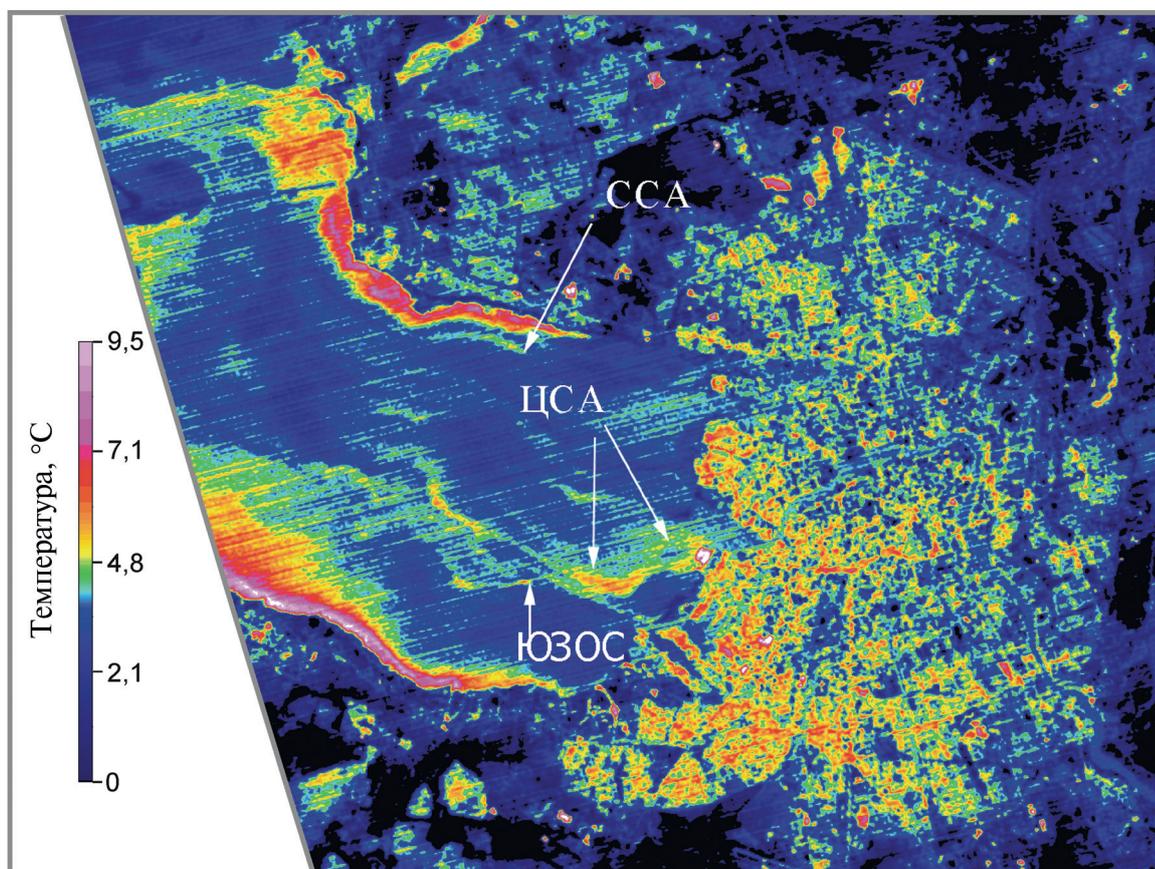


Рис. 4. Тепловой снимок шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга, полученный видеоспектрометром ASTER от 29 апреля 2006 г. Стрелками показаны выпуски очистных сооружений. ЮЗОС — Юго-Западные очистные сооружения, ССА и ЦСА — соответственно Северная и Центральная станции аэрации

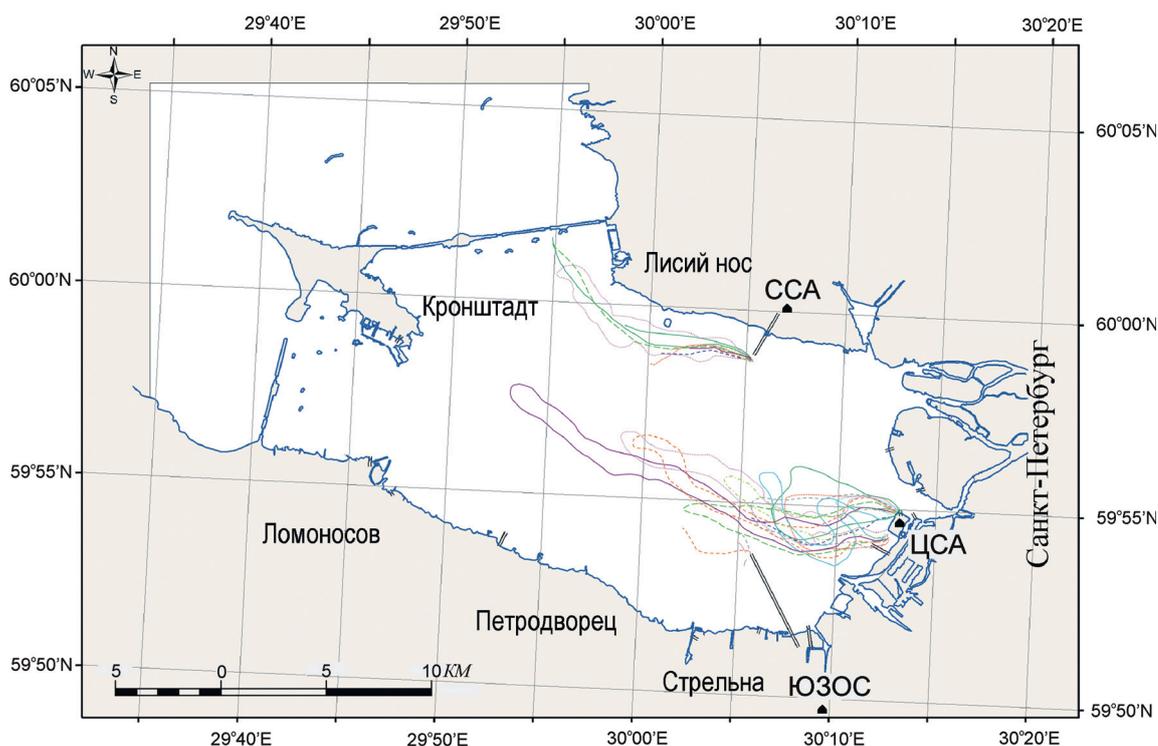


Рис. 5. Схема дешифрирования шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга по данным аэрокосмической съёмки. Различные контура соответствуют разным датам съёмки

Эффективность тепловой аэрокосмической съёмки при мониторинге сбросов очистных сооружений определяется значительным положительным контрастом между температурой сбросов и температурой поверхности воды в Невской губе (3–4 °С). Совместная обработка результатов спутниковой и авиационной съёмок шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга позволила построить общую схему распространения сбросов очистных сооружений (рис. 5). Это доказало стабильность путей распространения шлейфов очистных сооружений Санкт-Петербурга, которая определяется главным образом течениями в Невской губе, которые, в свою очередь, зависят от стока Невы.

2.1.3. Сбросы сточных вод в акваторию реки Невы по данным тепловой аэросъёмки

Предпосылкой применения тепловой аэросъёмки при решении этой задачи является повышенная по сравнению с Невской водой температура канализационных сбросов. Температура сточных вод в течение года колеблется от +20 °С летом до +16 °С зимой при температуре воды в водотоках Санкт-Петербурга в середине весны и осени +5...+8 °С. В результате контраст температуры сброс-водоём может достигать +10 °С (Тронин, Шилин, 2008) и чётко фиксироваться на тепловых аэроснимках, полученных современными авиационными тепловизорами (см. табл. 3). Тепловая аэросъёмка с цифровой аэрофотосъёмкой сопровождения выполнялась в Санкт-Петербурге в 1990, 2002, 2009 и 2010 гг. В результате для 1990 г., 2002 г. (Гаврилов, Шилин, 2003) и 2010 г. составлены карты-схемы сбросов в водотоки Санкт-Петербурга (рис. 6) и детальные каталоги аэроснимков всех обнаруженных объектов (рис. 7).

Сравнение карто-схем за эти годы показало существенное уменьшение антропогенной нагрузки на акватории города (табл. 5). Так, в 1990 г. было обнаружено более 320 сбросов, в 2002-м — только 66. Фрагмент карты в «мониторинговом» режиме представлен на рис. 6, а примеры тепловых аэроснимков — на рис. 7. Количество сбросов в зоне Главного канализационного коллектора северной части города уменьшилось с 18 в 2002 г. до 11 в 2009 г. и 6 в 2010 г.

