

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна»

На правах рукописи

Енукова Евгения Александровна

**Городские «острова тепла» в поле температуры
поверхности по данным космических снимков**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель
Локощенко М.А., доцент, к.г.н.

Дубна - 2025 г.

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор литературы и методические проблемы.....	14
1.1 Физико-географическая характеристика Московского региона, включая климат, рельеф и водные ресурсы.....	14
1.1.1 Климат Московского региона.....	17
1.1.2 Рельеф территории Московского региона.....	21
1.2 Городские «острова тепла»: причины их образования, методы изучения, общие географические закономерности.....	23
1.2.1 Причины образования городских «островов тепла».....	24
1.2.2 Пространственная структура «острова тепла».....	27
1.2.3 Методы изучения городских «островов тепла».....	30
1.3 Использование спутниковых данных в городской климатологии. Свойства космических снимков, особенности измерений в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн, спутники Terra и Aqua, радиометр MODIS. Методические основы использования радиометрических данных о температуре поверхности.....	35
1.3.1 Краткая история спутниковых данных.....	35
1.3.2 Электромагнитное излучение.....	37
1.3.3 Методы дистанционного зондирования Земли.....	38
1.3.4 Основные виды аппаратов ДЗЗ.....	39
1.3.6 Снимки в тепловом ИК-диапазоне длин волн.....	41
1.3.7 Спутники Terra и Aqua.....	43
1.3.8 Радиометр MODIS.....	45
Глава 2. Поверхностный «остров тепла» Москвы.....	49
2.1 Данные и программное обеспечение.....	49
2.2 Время пролета спутников.....	52
2.3 Анализ пространственной устойчивости значений интенсивности «острова тепла» в Москве.....	54
2.4 Методические проблемы сравнений спутниковых данных о температуре поверхности с данными наземной метеорологической сети.....	59
2.5 Численные эксперименты по имитации облаков на снимках и их влияние на расчет интенсивности поверхностного «острова тепла».....	67
2.6 Общая характеристика поверхностного «острова тепла» Москвы, закономерности годового и суточного хода его интенсивности.....	78
2.7 Многолетние изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы за последние 20 лет и их связь с современными изменениями климата.....	84
2.8 Влияние карантина из-за пандемии коронавируса в 2020 году на поверхностный «остров тепла» Москвы.....	86
Выводы к главе.....	94
Глава 3. Пространственная структура поверхностного «острова тепла» и термический режим разных типов городской поверхности в Москве.....	97
3.1 Термическая неоднородность городской поверхности и основы её классификации на примере Москвы.....	97
3.2 Локальные «острова холода» городских лесопарков Москвы. Исследование связей интенсивности «островов холода» с их площадью, вегетационным индексом (NDVI) и индексом листовой поверхности (LAI).....	99
3.2.1. Влияние растительности на поле температуры внутри города.....	100
3.2.2. «Острова холода» в Московских лесопарках.....	104
3.2.3 Интенсивность «островов холода» отдельных лесопарков Москвы.....	116

3.2.4 Площадь парка и интенсивность поверхностного локального «острова холода».....	120
3.2.5 Вегетационный индекс NDVI и интенсивность поверхностных «островов холода».....	122
3.2.6 Индекс листовой поверхности (LAI) и интенсивность «островов холода».....	130
3.3 Термический режим поверхности открытой воды, лугов и песчаных поверхностей на территории Москвы.....	134
3.3.1. Открытая вода.....	134
3.3.2. Луговые поверхности.....	139
3.3.3. Песчаные поверхности.....	142
3.4. Методические проблемы определения границ зоны плотной городской застройки и ее термический режим.....	145
3.5. Обобщение данных о температуре разных типов городской поверхности и анализ значимости различий между ними.....	151
Выводы к главе.....	155
Глава 4. Температура поверхности и «острова тепла» малых городов Московского региона. .	157
4.1 Исследование поля температуры поверхности Московского региона, его географической зональности и многолетних изменений по данным спутников Terra и Aqua.....	157
4.2. Сравнительный анализ поверхностных «островов тепла» городов и малых населённых пунктов Московского региона.....	167
Выводы к главе.....	178
Глава 5. Поверхностный «остров тепла» в условиях тропиков.....	179
5.1. Изучаемая территория.....	180
5.2 Методические аспекты анализа данных в условиях тропиков.....	185
5.3 Характеристика поверхностных «островов тепла» в условиях тропиков.....	188
Выводы к главе.....	195
Заключение.....	196
Список литературы.....	198

Введение.

Актуальность работы: Человек создает вокруг себя уникальную среду обитания, называемую город. В современном мире территория и население городов неуклонно растут. Ныне уже более половины человечества (57%) проживает в городах, занимающих лишь ~1% площади планеты. Плотность населения в центральной части некоторых крупных городов достигла критических значений 30-40 тыс. чел./км², а на их периферии продолжается разрастание городской территории. Естественное покрытие заменяется бетоном и асфальтом. Производство и автомобильный транспорт, которые являются основными источниками загрязнения атмосферы, в основном сосредоточены в городах. Все это отражается на состоянии микроклимата территории городов. Особенно сильно городская среда влияет на температуру приземного слоя воздуха и поверхности. В центре города она почти всегда выше, чем на его окраине. Эта разность означает феномен так называемого городского «острова тепла».

Городской «остров тепла» – это территория города, характеризующаяся повышенной по сравнению с окружающей сельской местностью температурой воздуха ТВ. Явление городского «острова тепла» существует почти повсеместно, кроме только городов со специфическими природными условиями (см. главу 5). Городские «острова тепла» проявляются в поле не только ТВ, но также температуры поверхности ТП и почвы. Городские «острова тепла» усиливают глобальное потепление климата. Изучение этого явления важно для задач энергетики (оценок затрат на отопление зимой и на кондиционирование зданий летом), уточнения краткосрочных прогнозов погоды, расчётов биопродуктивности растений, оценок опасностей для здоровья населения городов (теплового стресса при жаркой погоде). «Острова тепла» являются важным объектом изучения геоэкологии, поскольку связаны с антропогенными ландшафтами и их суммарным влиянием на географическую оболочку. Многолетние результаты спутниковых измерений ТП служат ценным средством геоэкологических исследований. Ещё одним важным для геоэкологии показателем, изменения которого могут влиять на ТП и интенсивность «островов тепла», является вегетационный индекс, значения которого также доступны по результатам измерений с борта спутников.

Степень разработанности проблемы: Впервые данное явление городского «острова тепла» было открыто на примере Лондона метеорологом-любителем Люком Говардом [67] лишь в 1818 году. Затем похожие исследования были проведены во многих других городах. В середине 20 столетия эти работы были обобщены в трудах таких знаменитых городских климатологов как В.Бёер [15], П.А.Кратцер [70], Т.Оке [36,82] и Г.Е. Ландсберг [31]. В настоящее время исследование данного явления продолжается в работах огромного количества российских и зарубежных авторов. Исследования проводятся для малых, средних и крупных городов по всему миру. Наша столица Москва тоже не стала исключением. В работах [73-76; 27-29, 34] представлено изучение пространственного распространения этого явления на высотах, глубинах и в приземном слое воздуха по данным метеорологической сети. Однако, плотности наземной

сети не хватает, чтобы выявить подробную картину пространственных изменений поля температуры воздуха внутри города, а при расчетах интенсивности «острова тепла» могут возникать ошибки, связанные с особенностями расположения отдельных станций. Поэтому еще в середине прошлого века для исследования данного явления начали применять тепловые космические снимки в инфракрасном диапазоне длин волн электромагнитного спектра. Многие зарубежные авторы уже применили этот метод для изучения пространственного поля температуры поверхности внутри своих городов (Будапешт, Венгрия [86]; Эрбил, Ирак [91]; города Западной Сибири, Россия [78], Саламанка, Испания [50]; Рим, Италия [64]; Калькутта, Индия [84]; Сидней, Австралия [92], Афины, Греция [94] и др.). Однако исследование особенностей температурного режима в Москве по данным спутников не нашло пока широкого освещения ни в российской, ни в зарубежной литературе. Космические снимки здесь применялись другими авторами исключительно для составления температурных характеристик поверхности внутри города [22], но не для расчета параметров поверхностного «острова тепла».

Цель и задачи исследования.

Основная цель исследования заключается в выявлении пространственных и временных характеристик «острова тепла» в Москве по спутниковым данным о температуре поверхности региона.

Основные задачи исследования:

1. Разработка методики работы с данными удаленного зондирования Земли о температуре поверхности и способов их применения для расчета показателей поверхностного «острова тепла» в Москве;
2. Изучение годового хода и долговременных изменений, а также пространственной структуры поверхностного «острова тепла» Москвы, включая пять основных типов поверхности города (лесопарков, открытой воды, плотной застройки, луговых и песчаных поверхностей);
3. Анализ систематических смещений в оценках интенсивности поверхностного «острова тепла», связанных с её изменениями в суточном ходе и наличием данных преимущественно в антициклональных условиях;
4. Исследование поверхностных «островов тепла» в крупных и малых населённых пунктах Московского региона и соседних областей, выявление зависимостей их температурного влияния от площади и числа жителей;
5. Сравнение особенностей городских поверхностных «островов тепла» в средних широтах (Московский регион) и в тропиках (Дели и Бангалор, Индия).

Объект и предмет исследования: Предметом исследования является повышение температуры воздуха в условиях городской среды. При этом объект – поле температуры поверхности Московского региона и явление городского поверхностного «острова тепла» в столичном мегаполисе Москва.

Методология и методы исследования: В работе использовалась методика определения интенсивности городского «острова тепла» на основе результатов дистанционного зондирования Земли.

Источником стала открытая база данных космических снимков спутников Terra и Aqua, оснащённых радиометрами MODIS, представленная на официальном сайте космического агентства США Earthdata.nasa.gov. Из всего объёма имеющихся там данных были отобраны безоблачные и малооблачные снимки территории Московского региона за период с 2000 по 2020 гг. Всего с обоих спутников удалось получить 1379 таких снимков за весь период наблюдений. Информация о температуре поверхности, предоставляемая радиометрами, содержится в отдельном тематическом продукте под названием LST (Land Surface Temperature), который имеет пространственное разрешение 1 км и точность измерения температуры поверхности суши ± 1 °С. Распределение температуры поверхности в исследуемом регионе было получено после обработки космических снимков в программе Scanex Image Processor, разработанной ИТЦ «СканЭкс». Для исследования «островов тепла» самых малых населённых пунктов, а также температуры малых по площади типов городской поверхности (песчаных и луговых территорий) были также использованы снимки спутников серии Landsat. Расчет средних значений температуры поверхности и интенсивности «острова тепла», а также различных статистических характеристик производился в программном обеспечении Microsoft Excel и Statistica 7. При построении карт температурного поля Московского региона использовалась программа Surfer, работающая на различных методах интерполяции. Для решения основных задач моей диссертационной работы использовались векторные слои различных объектов, например, границ города Москва, Московской области, малых городов и деревень Московского региона, отдельных лесопарковых зон Москвы, а также Дели и Бангалора. Все эти векторные слои были построены на ГИС-портале Geo-MiXer, позволяющем работать с космическими снимками различного пространственного разрешения и применять графические методы обработки.

Помимо прочего, для сравнения характеристик интенсивности «острова тепла» в Москве в поле температуры поверхности и в приземном слое воздуха были привлечены данные наземной сети метеорологических станций за различные периоды времени.

К анализу характеристик температурного воздействия городских лесов и парков необходимо было привлечь значения вегетационного индекса (NDVI) и индекса листовой поверхности (LAI). Это отдельные продукты дистанционного зондирования Земли, полученные по результатам съемки поверхности Земли радиометром MODIS.

В ходе работы разработана собственная оригинальная методика определения пригодности космических снимков для анализа характеристик городского «острова тепла». Она стала результатом численных экспериментов с имитацией облачного покрова над различными частями территории города и области.

Научная новизна: •

Впервые были получены средние оценки интенсивности поверхностного «острова тепла» и её годового хода в Москве по многолетним данным спутников;

- Впервые изучены многолетние изменения «острова тепла» крупного города в поле температуры поверхности, а также вегетационного индекса;
- Впервые выявлены пороговые значения доли покрытия территории облаками, которые не приводят к большим смещениям оценок интенсивности «острова тепла»;
- На основе сравнений с данными метеорологических станций впервые определены поправки на дискретное время пролёта спутников (приведение интенсивности к среднесуточным значениям) и на антициклональные условия ясного неба (приведение интенсивности к средним условиям);
- Впервые подробно исследована зависимость интенсивности поверхностного «острова тепла» от выбора площади зоны сравнения или границ самого города;
- Подробно изучена неоднородная термическая структура городской поверхности. Впервые получены средние многолетние значения интенсивности локальных «островов холода» в лесопарковых зонах города Москвы, исследован ее годовой ход и зависимости от площади парка, вегетационного индекса NDVI и индекса площади листовой поверхности LAI; изучен многолетний термический режим поверхности открытой воды и плотной городской застройки;
- Впервые получены зависимости интенсивности «островов тепла» от площади и числа жителей городов и деревень в широких диапазонах от 10^1 до 10^7 человек и от 10^{-1} до 10^3 км²;
- Получены оценки интенсивности поверхностных «островов тепла» для крупнейших городов Индии.

Положения, выносимые на защиту.