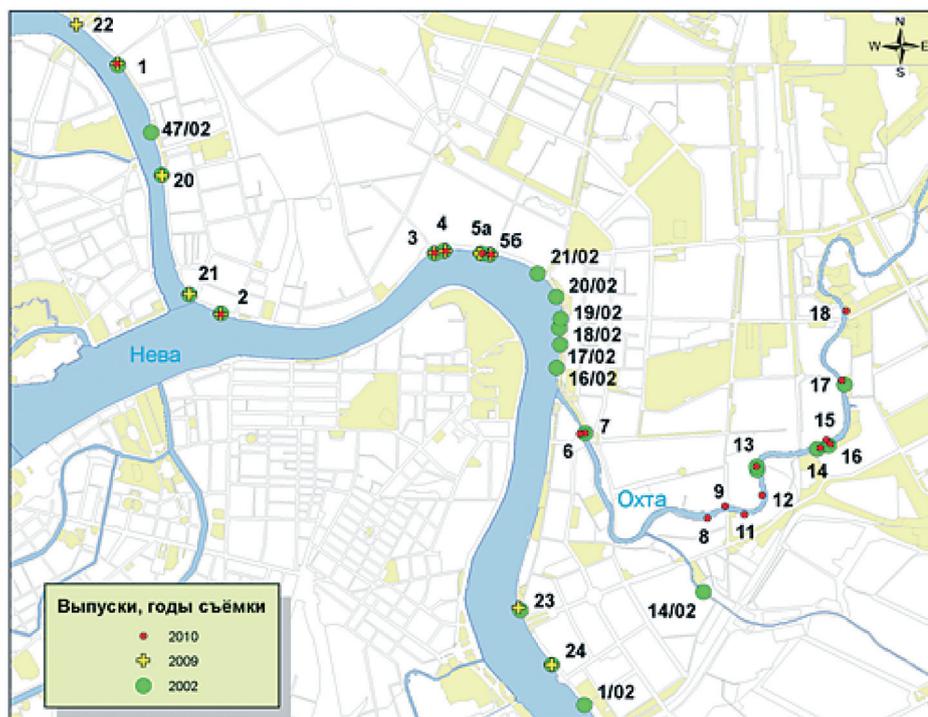


Рис. 6. Фрагмент карто-схемы выпусков бытовых и промышленных вод в водотоки Санкт-Петербурга, выявленных тепловой аэросъёмкой в 2002, 2009 и 2010 гг. Район Главного канализационного коллектора

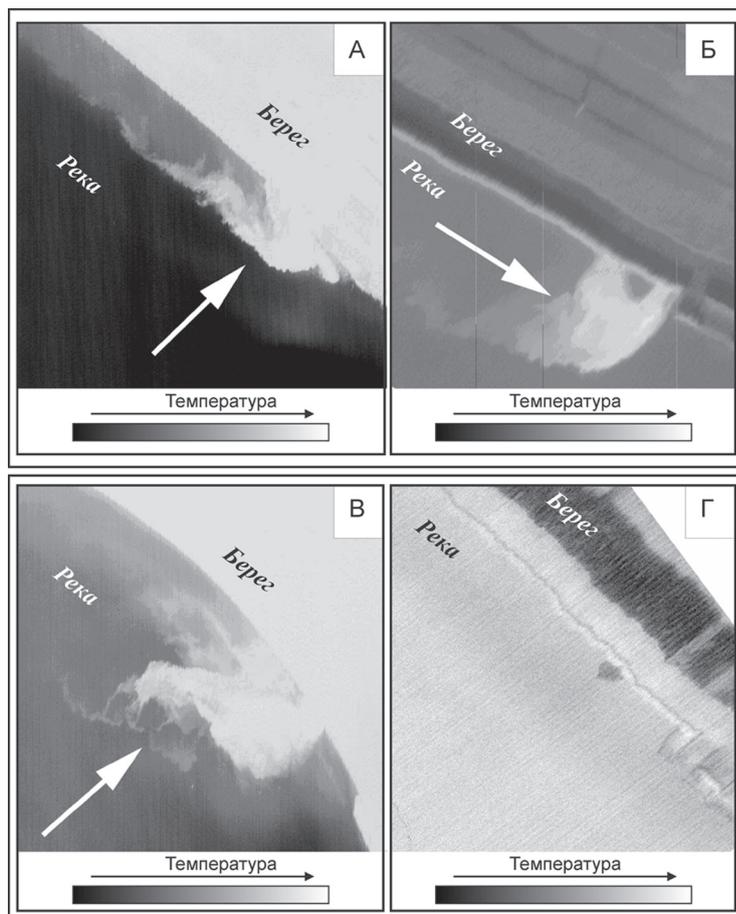


Рис. 7. Сравнение результатов тепловой аэросъёмки, полученных в разные годы. А и Б — выпуски № 5а и № 5б (см. рис. 6) у Феодосийской улицы: А — 2002 г.; Б — 2010 г., выпуск сохранён. В и Г — выпуск № 21/02 (см. рис. 6) у Пискаревского проспекта: В — 2002 г.; Г — 2010 г., выпуск ликвидирован. В акватории реки шлейфы вод из выпусков показаны стрелками

Таблица 5. Результаты многолетнего дистанционного мониторинга сбросов канализационных вод в водотоки Санкт-Петербурга

| Объект съёмки | Количество выявленных сбросов по годам | | | |
|---|--|---------|---------|---------|
| | 1990 г. | 2002 г. | 2009 г. | 2010 г. |
| Санкт-Петербург | 320 | 66 | 74 | — |
| Река Нева в районе Главного канализационного коллектора | | 18 | 11 | 6 |

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность тепловой аэросъёмки как инструмента мониторинга сбросов сточных вод в акватории.

Разработанные в последние годы технические средства цифровой регистрации и обработки данных авиационных сканеров, аэрофотоаппаратов и современные системы навигации позволяют рекомендовать тепловую аэросъёмку как метод постоянного мониторинга загрязнения акваторий. Особенно это актуально для городов, имеющих большие площади водных объектов (Пермь, Казань, Астрахань и др.).

2.2. Тепловой режим суши

2.2.1. Многолетние временные ряды температуры земной поверхности Санкт-Петербурга и Ленинградской области по данным космической тепловой съёмки

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант №14-05-90416, и НАН Украины грант №10-05-14 (У) «Исследование влияния урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съёмок)». Основные результаты опубликованы в статьях (Горный и др., 2016, 2017а; Крицук и др., 2016).

Для всей площади Санкт-Петербурга и окружающей его территории Ленинградской области (рис. 8) на период с 4 июля по 5 августа каждого года вычислялась усреднённая по площади температура поверхности. Результатом явились многолетние ряды температуры земной поверхности (рис. 9).

Анализ временных рядов (см. рис. 9) показал, что с 2004 по 2014 г. наблюдался рост температуры поверхности Санкт-Петербурга, в том числе и по сравнению с окружающей, не урбанизированной территорией Ленинградской области. Летом 2014 г. многолетний тренд дневной температуры поверхности города более чем на $+3,2^{\circ}\text{C}$ превышал уровень тренда температуры поверхности Ленинградской области (см. рис. 9). Вместе с тем за период с 1983 г. по 2014 г. дневная температура поверхности территории Ленинградской области монотонно снизилась на $1,4^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 9) (Горный и др., 2016).

Анализ причин разнонаправленного изменения этих значений температуры в городе и окружающих областных территориях (Горный и др., 2017б) доказал справедливость модели циркуляции воздушных масс в пределах городского «теплового острова» (Avissar, Pielke, 1989; Cotton, Pielke, 2007). В соответствии с этой моделью нагретый в городе сухой воздух поднимается до высоты $\sim 500\text{--}1000$ м и, охлаждаясь, перемещается в сторону областных территорий. Одновременно со стороны областных территорий в приземном слое атмосферы в город поступает холодный увлажнённый воздух, снижающий температуру земной поверхности. Из-за большего процента площади, покрытой растительностью, испарение на областной территории выше по сравнению с городом и ниже температура поверхности. Согласно этой модели циркуляции воздушных масс, чем сильнее нагревается воздух в центре города, тем выше скорость циркуляции воздушных масс и тем больше разница температуры земной поверхности в городе и на областных территориях. Это и зарегистрировали результаты многолетних спутниковых наблюдений (см. рис. 9).

Корреляционный анализ факторов, ответственных за многолетнее повышение температуры поверхности городской среды в Санкт-Петербурге, выявил достоверную связь (коэффициент корреляции 0,98) между объёмами вводимого в эксплуатацию нового строительства

и многолетними трендами температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга в конце июля – начале августа (Горный и др., 2016):

$$\bar{T} = 0,06S_{\Sigma} + 23,8, \tag{1}$$

где \bar{T} – многолетний тренд средней по городу температуры в конце июля – начале августа, °C; S_{Σ} – суммарная (накопленная с 2005 г.) введённая жилая площадь, млн м².