1. На территории Москвы выявлена положительная многолетняя аномалия в поле температуры поверхности Земли с максимальной интенсивностью летом (в июне-июле) и минимальной осенью (в октябре-ноябре), усиление которой в 2000-х годах сменилось стабилизацией значений среднегодовой интенсивности в последующие годы;
2. Поверхностные «острова тепла» присущи не только крупным городам, но и средним, и даже малым населённым пунктам. Их интенсивность зависит от площади города, численности населения, степени озеленения и географического положения;
3. Термическое поле Москвы неоднородно с наибольшими значениями ТП в зоне плотной городской застройки и локальными минимумами («островами холода») в крупных лесопарках города, охлаждающий эффект которых зависит от площади парка, значения вегетационного индекса NDVI и индекса листовой поверхности.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Представленные в данной работе материалы и выводы могут быть использованы для оценки экономических последствий увеличения температуры внутри города, основываясь на экономии тепло- и энергоресурсов в зимнее время и увеличении затрат на охлаждение летом. Полученные оценки охлаждающего эффекта городских лесопарков могут быть использованы в градостроительстве и

геоурбанистике, включая развитие рекреационных зон внутри городов. Данные могут применяться в педагогической деятельности, в частности для изучения дисциплин «Городская климатология», «Экологическая климатология» и др.

Научная значимость работы определяется выявлением статистически достоверных зависимостей между различными факторами среды и интенсивностью «островов холода» и «островов тепла» и может служить базой для дальнейших исследований.

Апробация результатов исследования: Основные результаты исследования были представлены на следующих мероприятиях:

- 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse, France, 20-24 July 2015;
- VII Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум» – 2015. Российская Академия Естествознания, 15 февраля – 31 марта 2015 г.;
- Пятый Международный экологический конгресс (седьмая международная научно-техническая конференция) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT-2015, Самара – Тольятти, 16-20 сентября 2015 г.;
- XX Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», с. Безводное, Нижегородская область, 24-26 мая 2016 г.;
- Всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». Москва, 20-22 марта 2017 г., ИГКЭ;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», Москва, МГУ;
- 15-я Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 13–17 ноября 2017 г. ИКИ РАН;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», Москва, МГУ;
- 16-я Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов), Москва, 2018, ИКИ РАН;
- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», Москва, МГУ;
- 17-я Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов). Москва, 11-15 ноября 2019 г., ИКИ РАН.
- Конференция к 100-летию со дня рождения М.А.Петросянца «М.А.Петросянц и отечественная метеорология», Москва, 21-22 ноября 2019 г. М., МГУ и ГМЦ;

- Всероссийская конференция «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования КЛИМАТ-2019». Москва, 26–28 ноября 2019 г. М., ИФА РАН;
- XXIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», стр.39-40. пос. Борок, 5-9 октября 2020 г., Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта;
- 18-я Всероссийская Открытая конференция с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Москва, 16-20 ноября 2020 г. М., ИКИ РАН;
- 19-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г.
- 20-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г.
- 10th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Australia, 27 August – 01 September, 2023.
- 22-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Москва, ИКИ РАН, 2024 г.
- Международная конференция I Белорусский Географический конгресс, Минск, Беларусь, апрель 2024 г.

Публикации автора по теме диссертации:

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

1. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. – 2020. - № 7. - С. 50-63. (Импакт-фактор РИНЦ = 1.53; 0,81 п.л.; вклад автора 50%)

Lokoshchenko M.A., **Erukova E.A** Urban Heat Island in Moscow Derived from Satellite Data // Russian Meteorology and Hydrology. – 2020. - Vol. 45, № 7. - pp. 488–497. (JCI = 0.22; 0,81 п.л.; вклад автора 50%)

2. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Острова тепла малых городов и деревень Московского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле – 2021. – Т. 500, № 2. - С.200-207. (Импакт-фактор РИНЦ = 1.37; 0,4 п.л.; вклад автора 50%)

Lokoshchenko M.A., **Erukova Ye.A.** Heat Islands of Small Towns and Villages in Moscow Region // Doklady Earth Sciences – 2021. - Vol. 500, Part 2 - P. 875–881 (SJR = 0.295; 0,4 п.л.; вклад автора 50%).

3. Lokoshchenko M.A., **Erukova E.A** Surface Urban Heat Island in Moscow during the COVID-19 Pandemic Lockdown in 2020 // *Geography, Environment, Sustainability* – 2022. - Vol.15, №.4. - pp.134-144. (SJR – 0,35; 0,792 п.л.; вклад автора 50%)

4. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.**, Алексеева Л.И. О современных изменениях «острова тепла» Москвы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле – 2023. – Т. 511, № 2. - С. 243-253. (Импакт-фактор РИНЦ - 1,37; 0,63 п.л.; вклад автора 30%)

Lokoshchenko M.A., **Erukova E.A.**, and Alekseeva L.I. Modern Changes of the Urban Heat Island in Moscow // *Doklady Earth Sciences* – 2023. - Vol. 511, Part 2, - P. 716–725 (SJR = 0.295; 0,4 п.л.; вклад автора 50%).

Иные публикации автора по теме диссертации:

1. Сорокина Е.А., Локощенко М.А. Поверхностный «остров тепла» в Москве по данным спутников // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна» Серия «Естественные и инженерные науки» - 2017. - № 1 (37). - С.32-38 (Импакт-фактор РИНЦ = 0,032; 0,81 п.л., вклад автора 60%)

2. Lokoshchenko M.A., Korneva I.A., Erukova Ye.A. Urban Heat Island in Moscow at different heights, depths and on the surface // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES)* – 2020. - Vol.606. – 012030 (SJR = 0,21; 1,16 п.л., вклад автора 30%)

3. Lokoshchenko M.A., Sorokina E.A. Urban ‘heat island’ in Moscow by satellite data // In: *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9) jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse, France* – 2015. - 11-7-3911378_a (Импакт-фактор отсутствует, 0,58 п.л., вклад автора 50%)

4. Сорокина Е.А., Локощенко М.А., Алексеева Л.И. Анализ интенсивности городского «острова тепла» в Москве // Труды VII Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум» – 2015. – 2015013948 (Им-пакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 70%)

5. Сорокина Е.А., Локощенко М.А. Острова холода в Москве // Труды Пятого Международного экологического конгресса (седьмой международной научно-технической конференции) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT-2015, Самара – Тольятти – 2015. – Том. 5. – С. 254-261 (Импакт-фактор отсутствует, 0,92 п.л., вклад автора 70%)

6. Енукова Е.А. Температура поверхности Московского региона по данным спутников // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В.Ломоносова. Под ред. М.А.Локощенко. – М.: МАКС Пресс - 2018. – Т. 1. - С. 124-129 (Импакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 100%)

7. Енукова Е.А. Поверхностный городской «остров тепла» в Москве в 2018 году по данным орбитальных спутников // Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2018 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ имени М.В. Ломоносова. Под ред. М.А. Локощенко. – М.: МАКС Пресс - 2019. – Т.1. - С. 111-118 (Импакт-фактор отсутствует, 0,46 п.л., вклад автора 100%)

8. Локощенко М.А., Алексеева Л.И., Енукова Е.А., Корнева И.А. Остров тепла Москвы и его климатические характеристики. // Материалы I Белорусского Географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества. Минск. - 2024 – Ч. 1. – С. 279-284 (Импакт-фактор отсутствует, 0,35 п.л., вклад автора 30%)

Тезисы докладов:

1. **Сорокина Е.А.**, Локощенко М.А. «Остров тепла» в Москве по спутниковым данным. В сб.: Тезисы докладов XX Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», с. Безводное, Нижегородская область, 24-26 мая 2016 г. Нижний Новгород, типография Института прикладной физики РАН, 2016, стр.47-48.

2. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Мониторинг температуры поверхности Московского региона. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». Москва, 20-22 марта 2017 г. / Отв. сост. А.А. Трунов, П.Д. Полумиева, А.А. Романовская. [Электронный ресурс] —М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017, стр.84-85. ISBN 978-5-600-01726-9.

3. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Температура поверхности Московского региона по данным спутников Terra и Aqua. В сборнике тезисов: Материалы Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 13–17 ноября 2017 г., стр.182.

4. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Острова холода в Москве по спутниковым данным. В сборнике тезисов: Материалы Шестнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», Москва, 2018, ИКИ РАН, стр.176.

5. **Енукова Е.А.**, Локощенко М.А., Гоуда К.Ч. Исследование температурных аномалий поверхности в крупных городах Индии. В сборнике тезисов: Материалы Семнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11-15 ноября 2019 г. М., ИКИ РАН, 2019, стр.171.

6. Локощенко М.А., Алексеева Л.И., Еланский Н.Ф., **Енукова Е.А.**, Богданович А.Ю., Гоуда К.Ч. Опасные погодные явления и «острова тепла» в крупнейших городах Индии и России. Тезисы

конференции к 100-летию со дня рождения М.А.Петросянца «М.А.Петросянец и отечественная метеорология», Москва, 21-22 ноября 2019 г. М., отпечатано ООО «Тирекс», 2019, стр.33.

7. Локощенко М.А., Корнева И.А., **Енукова Е.А.** Остров тепла в Москве на разных высотах, глубинах и поверхности. Тезисы конференции к 100-летию со дня рождения М.А.Петросянца «М.А.Петросянец и отечественная метеорология», Москва, 21-22 ноября 2019 г. М., отпечатано ООО «Тирекс», 2019, стр.44.

8. Локощенко М.А., Корнева И.А., **Енукова Е.А.** Проявление острова тепла в Москве у поверхности, в атмосфере и почве. Тезисы докладов Всероссийской конференции «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования КЛИМАТ-2019». Москва, 26–28 ноября 2019 г. М., Физматкнига, 2019, 180 с. – ISBN 978-5-89155-324-8, стр.61.

9. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Алексеева Л.И., **Енукова Е.А.**, Богданович А.Ю., Гоуда К.Ч. Климатические различия, опасные природные явления и «острова тепла» в крупнейших городах России и Индии. В сб.: Тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», стр.39-40. Борок, 5-9 октября 2020 г. / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль: Филигрань, 2020. – 124 с. ISBN 978-5-6044384-1-1.

10. **Енукова Е.А.**, Локощенко М.А. Температурный режим лесопарков Москвы. В сб.: Тезисы докладов XXIII Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», стр.78-79. Борок, 5-9 октября 2020 г. / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль: Филигрань, 2020. – 124 с. ISBN 978-5-6044384-1-1.

11. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Исследование «поверхностных островов тепла» в городах и малых населённых пунктах Московского региона по данным спутников Aqua и Terra. Индекс статьи: XVIII.D.458. В сб. тезисов: Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 16-20 ноября 2020 г. М., ИКИ РАН, 2020. С. 233. ISBN 978-5-00015-052-8; DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.

12. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Спутниковые данные о «поверхностном острове тепла» Москвы во время карантина из-за пандемии коронавируса в 2020 году. Индекс статьи: XIX.D.261. В сборнике: Материалы Девятнадцатой международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г. М., ИКИ РАН, 2020. С. 233. ISBN 978-5-00015-008-5; DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.

13. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Поверхностный остров тепла Москвы и его изменения в XXI веке по данным спутников Terra и Aqua. Индекс статьи: XX.D.266. В сборнике: Материалы Двадцатой

международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2022 г. М., ИКИ РАН, 2022.

14. Lokoshchenko M.A. and **Енукова Е.А.** Surface Urban Heat Islands in Moscow and small towns of Moscow Region. Proceedings of the ICUC11, UNSW, Sydney, Australia, 2023, p.470.

15. Локощенко М.А., **Енукова Е.А.** Термическая неоднородность городской поверхности Москвы по многолетним данным спутников MODIS и Landsat. Индекс статьи: XXII.D.458 в сборнике: Материалы Двадцать второй международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2024 г. М., ИКИ РАН, 2024. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a.

Объем диссертации: Данная работа состоит из введения, 5 глав (Глава 1. Обзор литературы и методические проблемы; Глава 2. Поверхностный «остров тепла» Москвы; Глава 3. Пространственная структура поверхностного «острова тепла» Москвы и термический режим разных типов поверхности; Глава 4. Температура поверхности и «острова тепла» малых городов Московского региона; Глава 5. Поверхностные «острова тепла» в условиях тропиков), заключения и списка литературы (120 наименований). В работе используется графическое и табличное представление результатов. Материал работы изложен на 203 страницах, содержит 41 таблицу и 106 рисунков.

Благодарности: Автор диссертации выражает свою благодарность научному руководителю Локощенко М. А. за неоценимую помощь, понимание и поддержку во время подготовки и написания работы; Зимину М. В. за бесплатное программное обеспечение и предоставленную возможность обучения на базе ИТЦ «СканЭкс»; преподавательскому составу кафедры «Экологии и наук о Земле» университета «Дубна» за ценные советы и поддержку, академику Н. С. Касимову за доброе внимание и ценные советы.

Глава 1. Обзор литературы и методические проблемы.

1.1 Физико-географическая характеристика Московского региона, включая климат, рельеф и водные ресурсы.

Объектом исследования данной работы является Московский регион, включая столичную городскую агломерацию Москву. Это самый большой по численности населения город России, а также Европы. По официальным данным Управления Федеральной службы государственной статистики по г. Москве и Московской области численность населения в городе на 1 января 2021 года составляет около 12,6 млн. человек [111]. На данный момент площадь Москвы достигла значения в 2 561 км², однако более половины территории («Новая Москва») получила статус городской агломерации в 2012 году.