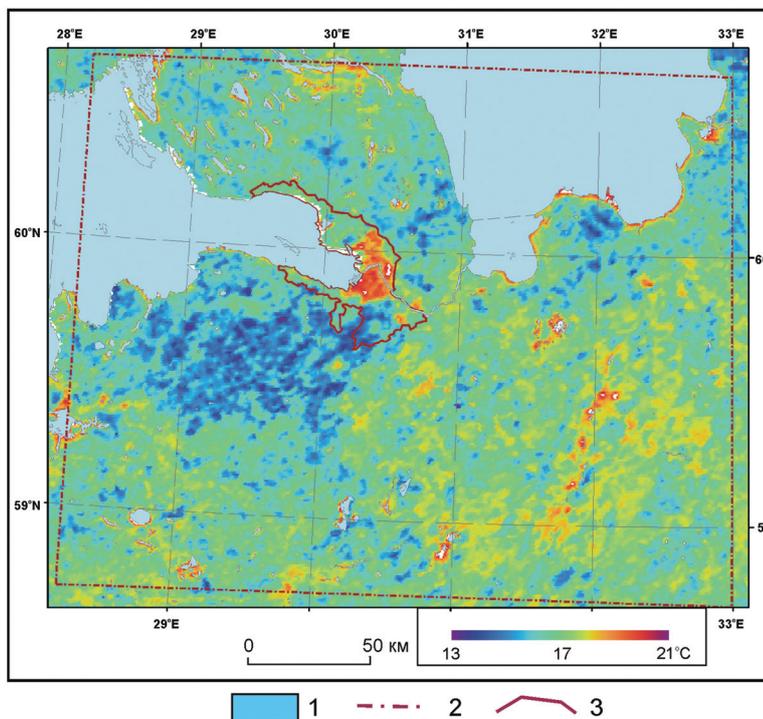


Рис. 8. Карта температуры поверхности Санкт-Петербурга и Ленинградской области, восстановленная по материалам тепловой космической съёмки спутника Aqua (MODIS). Дата съёмки: 07.08.2010: 1 – акватории; 2 – внешняя граница исследуемой территории Ленинградской области; 3 – граница Санкт-Петербурга

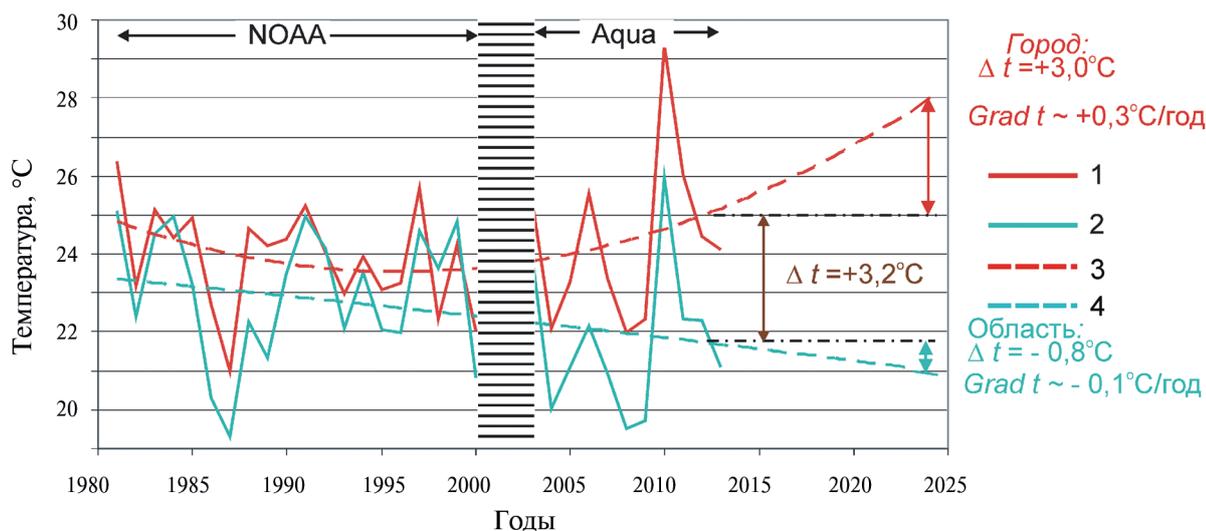


Рис. 9. Многолетние временные ряды температуры земной поверхности, усреднённой за сезон максимального прогрева (с 4 июля по 5 августа), полученные спутниками серий NOAA (AVHRR) и Aqua (MODIS) (Горный и др., 2016). Условные обозначения: 1 – температура поверхности Санкт-Петербурга; 2 – температура поверхности Ленинградской области. Пунктиром показаны линии многолетних трендов температур, рассчитанных полиномом второго порядка: 3 – городские территории; 4 – областные территории

Наблюдаемый эффект влияния нового строительства на термический режим города происходит как из-за уменьшения площади зелёных зон и, соответственно, снижения охлаждающего влияния испарения, так и из-за повышения расхода энергии.

Высокий коэффициент корреляции между объёмами нового строительства и многолетней тенденцией изменения температуры поверхности города указывает, что температура поверхности города является надёжным индикатором строительной активности, а уравнение (1) может использоваться для получения независимой от официальной статистики количественной оценки объёмов вводимого нового строительства.

Прогноз температуры поверхности Санкт-Петербурга, выполненный на основании анализа временных рядов, показал, что в 2024 г. следует ожидать возрастание средней многолетней по площади дневной температуры поверхности городской среды до $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (повышение ещё на $+3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с 2013 г.), при верхней оценке нагрева отдельных участков поверхности города до $+50,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Горный и др., 2016).

2.2.2. Использование закономерностей формирования суточной тепловой ритмики для прогнозирования пространственного распределения температуры поверхности Санкт-Петербурга

Для извлечения количественной информации, заключённой в суточных тепловых ритмах, необходимо по данным многократной тепловой космической съёмки полностью охарактеризовать суточный ход температуры поверхности. Для этого целесообразно использовать материалы тепловой космической съёмки, полученные всеми существующими съёмочными системами дистанционного зондирования, имеющими каналы инфракрасного теплового диапазона: спутники серии Landsat, Terra (ASTER), NOAA (AVHRR), Terra/Aqua (MODIS). Эти спутники выполняют съёмку в различное время суток, что позволяет достаточно подробно построить временные ряды, характеризующие суточную ритмику исследуемой поверхности.

Разработка на основе теплоинерционного подхода математической модели суточного хода температуры поверхности (Горный и др., 1993; Watson et al., 1971; Xue, Cracknell, 1995) позволила с достаточной для практики точностью аппроксимировать суточный временной ряд температуры поверхности, полученный по результатам космической тепловой съёмки. На этой основе был разработан алгоритм картирования теплофизических свойств земной поверхности: тепловой инерции, плотности теплового потока, скорости испарения влаги (Горный, 2004; Xue, Cracknell, 1995).

Карты теплофизических характеристик позволили решать ряд практических задач, таких как оценка городских теплопотерь (Горный и др., 1997а), геотермическое районирование территорий (Горный, 2000), в том числе и на основе построения карт конвективного теплового потока (Горный, 2007), выявление факторов, влияющих на формирование локальных ареалов неморальной растительности (Горный, Теплякова, 2001). С использованием карт скорости испарения влаги с земной поверхности предложена методика построения карт термодинамического индекса нарушенности экосистем (Горный и др., 2011; Gornyy et al., 2010), разработана и верифицирована технология его крупномасштабного картирования (Горный и др., 2013; Крицук и др., 2016). Карты теплофизических свойств поверхности городской среды (Горный и др., 2017) (*рис. 10*) выявили их специфичность для функциональных зон городов и позволили прогнозировать температуру поверхности города при различных сценариях потепления климата (*рис. 11*) и урбанизации (*рис. 12*). Для этого в планируемой зоне застройки комплекс теплофизических характеристик существующих функциональных зон на картах заменялся теплофизическими характеристиками функциональных зон по Генплану 2015–2025. Результаты детального пространственного моделирования температуры поверхности города позволяют оценить риски её перегрева и, соответственно, дать для городов порайонный прогноз темпа роста биоклиматических заболеваний из-за потепления климата и на этой основе разработать стратегию парирования риска роста этих заболеваний.