Первое упоминание о Москве в летописях относится к 1147 году нашей эры. В первые столетия территория города находилась в пределах современного Бульварного кольца и делилась на 4 части (рис. 1.1А). После времен правления Юрия Долгорукого территория Москвы начала постепенно расширяться. После войны с французами и пожара в Москве в 1812 году, город был перестроен. К 1824 году его площадь была значительно увеличена. На тот момент по кругу от Садового кольца (носившего название Земляного города) к городу были присоединены ближайшие территории к северо-востоку и юго-западу от столицы (рис.1.1Б).



Рис. 1.1 Границы Москвы в прошлом: А - Гравюра Маттеуса Мериана 1638 года "Старая Москва" [84]; Б - Новый план Москвы 1824 года, составленный для путеводителя по городу [110]

В последующие годы территория города менялась очень медленно. Это происходило в большей степени потому, что Москва в 1712 году и вплоть до 1918 года перестала быть столицей Российской империи. На рис 1.2А отражен план города по состоянию на 1907 год. Отличие от плана 1824 года заключается лишь в присоединение дополнительного участка на северо-западе Москвы.

После революции 1917 года ситуация начинает быстро меняться. Москва снова становится столицей. Начинается очень быстрый приток населения и, как следствие, разрастание города вширь. Уже

в 1937 году площадь города увеличилась в размерах, приобретая границы, близкие к современным (рис. 1.2Б).

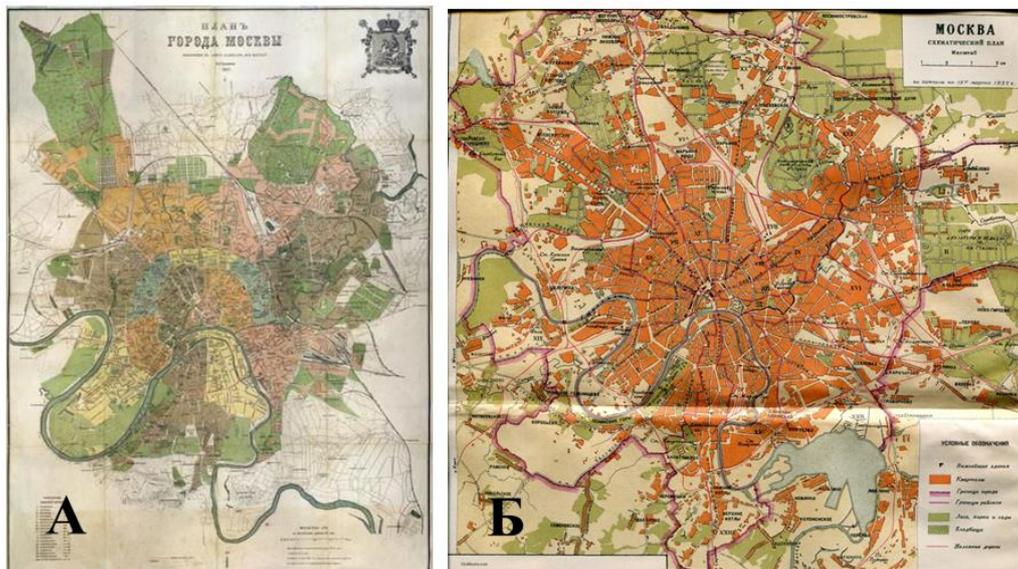


Рис. 1.2 Карты границ Москвы до и после революции: А - План Москвы 1907 год. Приложение к адрес-календарю под изданием А. С. Суворина [92]; Б – Схематический план Москвы по данным БСЭ, составленный на 15 марта 1937 года (границы города отмечены жирной розовой линией) [95]

В 1962 году вокруг города было завершено строительство Московской кольцевой автодороги. Ещё до её открытия в 1961 году было принято официальное решение расширить границы города до границы МКАД. В тот момент площадь города достигла 885 км² и приблизилась к современному значению. Вскоре, в 1963 г. было принято решение о частичном расширении Москвы и присоединении к ней города Зеленограда (рис.1.3А). В таких границах Москва просуществовала до 1983 года включительно. К 1984 году количество районов в Москве достигло 33. Однако затем произошло упрощение административного деления города и были утверждены новые границы. В 1991 году распоряжением мэра Москвы было принято деление города на 10 округов и утверждение его границ в пределах МКАД с дополнениями. На рис. 1.3Б приведено отображение изменений границ Москвы с 1742 до 2011 года (граница Москвы с 2000 по 2011 гг. отмечена на рисунке серым цветом).

В 2011 году был официально представлен проект расширения территории столицы под названием «Новая Москва». Он представлял собой увеличение территории города почти в 2,5 раза за счет присоединения обширной части Московской области к юго-западу от столицы. Территория Новой Москвы официально вошла в состав столицы 1 июля 2012 года (рис 1.4).

Но менялись не только административные границы города, но и фактическая застройка. По данным атласа Urban Expansion видно, как менялась фактическая территория города с 1893 по 2014 год (рис. 1.5). Эти данные подтверждают значительный рост городской территории в период расширения границ города с 1957 по 1991 года, а вот присоединение новой Москвы мало отразилось на фактической площади

города. Можно отметить, что рост городской территории происходил радиально от центра к периферии вдоль основных транспортных магистралей.

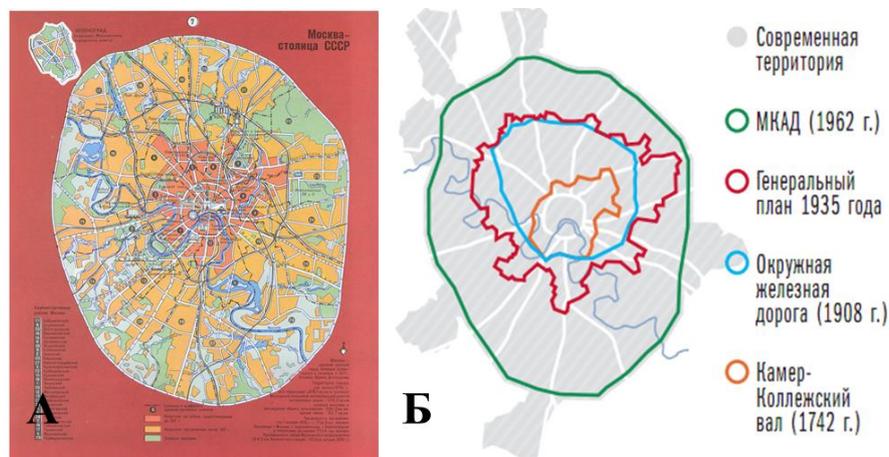


Рис. 1.3 Границы Москвы в разное время: А – карта территории Москвы на 1976 год [87]; Б – изменение площади города Москва с 1742 по 2011 год [22]