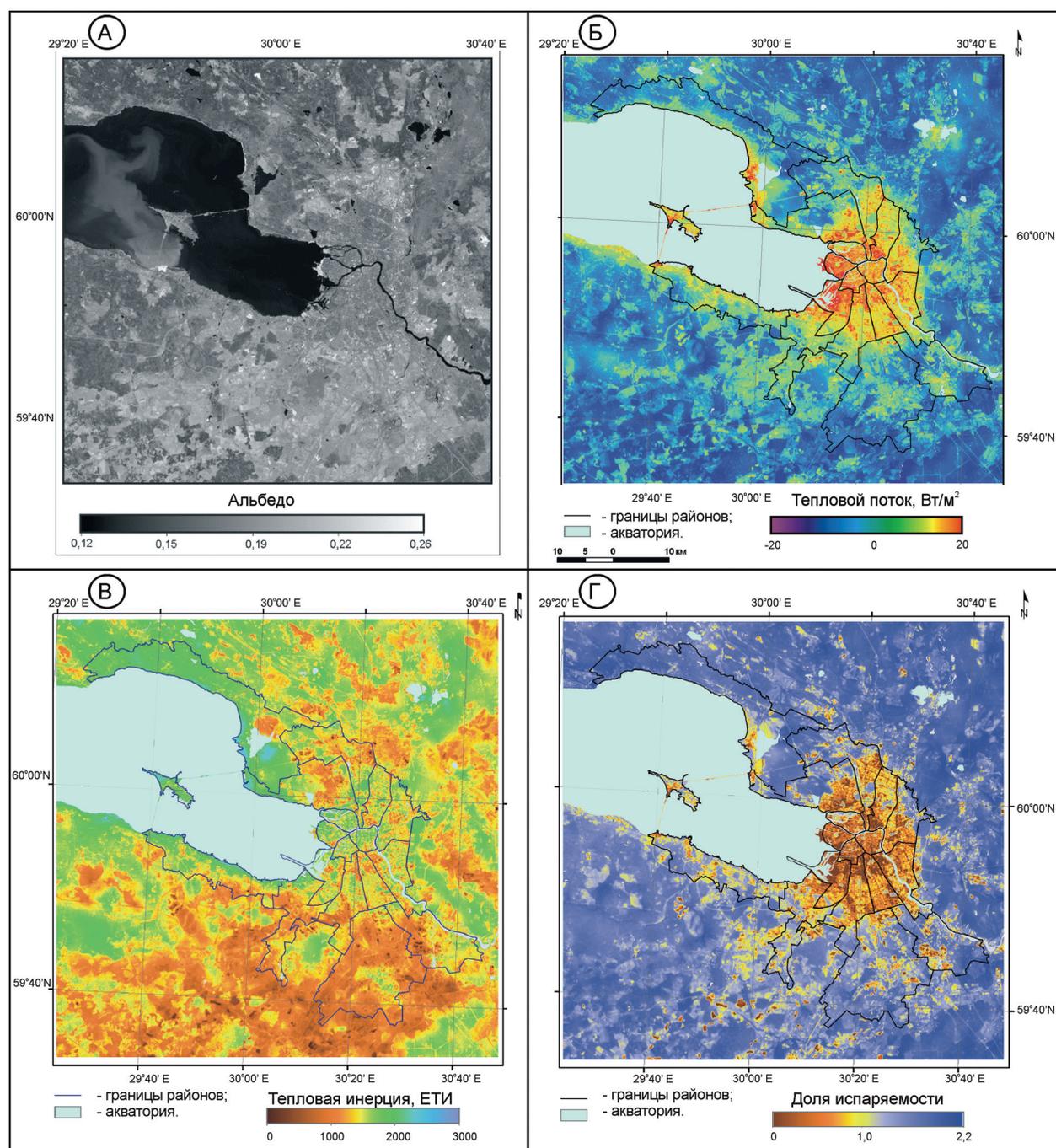


Рис. 10. Карты теплофизических свойств и альbedo поверхности Санкт-Петербурга, построенные по материалам многоразовых космических съёмок (Горный и др., 2017а): А — альbedo поверхности; Б — тепловой поток; В — тепловая инерция; Г — доля испаряемости

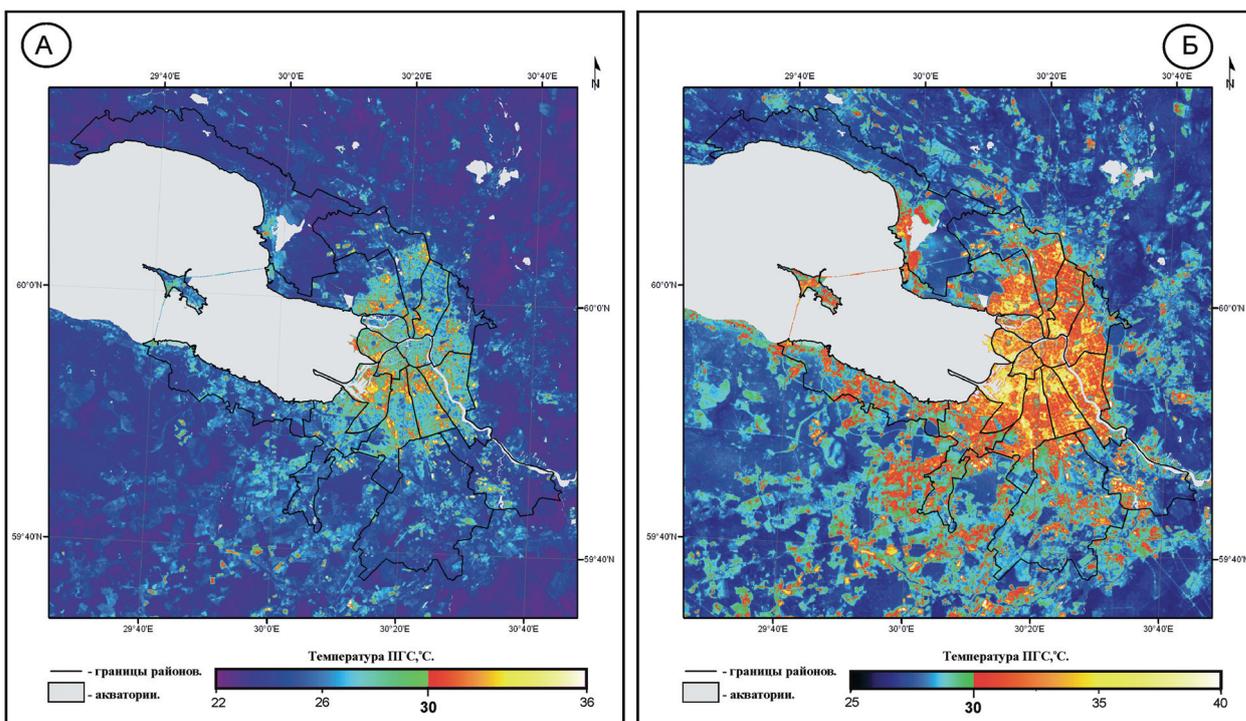


Рис. 11. Карты прогноза температуры поверхности Санкт-Петербурга в 15 ч 00 мин в конце июля – начале августа 2024 г. при различных сценариях потепления климата: А – повышение температуры воздуха на +3,0 °С – сценарий реализации многолетних тенденций роста температуры воздуха (см. 3 на рис. 9); Б – повышение температуры воздуха на +7,7 °С – сценарий реализации верхней оценки прогноза тенденций роста температуры воздуха

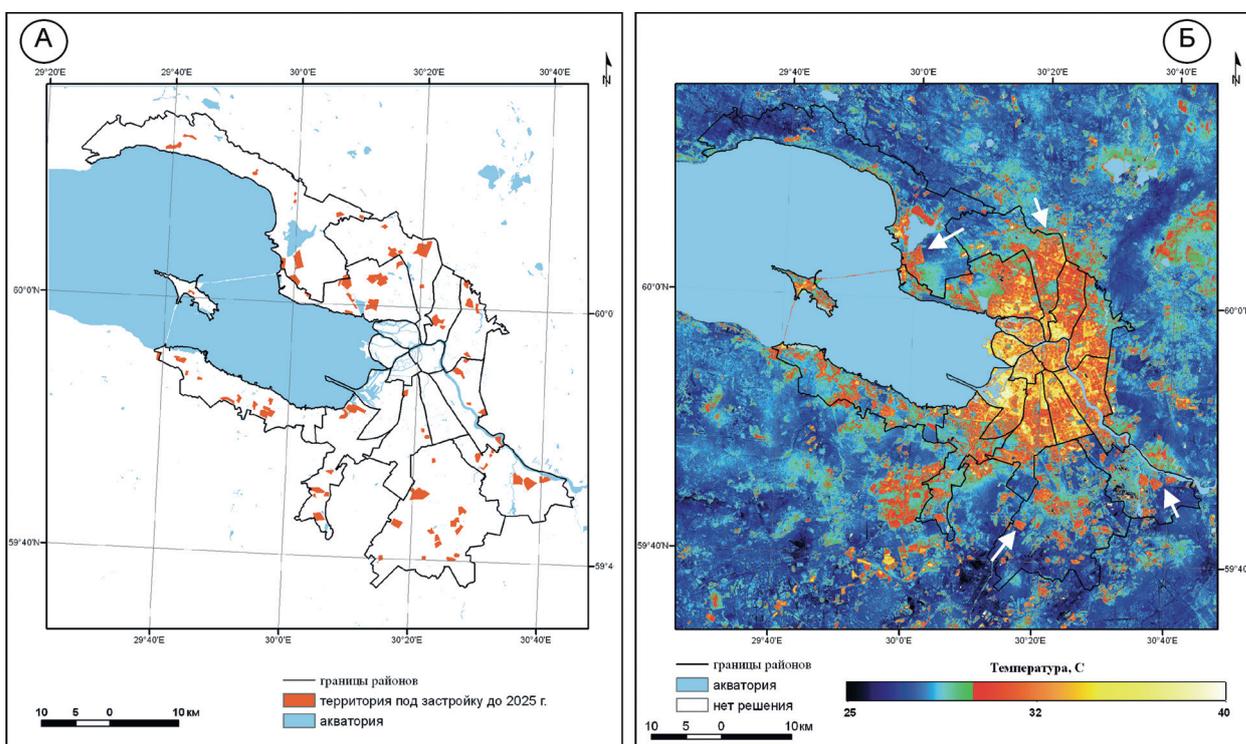


Рис. 12. Схема участков, отведённых Генпланом Санкт-Петербурга 2025 под новое строительство (А); результат моделирования температуры поверхности Санкт-Петербурга при условии полной застройки выделенных под новое строительство площадей (Б) (см. А) Стрелками показаны участки повышения температуры поверхности как следствие урбанизации (сравн. рис. 11Б). Условия расчёта: повышение температуры воздуха на +7,7 °С; эпоха: 15 ч 00 мин, конец июля – начало августа, 2024 г.

2.2.3. Анализ временных рядов температуры поверхности городской среды при контроле технического состояния городских теплотрасс тепловой аэросъёмкой

Целью теплового авиационного мониторинга систем городского теплоснабжения является обнаружение локальных контрастных аномалий температуры поверхности над подземными теплопроводами (рис. 13) и оценка эффективности мероприятий по их ремонту и реконструкции.