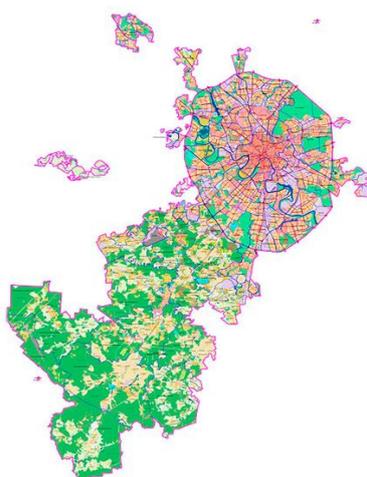


Рис. 1.4 Генеральный план развития Москвы на 2016 год [82]

В данной работе объектом изучения является город Москва в границах, действовавших до 2012 года. На это у автора есть несколько причин. Во-первых, территория Новой Москвы до сих пор слабо урбанизирована и представляет собой загородную местность с низкой плотностью населения, что подтверждается данными сервиса Land Use Land Cover (рис. 1.6) [118].

На 2020 год территория Новой Москвы примерно на 80% является природным лесом. На момент присоединения ее к городу там проживало менее 250 тысяч человек. Во-вторых, одной из задач данной работы является анализ долговременных рядов данных с 2000 по 2020 год. Учет территории Новой Москвы при анализе данных 2000-2011 годов неразумен, так как территория формально являлась Московской областью, а добавление этой территории в анализ данных 2012-2020 годов приведет к смещению оценок многолетних рядов. Из анализа также были исключены удаленные участки Москвы,

такие как Зеленоград и Внуково. Итоговая площадь города в пределах МКАД с включениями составила 991 км².

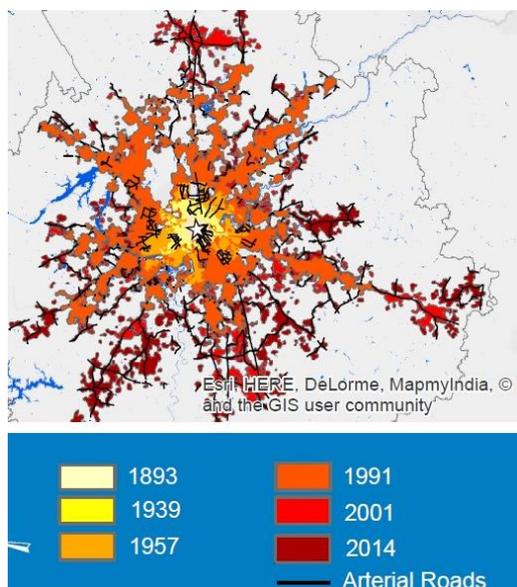


Рис. 1.5 Изменение фактической территории города с 1893 по 2014 год согласно атласу Urban expansion [118]

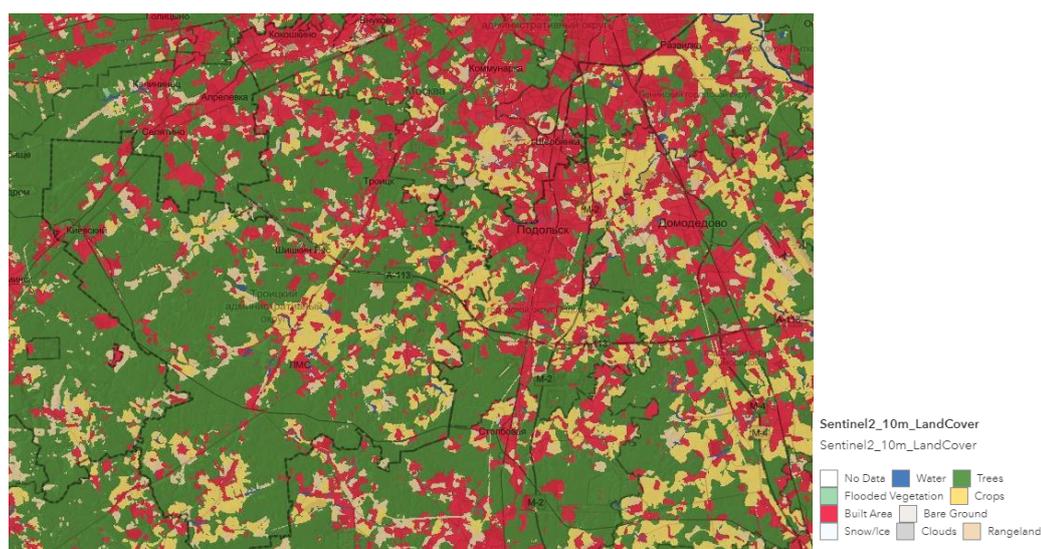


Рис. 1.6 Типы территорий по хозяйственному использованию Новой Москвы на 2020 г. [118]

1.1.1 Климат Московского региона.

При изучении микроклимата городской поверхности следует подробно рассмотреть общие климатические условия изучаемого региона. Существует множество классификаций климата, но здесь будут рассмотрены четыре основных: классификация Алисова, классификация де Мартона, классификация климатов Берга и классификация Кёппена.

В основе классификации Б. П. Алисова лежат границы климатических поясов, проведенные согласно среднеголетнему положению атмосферных фронтов между основными типами воздушных масс. По данной классификации вся территория Московского региона относится к умеренному типу климата подтип 5Б – умеренно континентальный (рис. 1.7) [12].



Рис. 1.7 Классификация климата Б.П. Алисова для Московского региона [12]

Умеренный пояс характеризуется двумя особенностями радиационного баланса. Во-первых, значение радиационного баланса в среднем за год гораздо меньше, чем в тропических широтах. Это объясняется широтой местности, а также большим значением балла облачности. Во-вторых, в умеренных широтах образуются наибольшие сезонные различия поступления солнечной радиации на поверхность. Это связано с изменением угла наклона земной оси [12].

На климат умеренных широт оказывает большое влияние циркуляция атмосферы: формирование умеренных воздушных масс (местных для этого типа климата), вхождение арктических и тропических воздушных масс, а также значительное число циклонов, формирующихся на арктическом атмосферном фронте [10].

Континентальный умеренный климат характеризуется широким спектром изменчивости условий при увеличении степени континентальности климата. Чем дальше к востоку от Атлантического океана расположена территория, тем больше становится годовая амплитуда температур, а количество осадков, наоборот, уменьшается. Это связано со спецификой формирования воздушных масс. Очень отчетливо проявляются междусуточные колебания температур.

Для территории Московского региона характерно преобладание трансформированных океанических воздушных масс, приходящих с Атлантики. Это приводит к наличию теплого влажного лета и прохладной снежной зимы. Наличие постоянного снежного покрова зимой – это характерная черта данного территории. В летнее время влияние Атлантики уменьшается, учащаются застои воздуха и меридиональный перенос прохладных арктических и теплых тропических воздушных масс.