Впервые тепловая аэросъёмка в Ленинграде была проведена в 1986 г. отечественным авиационным тепловизором «Вулкан». До 1992 г. аэросъёмка выполнялась ещё три раза. После перерыва с 2000 г. стали проводиться регулярные аэросъёмки Санкт-Петербурга авиационным тепловизором «Малахит-М».

Для анализа изменения состояния городских теплосетей проводился регулярный аэротепловой мониторинг. Эффективность замены подземных теплопроводов с нарушенной изоляцией иллюстрирует рис. 14.

С 2001 г. тепловая аэросъёмка отдельных районов Санкт-Петербурга, в основном его южной части, проводилась не менее семи раз. Ежегодно на площади около 220 км² регистрировалось 200–300 аномалий различной значимости — аварии, предаварийное состояние, неудовлетворительная изоляция и т. п. (рис. 15). Несмотря на интенсивные ремонтные работы, из-за общего неудовлетворительного состояния теплосетей количество температурных аномалий не уменьшалось.

В последние годы ставится задача применения материалов тепловой аэросъёмки для количественной оценки теплопотерь над теплотрассами (Горный и др., 1997б). Задача весьма актуальна, так как другие методы дают ошибки, достигающие 60 %. Кроме того, знание амплитуды температурной аномалии над теплотрассами повышает достоверность интерпретации материалов тепловой аэросъёмки и выбора объектов для первоочередных ремонтных работ. В настоящее время испытывается методика совместного использования некалиброванного широкоугольного тепловизора («Малахит-М») и калиброванного ИК-радиометра, что позволяет экстраполировать измерения температуры ИК-радиометра на всю площадь теплового аэроснимка (рис. 16).

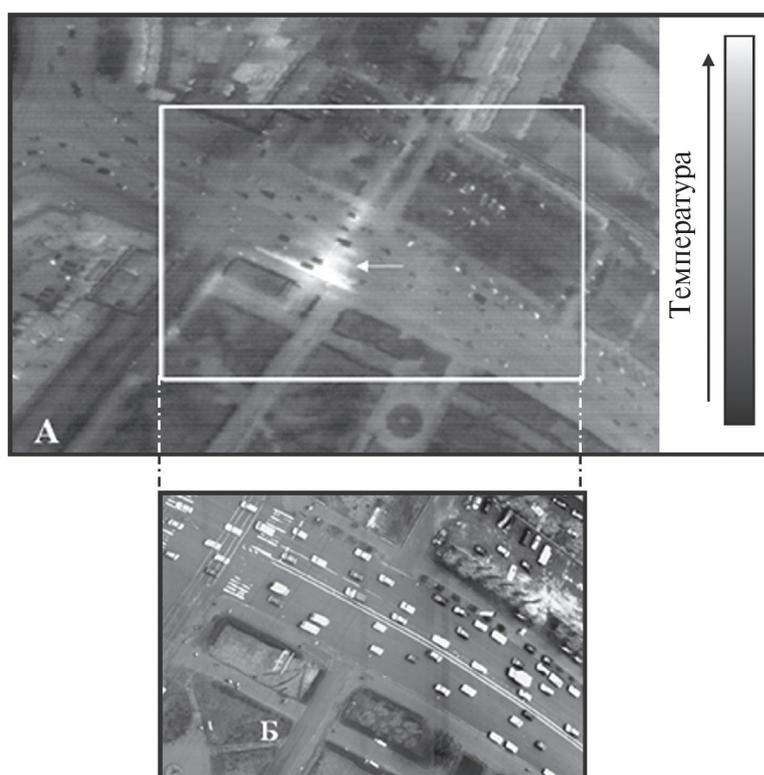


Рис. 13. Тепловой аэроснимок (А) и аэрофотоснимок сопровождения (Б) участка аварии на теплотрассе. Температурная аномалия на теплотрассе показана стрелкой (на А)

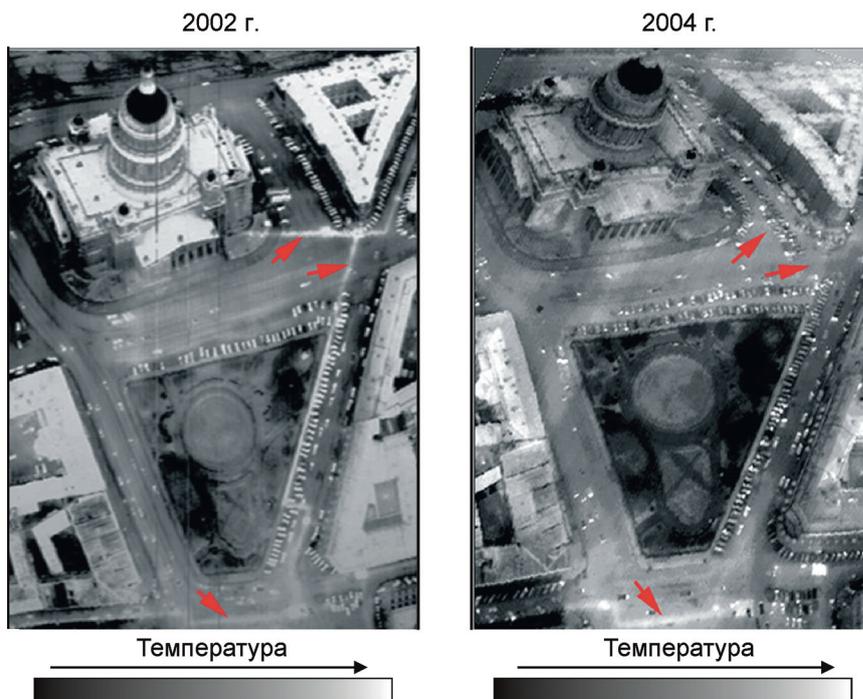


Рис. 14. Тепловые аэроснимки Исаакиевской площади, полученные с интервалом в два года. Температурные аномалии над теплотрассой (показаны стрелками) у правого края площади и подходящие к собору устранены после ремонта. В 2004 г. ухудшилось состояние теплотрассы у нижней границы теплового аэроснимка

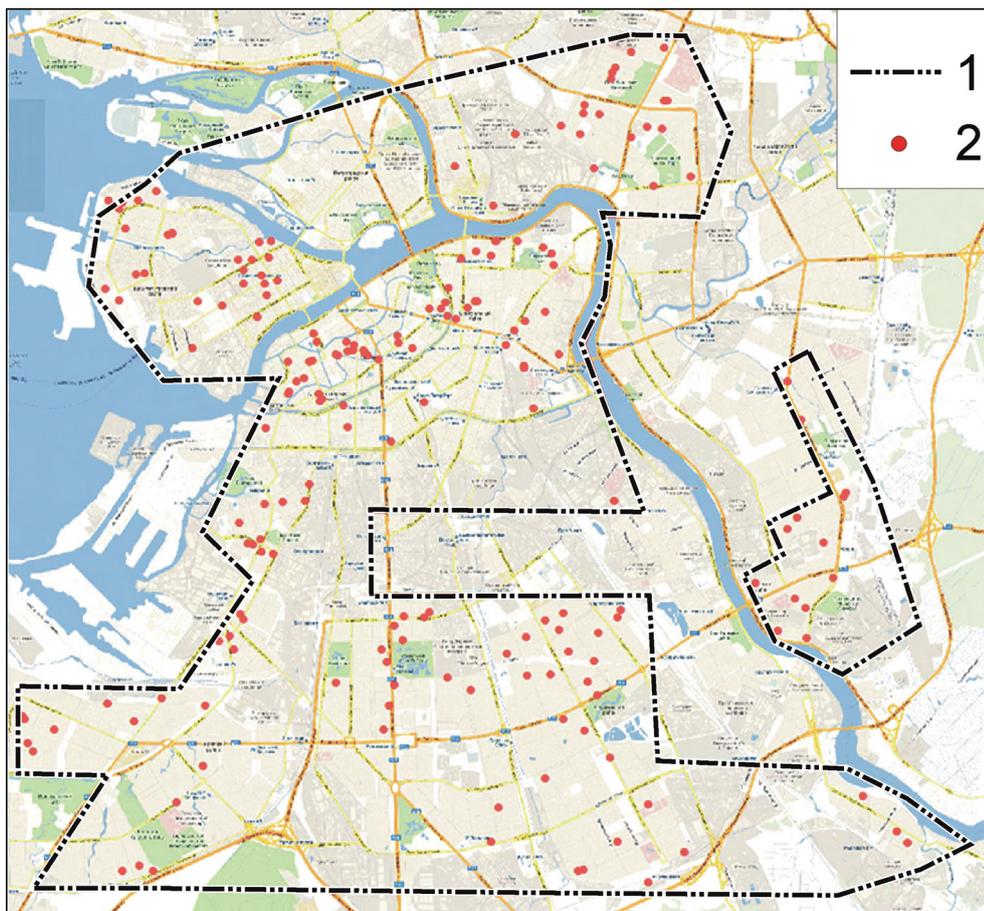


Рис. 15. Карто-схема расположения аномалий для первоочередной проверки на теплосетях южной части Санкт-Петербурга. Тепловая аэросъемка 2014 г. Условные обозначения: 1 — места аномальных тепловых состояний теплотрасс; 2 — границы площадной тепловой аэросъемки

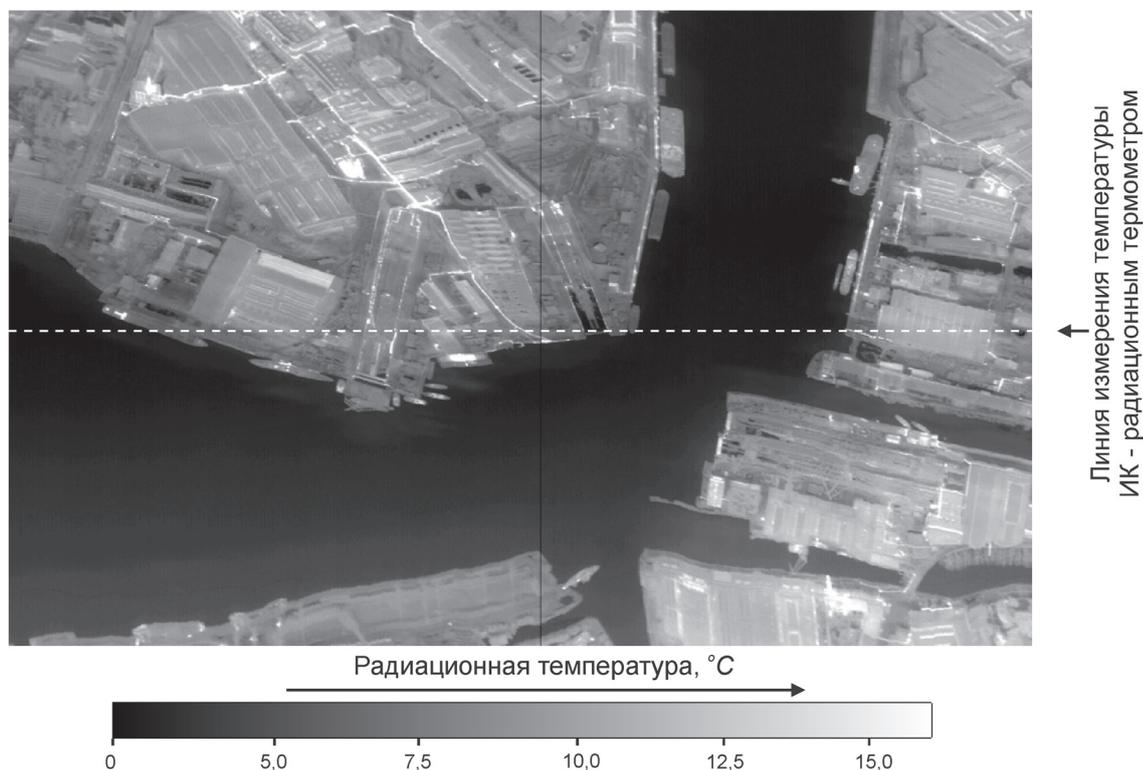


Рис. 16. Цифровой тепловой аэроснимок нижнего течения главного русла р. Невы, полученный тепловизором «Малахит-М». Температурные контрасты пересчитаны в радиационную температуру, измеренную синхронно ИК-радиационным термометром

3. Обсуждение состояния проблемы

Анализ многолетних временных рядов температуры поверхности городской среды, проводимый по ретроспективным материалам тепловой космической съёмки, позволяет прогнозировать во времени среднюю по территории температуру земной поверхности. Иными словами, удаётся продлить в будущее ретроспективные временные ряды температур. Анализ же суточных временных рядов температуры поверхности даёт возможность с высокой детальностью распространить в пространстве прогноз температуры, выполненный на основе ретроспективного анализа многолетних временных рядов. Таким образом, комплексирование методов анализа многолетних временных рядов температуры исследуемой поверхности с картированием пространственного распределения теплофизических характеристик земной поверхности, определяющих реакцию поверхности на внешнее тепловое воздействие, открывает возможность прогнозирования детального пространственного распределения температуры земной поверхности, которое следует ожидать как результат изменения климата и урбанизации.

Анализ показывает, что при решении широкого круга задач экологической безопасности именно закономерная реакция природной среды на воздействие суточных и годовых тепловых ритмов экзогенного источника тепла (солнечного нагрева) определяет высокую информативность результатов анализа временных рядов температуры, построенных по материалам многоцветной тепловой аэрокосмической съёмки.

Сравнение результатов тепловой космической и тепловой аэросъёмок позволяет отметить, что в спутниковом тепловидении произошёл переход на измерительный уровень регистрации температуры земной поверхности. Это существенно расширило возможности анализа временных рядов по сравнению с отечественными авиационными тепловизорами с цифровой регистрацией, где переход к измерениям только начинается. Именно поэтому основными методами анализа отечественных материалов тепловой аэросъёмки пока являются достаточно простые алгоритмы — обнаружение аномально нагретых объектов и анализ измене-

ний их теплового состояния во времени на основе повторных съёмок. Тем не менее переход к измерительной тепловой аэросъёмке с использованием в качестве носителей воздушных судов (самолётов, вертолёт) по чисто экономическим соображениям не позволит реализовать теплоинерционный подход. Для его реализации необходимо выполнить многократную тепловую съёмку в различное время суток, что в современных условиях трудно реализовать как по экономическим причинам, так и по ограничениям регламента полётов. Теоретические расчёты (Шилин, Молодчинин, 1992) и большой практический опыт показывают, что для решения многих городских задач необходима тепловая аэросъёмка с разрешением на местности 0,2–0,3 м. Для большинства авиационных тепловизоров это высота около 300 м, на которой недопустимы полёты в ночное время. Поэтому частичное преодоление этого противоречия возможно созданием авиационного тепловизора высокого углового разрешения, порядка 0,2 мрад для полётов ночью на высотах более 1000 м. Альтернативой является развитие измерительной тепловой аэросъёмки с применением беспилотных аппаратов, стоимость использования которых несравненно ниже, чем для воздушных судов. В этом варианте отсутствуют ограничения по полётам над городами в ночное время, и нет санитарных норм продолжительности лётных работ. Но имеются недостатки и у беспилотных аппаратов — сложность поддержания прямолинейных маршрутов при выполнении площадных аэросъёмок в условиях нестабильного ветра.

Выводы

1. Создание глобальных архивов материалов тепловой космической съёмки позволило приступить к изучению тепловой реакции естественных и антропогенных экосистем на изменение климата, произошедшее за последние несколько десятков лет.
2. Построение многолетних, годовых и суточных временных рядов температуры подстилающей поверхности по результатам измерительной тепловой аэрокосмической съёмки позволяет расширить количество извлекаемой информации о состоянии и свойствах исследуемых объектов. Поэтому важнейшей задачей создания нового поколения тепловизионных систем дистанционного зондирования Земли из космоса является обеспечение не менее чем 3-4-кратной повторяемости съёмки в течение суток. Только такой режим съёмки позволит создать архивы, обеспечивающие широкое внедрение передовых технологий обработки материалов тепловой космической съёмки.
3. Комплексный анализ многолетних и суточных временных рядов температуры подстилающей поверхности, построенных по результатам многократной тепловой аэрокосмической съёмки, даёт возможность строить детальные прогнозные карты температуры подстилающей поверхности для различных сценариев изменения климата и антропогенной активности.
4. Тепловой аэрокосмический мониторинг Северо-Западного региона России явился информационным обеспечением решения ряда практических задач, направленных на энергосбережение и экологическую безопасность населения региона.
5. Для реализации всех возможностей извлечения информации из многолетних, годовых и суточных временных рядов температуры земной поверхности, построенных по материалам многократной тепловой аэросъёмки, целесообразно развивать измерительное направление этого дистанционного метода с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Литература

1. Алимов А. Ф., Голубков С. М. Изменения в экосистемах восточной части Финского залива // Вестник РАН. 2008. Т. 78. № 3. С. 223–234.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Гаврилов Д. С., Груздев В. Н., Васильев И. А., Хотяков В. В., Шилин Б. В. Основные достижения в развитии тепловой аэросъёмки // Оптический журн. 2003. Т. 70. № 10. С. 77–83.

4. Гаврилов Д. С., Шилин Б. В. Мониторинг загрязнений акваторий с помощью авиационного тепловизионного комплекса // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 3. С. 77–82.
5. Горный В. И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным дистанционного геотермического метода) // Региональная геология и металлогения. 2000. № 12. С. 76–86.
6. Горный В. И. Космические измерительные методы инфра-красного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2004. Т. 2. № 1. С. 10–16.
7. Горный В. И. Распределение конвективного теплового потока в Беломорском регионе по данным дистанционного геотермического метода // Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. С. 26–28.
8. Горный В. И., Теплякова Т. Е. О влиянии эндогенного тепла Земли на формирование в бореальной зоне локальных ареалов неморальной растительности // ДАН. 2001. Т. 378. № 5. География. С. 560–561.
9. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съёмка. М.: Недра, 1993. 128 с.
10. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Шилин Б. В. (1997а) Дистанционный измерительный мониторинг теплопотерь городских и промышленных агломераций (на примере Санкт-Петербурга и Хельсинки) // Теплоэффективные технологии. 1997. № 2. С. 17–23.
11. Горный В. И., Груздев В. Н., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Шилин Б. В. (1997б) Сравнение теплопотерь теплопроводов с различными типами изоляции методом полевой инфракрасной радиометрии // Теплоэффективные технологии. № 4. 1997. С. 54–59.
12. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.
13. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Храмов В. Н. Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212.
14. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.
15. Горный В. И., Лялько В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Бровкина О. В., Киселев А. В., Давидан Т. А., Лубский Н. С., Крылова А. Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съёмок спутниками EOS и Landsat) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 176–191.
16. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С. (2017а) Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съёмок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 74–89.
17. Горный В. И., Донченко В. К., Самуленков Д. А., Сапунов М. В., Бровкина О. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. (2017б) О циркуляции воздушных масс в «тепловых островах» городов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 207–212.
18. Груздев В. Н., Зайцев В. А., Шилин Б. В. Развитие технических средств и методики тепловой аэро-съёмки. Труды международной конференции «Прикладная оптика — 2008». Санкт-Петербург, 20–24 окт. 2008. 2008. С. 251–258.
19. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш. Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
20. Науменко М. А., Гузиватый В. А., Каретников С. Г. Термический режим Ладожского озера / под ред. В. А. Румянцева, С. А. Кондратьева // Ладога. СПб.: Ин-т озераведения РАН, 2013. С. 137–151.
21. Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Крицук С. Г., Бровкина О. В., Горный В. И., Тронин А. А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки // Український журнал дистанційного зондування Землі. 2015. № 7. С. 14–23.
22. Тронин А. А., Шилин Б. В. Мониторинг шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмической тепловой съёмкой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. № 5. Т. 2. С. 586–594.