Далее рассмотрим классификацию В. П. Кёппена, основанную на количестве приходящего тепла, агрегатном состоянии воды в атмосфере и на поверхности, а также на типах растительных сообществ как следствии из двух предыдущих факторов.

Согласно данной классификации, Московский регион относится к поясу бореальных климатов подтипу Df – климаты холодные с влажной зимой (рис. 1.8).



Рис. 1.8 Москва на карте климатов В.П. Кёппена [26]

Тип климатов D характеризуется четкими различиями между сезонами года, то есть здесь наблюдается холодная зима с устойчивым снежным покровом и теплое, но короткое лето. Годовая амплитуда температур в данном типе не менее 13°C , а северная граница характеризуется температурой самого теплого месяца $+10^{\circ}\text{C}$, что является границей для произрастания древесной растительности. Отличительная особенность данного типа климата – это большое количество дней со снежным покровом. В некоторых районах за год может быть более 55 дней (применительно к Москве – 79), в течение которых наблюдается выпадение твердых осадков. Направление среднемесячных изотерм в июле в Европейской части России в целом близко к широтному (рост – с севера на юг), однако в масштабе Московского региона температура воздуха в июле в среднем увеличивается с северо-запада на юго-восток [26]. В то же время средние январские значения температуры воздуха уменьшаются к востоку вследствие влияния Сибирского Максимума [12].

Следующая в ряду наиболее известных в бывшем СССР и России - это классификация климатов Л. С. Берга. В ее основу положено совмещение климатических характеристик, таких как температура, количество осадков и приход солнечной радиации, а также характеристики природных растительных сообществ.

В соответствие с данной классификацией территория Москвы и Московской области полностью лежит в поясе климата лесов умеренных широт или по-другому климата лиственных лесов умеренной зоны – климата дуба (рис. 1.9).

Данный тип климата получил свое название от доминантной древесной породы – дуба, но на некоторых территориях в этом поясе все же преобладают хвойные породы деревьев. Климат лиственных лесов характеризуется устойчивым снежным покровом. Средняя температура четырех теплых месяцев не менее 10°C , но не более 22°C . Основное количество осадков выпадает в теплое время года [17].



Рис. 1.9 Москва на карте климатов А.С. Берга [17]

Последней мы рассмотрим классификацию климата Э. де Мартона. В ее основе лежат различия в двух показателях – среднегодовой амплитуде температуры воздуха и среднегодовой амплитуде количества осадков. Но также добавляется и фактор циркуляции атмосферы. По данной классификации территория Московского региона относится к типу – холодные климаты подтип Сибирский климат (рис. 1.10).

Сибирский тип климата объединяет территории от Балтийского моря до Тихого океана в пределах от 40° северной широты в Японии и на Дальнем Востоке России до полярного круга. Такое объединение не может отражать всего разнообразия климатических условий столь обширной территории. В своей работе [33] ученый характеризует данный тип климата наличием ярко выраженного короткого лета. Первым месяцем с положительными температурами считается апрель, в то время как в конце сентября уже начинаются первые заморозки. Наибольшее количество осадков выпадает в теплое время года.

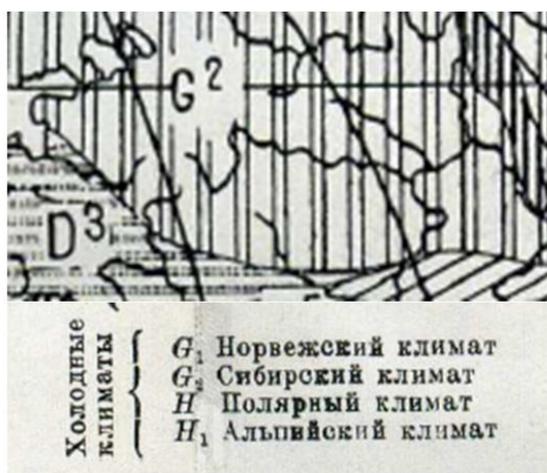


Рис. 1.10 Москва на карте климатов Э. де Мартона [33]

Таким образом, во всех наиболее известных классификациях климатов Московский регион находится в пределах обширных поясов, протяженных к востоку и охватывающих значительную часть северной Евразии. Следовательно, в основных своих чертах климатические условия региона сходны с соседними территориями.

Как показывают наблюдения, самый холодный месяц в году на территории города является февраль, в то время как самым теплым июль. Среднегодовая температура воздуха составляет 5,8 °С. На территории Московского региона количество атмосферных осадков изменяется от 600 до 800 мм в год.

1.1.2 Рельеф территории Московского региона.

Рельеф – один из климатообразующих факторов. На территории Московского региона находятся разнообразные формы рельефа, сформированные ледниковыми отложениями. Территория исследования подвергалась процессам оледенения три раза в течение четвертичного периода. Однако в орографической картине Подмосковья можно увидеть остатки более древних и, наоборот, более молодых форм рельефа. На рис. 1.11А отображена орографическая карта Московской области. Исходя из данной карты, можно сделать вывод о рельефе Московской области – западная часть региона более возвышенная, в то время как восточная несколько ниже. Как видно на рис. 1.11Б., на рельеф города Москвы оказывает влияние пойма реки Москвы – это участки с наименьшими высотами, в то время как юго-западная часть города (Теплостанская возвышенность) несколько приподнята (перепад высот составляет около 120 метров).

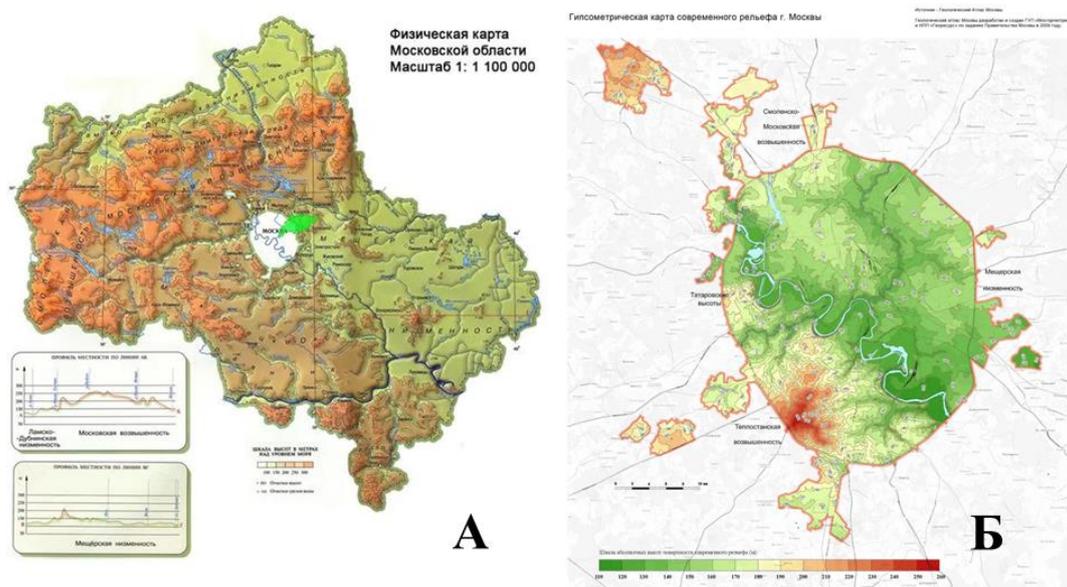


Рис. 1.11 Карты рельефа: А – Физическая карта Московской области [93]; Б – Физическая карта города Москва [116]