23. *Тронин А. А., Шилин Б. В.* Космическое тепловидение при решении задач экологической безопасности // Оптический журн. 2015. Вып. 7. Т. 82. С. 19–24.
24. *Шилин Б. В., Молодчинин И. А.* Контроль состояния окружающей среды тепловой аэросъёмкой. М.: Недра, 1992. 76 с.
25. *Шилин Б. В., Тронин А. А.* Тепловая аэросъёмка. История, развития и состояние // Оптический журн. 2015. Т. 82. № 7. С. 4–9.
26. *Avisar R., Pielke R. A.* A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology // Monthly Weather Review. 1989. V. 117. P. 2113–2136. [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493\(1989\)117%3C2113%3AАРОНLS%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493(1989)117%3C2113%3AАРОНLS%3E2.0.CO%3B2) (актуально в 2017).
27. *Bradtko K., Herman A., Urbański J. A.* Spatial and Interannual Variations of Seasonal Sea Surface Temperature Patterns in the Baltic Sea // Oceanologia. 2010. V. 52. Iss. 3. P. 345–362. DOI:10.5697/oc.52-3.345.
28. *Brown O. B., Minnett P. J.* MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm. Algorithm Theoretical Basis Document. Version 2.0. Miami: University of Miami, 1999. P. 98.
29. *Caldeira K., Wickett M. E.* Anthropogenic carbon and ocean pH // Nature. 2003. V. 425 (6956). P. 365–365. DOI:10.1038/425365a.
30. *Cotton W. R., Pielke R. A.* Human Impacts on Weather and Climate: Cambridge: University Press, 2007. 308 p.
31. *Cracknell A. P.* The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). L.: Taylor and Francis, 1997. 534 p.
32. *Cracknell A. P., Xue Y.* Thermal inertia determination from space — a tutorial review // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 3. P. 431–461.
33. Encyclopedia of Global Warming and Climate Change / ed. Philander S. G. L.: SAGE Publications, Inc., 2012. 1641 p. DOI:<http://dx.doi.org/10.4135/9781452218564>.
34. *Gorny V. I., Kritsuk S. G., Latipov I. Sh., Tronin A. A., Shilin B. V.* Estimation of Nuclear Power Plants Influence on the Baltic Sea Thermal State by Using Infrared Thermal Satellite Data // Intern. J. Remote Sensing. 2000. V. 21. Iss. 12. P. 2479–2496. DOI:10.1080/01431160050030574.
35. *Gorny V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh.* Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance // J. Environmental Protection. 2010. No. 1. P. 242–250.
36. *Jaeger J. C.* Conduction of heat in a solid with periodic boundary conditions with application to the surface temperature of the moon // Proc. Cambridge philosophical society. 1953. V. 49. Pt. 2. P. 355–359.
37. *Jiménez-Muñoz J.-C., Sobrino J. A.* Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval From Low-Resolution Thermal Infrared Sensors // IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters. 2008. V. 5. No. 4. P. 806–809.
38. *Price J. C.* On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales // J. Applied Meteorology. 1982. V. 21. P. 1111–1122.
39. *Saradjian M. R., Akhoondzadeh M.* Thermal anomalies detection before strong earthquakes ($M > 6.0$) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. No. 11. P. 1099–1108.
40. *Sekioka M., Yuhara K.* Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface // J. Geophysical Research. 1974. V. 79. No. 14. P. 2053–2058.
41. *Singh, Ashbindu.* Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data // Intern. J. Remote Sensing. 1989. V. 10. Iss. 6. P. 989–1003.
42. SST data sets: overview and comparison table. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/sst-data-sets-overview-comparison-table> (актуально в 2017).
43. *Stramska M., Białogrodzka J.* Spatial and Temporal Variability of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea Based on 32-years (1982–2013) of Satellite Data // Oceanologia. 2015. V. 57. Iss. 3. P. 223–292.
44. *Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Paciello R., Pergola N.* One year of RST based satellite thermal monitoring over two Italian seismic areas // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2015. V. 56. No. 2. P. 275–294.
45. *Tronin A.* The satellite-measured sea surface temperature change in the Gulf of Finland // Intern. J. Remote Sensing. 2017. V. 38. No. 6. P. 1541–1550.
46. *Watson K., Rowan L. C., Offield T. V.* Application of Thermal Modelling in Geologic Interpretation of IR Images // Proc. 7th Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. Ann Arbor. Michigan. 1971. P. 2017–2041.
47. *Xue Y., Cracknell A. P.* Advanced Thermal Inertia Modeling // Intern. J. Remote Sensing. 1995. V. 16. No. 3. P. 431–446.

Long-term remote observations of land surface temperature of the North-Western region of Russia

A. A. Tronin, V. I. Gornyy, V. N. Gruzdev, B. V. Shilin

Saint-Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS,
Saint Petersburg, 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

The paper covers algorithms for information extraction from time series of land surface temperature (LST) data obtained using airborne and satellite based thermal surveys. The peculiarity of aerospace survey using imaging in the infrared thermal spectral range of electromagnetic waves is the existence of daily, annual and long-term thermal rhythms of solar heating resulting in variations of land surface temperature. Positive trends of temperature were observed over the past decades for water reservoirs and urban areas. To perform analysis of LST daily variations, the thermal inertia approach was used. As a result, the maps of land surface thermal properties were compiled. With these maps the detailed spatial distribution of LST for few scenarios of climate change and urbanization were forecasted. Absence of domestic (Russian) infrared thermal airborne scanners with internal temperature calibration restricts the use of advanced algorithms for the LST analyses. Statistical algorithms and change detection method are typically used to search for LST anomalies. In spite of this, the infrared thermal aerial survey technologies for troubleshooting of municipal house heating systems as well as mapping of industrial and household water waste plumes were taken up to the level of broad practical implementation.

Keywords: remote sensing, temperature, thermal rhythms, time series, climate change, urbanization, information, prognosis, ecological safety

Accepted: 03.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-73-96

References

1. Alimov A. F., Golubkov S. M., *Izmeneniya v ekosistemakh vostochnoi chasti Finskogo zaliva (Changes in ecosystems of Eastern part of Gulf of Finland)*, *Vestnik RAN*, 2008, Vol. 78, No. 3, pp. 223–234.
2. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii (Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in Russian Federation)*: Moscow: Rosgidromet, 2014, 1008 p.
3. Gavrilov D. S., Gruzdev V. N., Vasil'ev I. A., Khotyakov V. V., Shilin B. V., *Osnovnye dostizheniya v razvitiit teplovoi aeros"emki (Main achievements in the development of thermal aerial photography)*, *Opticheskii zhurnal*, 2003, Vol. 70, No. 10, pp. 77–83.
4. Gavrilov D. S., Shilin B. V., *Monitoring zagryaznenii akvatorii s pomoshch'yu aviatsionnogo teplovizionnogo kompleksa (Monitoring of water pollution with help of airborne thermal scanner)*, *Opticheskii zhurnal*, 2004, Vol. 71, No. 3, pp. 77–82.
5. Gornyy V. I., *Geodinamika Vostochno-Evropeskoi i Zapadno-Sibirskoi platform (po dannym distantsionnogo geotermicheskogo metoda) (Geodynamics of East-Europeans and West Siberian platforms (according results of the remote geothermal method))*, *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2000, No. 12, pp. 76–86.
6. Gornyy V. I., *Kosmicheskie izmeritel'nye metody infra-krasnogo teplovogo diapazona pri monitoringe potentsial'no opasnykh yavlenii i ob"ektov (Satellite borne infrared thermal methods for monitoring of natural hazard events and objects)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 2, No. 1, pp. 10–16.
7. Gornyy V. I., *Raspredelenie konvektivnogo teplovogo potoka v Belomorskom regione po dannym distantsionnogo geotermicheskogo metoda (Distribution of the convective heat flow in the White Sea region according the results of the remote geothermal method)*, *Prirodnaya sreda Solovetskogo arkhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata (Natural Environment of Solovetslii Archipelago in Conditions of Climate Change)*, Ekaterinburg: UrO RAN, 2007, pp. 26–28.
8. Gornyy V. I., Teplyakova T. E., *O vliyaniit endogenno go tepla Zemli na formirovanie v boreal'noi zone lokal'nykh arealov nemoral'noi rastitel'nosti (Influence of the Earth's Endogenic Heat on the Formation of Local Nemoral Vegetation Areas in the Boreal Zone)*, *DAN*, 2001, Vol. 378, No. 5, Geografiya, pp. 560–561.
9. Gornyy V. I., Shilin B. V., Yasinskii G. I., *Teplovaya aerokosmicheskaya s"emka (Thermal airborne and satellite borne survey)*, Moscow: Nedra, 1993, 128 p.

10. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Shilin B.V., Distantсионnyi izmeritel'nyi monitoring teplopoter' gorodskikh i promyshlennykh aglomeratsii (na primere Sankt-Peterburga i Khel'sinki) (Remote measuring monitoring of heat losses in urban areas of Saint Petersburg and Helsinki), *Teploeffektivnye tekhnologii*, No. 2, 1997, pp. 17–23.
11. Gornyy V.I., Gruzdev V.N., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Shilin B.V., Sravnenie teplopoter' teploprovodov s razlichnymi tipami izolyatsii metodom polevoi infrakrasnoi radiometrii (Comparison of heat losses of underground house heating pipelines with different types of thermal isolation by using remote infrared thermal observation), *Teploeffektivnye tekhnologii*, No. 4, 1997, pp. 54–59.
12. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Termodinamicheskii podkhod dlya distantсионного kartografirovaniya narushennosti ekosistem (Thermodynamic approach for mapping disturbance of ecosystems by remote sensing methods), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194.
13. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Khramtsov V.N., Verifikatsiya krupnomasshtabnykh kart termodinamicheskogo indeksa narushennosti ekosistem health disturbance (Verification of large scale maps of thermodynamic index ecosystem), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212.
14. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Osobennosti mineralogicheskoi zonal'nosti rudnomagmatischeskikh sistem, vmeshchayushchikh kvartsevo-zhil'nye mestorozhdeniya zolota (po materialam sputnikovoi spektrometrii) (Regularities of rock alteration assemblages of ore-magmatic systems containing quartz-vein manifestations of gold (by satellite spectrometry), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 140–156.
15. Gornyy V.I., Lyal'ko V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Brovkina O.V., Kiselev A.V., Davidan T.A., Lubskii N.S., Krylova A.B., Prognoz teplovoi reaksii gorodskoi sredy Sankt-Peterburga i Kiev na izmenenie klimata (po materialam s'emok sputnikami EOS i Landsat) (Forecast of Saint-Petersburg and Kiev thermal replies on climate change (on the basis of EOS and Landsat satellite imagery), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 176–191.
16. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Kiselev A.V., Brovkina O.V., Filippovich V.E., Stankevich S.A., Lubskii N.S., Teplofizicheskie svoystva poverkhnosti gorodskoi sredy (po rezul'tatam sputnikovoykh s'emok Sankt-Peterburga i Kiev) (Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 74–89.
17. Gornyy V.I., Donchenko V.K., Samulenkov D.A., Sapunov M.V., Brovkina O.V., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., O tsirkulyatsii vozdushnykh mass v "teplovykh ostrovakh" gorodov (On Air Circulation in "Heat Islands" of Urban Areas), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 207–212.
18. Gruzdev V.N., Zaitsev V.A., Shilin B.V., Razvitie tekhnicheskikh sredstv i metodiki teplovoi aeros'emki (Development of instruments and technique of airborne survey), Proceedings of the International Conference "Prikladnaya Optika — 2008" (Applied optics — 2008), Saint-Petersburg, 20–24 October 2008, pp. 251–258.
19. Kritsuk S.G., Gornyy V.I., Latypov I.Sh., Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskikh kharakteristik zemnoi poverkhnosti (Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 277–290.
20. Naumenko M.A., Guzivatyj V.A., Karetnikov S.G., Termicheskii rezhim Ladozhskogo ozera (Thermal regime of the Ladoga lake), *Ladoga*, Saint-Petersburg: Institut ozerovedeniya RAN, 2013, pp. 137–151.
21. Stankevich S.A., Filippovich V.E., Lubskii N.S., Krylova A.B., Kritsuk S.G., Brovkina O.V., Gornyy V.I., Tronin A.A., Interkalibratsiya metodov vosstanovleniya termodinamicheskoi temperatury poverkhnosti urbanizirovannoi territorii po materialam teplovoi kosmicheskoi s'emki (Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal-infrared satellite imaging), *Ukrains'kii zhurnal distantсионного zondirovaniya Zemli*, 2015, No. 7, pp. 14–23.
22. Tronin A.A., Shilin B.V., Monitoring shleifov gorodskikh ochistnykh sooruzhenii Sankt-Peterburga aeroskosmicheskoi teplovoi s'emkoi (Monitoring of plumes of outputs from urban refineries by using infrared thermal satellite and airborne survey), *Sovremennye problemy distantсионного zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, Vol. 2, pp. 586–594.
23. Tronin A.A., Shilin B.V., Kosmicheskoe teplovidenie pri reshenii zadach ekologicheskoi bezopasnosti (Satellite borne infrared thermal imagery at the decision of problems of ecological safety), *Opticheskii zhurnal*, 2015, Issue 7, Vol. 82, pp. 19–24.
24. Shilin B.V., Molodchinin I.A., *Kontrol' sostoyaniya okruzhayushchei sredy teplovoi aeros'emkoi* (Control of environment state by airborne infrared thermal survey), Moscow: Nedra, 1992, 76 p.

25. Shilin B. V., Tronin A. A., Teplovaya aeros"emka. Istoriya, razvitiya i sostoyanie (Infrared thermal survey. The history of development and modern state), *Opticheskiy zhurnal*, 2015, Vol. 82, No. 7, pp. 4–9.
26. Avissar R., Pielke R. A., A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Monthly Weather Review*, 1989, 117, pp. 2113–2136.
27. Bradtke K., Herman A., Urbański J. A., Spatial and Interannual Variations of Seasonal Sea Surface Temperature Patterns in the Baltic Sea, *Oceanologia*, 2010, Vol. 52, Issue 3, pp. 345–362.
28. Brown O. B., Minnett P. J., *MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.0*, Miami: University of Miami, 1999, 98 p.
29. Caldeira K., Wickett M. E., Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature*, 2003, Vol. 425 (6956), pp. 365–365.
30. Cotton W. R., Pielke R. A., *Human Impacts on Weather and Climate*, Cambridge: University Press, 2007, 308 p.
31. Cracknell A. P., *The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*, London: Taylor and Francis, 1997, 534 p.
32. Cracknell A. P., Xue Y., Thermal inertia determination from space — a tutorial review, *International J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 3, pp. 431–461.
33. *Encyclopedia of Global Warming and Climate Change*, London: SAGE Publications, Inc., 2012, 1641 p.
34. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Shilin B. V., Estimation of Nuclear Power Plants Influence on the Baltic Sea Thermal State by Using Infrared Thermal Satellite Data, *International J. of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, Issue 12, pp. 2479–2496.
35. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Remote Mapping of Thermodynamic Index of Ecosystem Health Disturbance, *J. Environmental Protection*, 2010, No. 1, pp. 242–250.
36. Jaeger J. C., Conduction of heat in a solid with periodic boundary conditions with application to the surface temperature of the moon, *Proc. Cambridge philosophical society*, 1953, Vol. 49, Part 2, pp. 355–359.
37. Jiménez-Muñoz J.-C., Sobrino J. A., Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval from Low-Resolution Thermal Infrared Sensors, *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2008, Vol. 5, No. 4, pp. 806–809.
38. Price J. C., On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales, *J. Applied Meteorology*, 1982, Vol. 21, pp. 1111–1122.
39. Saradjian M. R., Akhoondzadeh M., Thermal anomalies detection before strong earthquakes ($M > 6.0$) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, No. 11, pp. 1099–1108.
40. Sekioka M., Yuhara K., Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface, *J. Geophysical Research*, 1974, Vol. 79, No. 14, pp. 2053–2058.
41. Singh, Ashbindu, Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *International J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10, Issue 6, pp. 989–1003.
42. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/sst-data-sets-overview-comparison-table>.
43. Stramska M., Białogrodzka J., Spatial and Temporal Variability of Sea Surface Temperature in the Baltic Sea Based on 32-years (1982–2013) of Satellite Data, *Oceanologia*, 2015, Vol. 57, Issue 3, pp. 223–292.
44. Tramutoli V., Corrado R., Filizzola C., Genzano N., Lisi M., Paciello R., Pergola N., One year of RST based satellite thermal monitoring over two Italian seismic areas, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2015, Vol. 56, No. 2, pp. 275–294.
45. Tronin A., The satellite-measured sea surface temperature change in the Gulf of Finland. *International J. Remote Sensing*, 2017, 38, No. 6, pp. 1541–1550.
46. Watson K., Rowan L. C., Offield T. V., Application of Thermal Modelling in Geologic Interpretation of IR Images, *Proc. 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, 1971, pp. 2017–2041.
47. Xue Y., Cracknell A. P., Advanced Thermal Inertia Modeling, *Internayional J. Remote Sensing*, 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 431–446.