Главными элементами рельефа Московского региона являются (рис. 1.12):

- Верхневолжская зандрово-аллювиальная низменность;
- Смоленско-Московская моренная возвышенность (включая Клинско-Дмитровскую моренно-эрозионную гряду);
- Москворецко-Окская моренно-эрозионная равнина;
- Мещерская зандровая низменность;
- Заокское эрозионное плато;

- Заосетринская эрозионная равнина.

Каждая из этих частей характеризуется своим уникальным рельефом. Наиболее возвышенной частью Московского региона является Смоленско-Московская возвышенность. На ней преобладает холмистый рельеф с большими перепадами высот. Именно здесь находится самая высокая точка Московской области 310 метров над уровнем моря. Северная граница данной возвышенности имеет очень крутой склон, сформированный ледниковыми отложениями, и носит название Клинско-Дмитровской гряды.

Низменные участки находятся на юго-востоке региона на территории Мещерской низменности. Высота местности здесь меняется от 100 до 150 метров; самая низкая точка области – 97 метров над уровнем моря. Восточная часть столицы с такими парками как Лосиный остров, Сокольники и Измайлово находится в пределах этой низменности [20].



Рис. 1.12 Схема расположения основных форм рельефа Московского региона [20]

Изменение высоты в целом происходит с северо-запада на юго-восток. Такие изменения хорошо различимы на орографическом разрезе через центральную часть Московской области с севера на юг и с запада на восток (рис. 1.13). Данные разрезы были построены с помощью сервиса Google Earth. Оба профиля проведены через Московскую область и центр города Москва.

На рис. 1.13 видно, что граница между Верхневолжской низменностью и Смоленско-Московской возвышенностью проявляется в резком перепаде высот от 130 до 200 м. Этот результат проявления в рельефе Клинско-Дмитровской моренной гряды, оставшейся от последнего четвертичного оледенения. При дальнейшем продвижении на юг она плавно сменяется Москворецко-Окской равниной с относительными высотами около 200 метров. С запада на восток Смоленско-Московская возвышенность плавно переходит в Мещёрскую низменность. Исходя из этого можно сделать вывод, что северо-восточная часть области имеет возвышенный характер, в то время как юго-восточная, наоборот, низменная с перепадом высот около 200 метров.

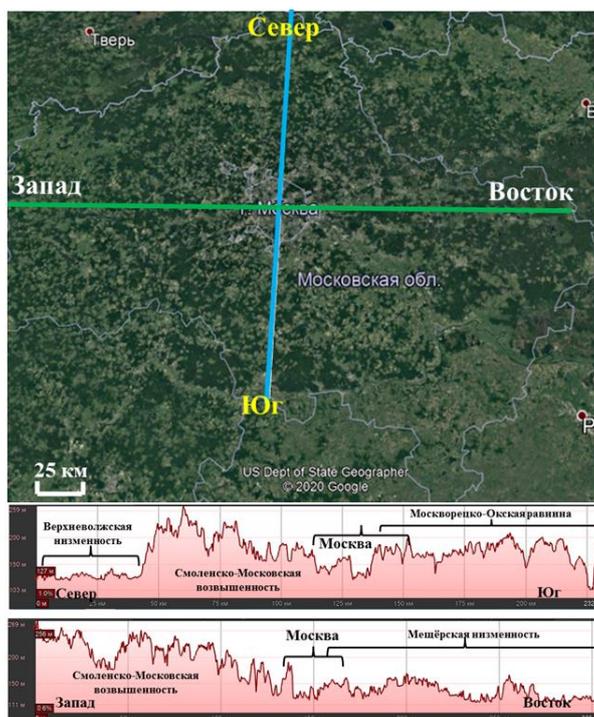


Рис. 1.13 Разрез рельефа Московской области, проведенный через центральную часть Московского региона с севера на юг и с запада на восток

1.2 Городские «острова тепла»: причины их образования, методы изучения, общие географические закономерности.

В природе все климатические закономерности определяются природными факторами, такими как количество приходящей солнечной радиации, тип подстилающей поверхности и рельеф. Если же говорить о городской среде, то каждый из этих основных климатообразующих факторов подвергается трансформации, в той или иной степени. Естественно, такие изменения не могут пройти бесследно. Климат городов, особенно крупных - это уникальные условия, отличающиеся от условий загородной местности по всем метеорологическим величинам (влажность, радиационный баланс, скорость и направление ветра и др.). Особое внимание уделяется изменению температурных показателей городов.

Любой город в умеренных широтах создает внутри себя температурную аномалию, получившую название городской «остров тепла». В литературе это явление описывается как явление повышения температуры воздуха во внутренней части любого города по сравнению с окружающей сельской местностью [15].

Впервые данное явление было обнаружено метеорологом-любителем Люком Говардом лишь в 1818 году. Он сравнил данные двух метеорологических станций, ведущих одновременные наблюдения, одна из которых находилась в черте города Лондон, а другая за его пределами в ближайшей сельской местности. Итогом его работы стала таблица, в которой приводились среднемесячные значения температуры воздуха в городе и за его пределами в среднем за 10 лет (1807 – 1816 гг.). Анализируя получившуюся таблицу, он сделал вывод, что среднемесячная температура на городской станции в течение всего года выше, нежели на сельской [67]. После выхода в свет его работы феномен городского

«острова тепла» завоевал интерес многих ученых по всему миру. В настоящий момент найдены доказательства существования этого явления во многих больших и малых городах в различных климатических зонах, пожалуй, кроме населенных пунктов в сухих тропиках.

Рассмотрим особенности городского «острова тепла» и условия его формирования.

1.2.1 Причины образования городских «островов тепла».

Явление городского «острова тепла» проявляется в поле температуры воздуха и поверхности, и является следствием микро- и мезо-климатических изменений, которым подвергается городская среда. Из-за преобразования поверхности с естественного почвенного покрова на искусственное покрытие, запыленности атмосферы, дополнительных выбросов тепла и усложнение рельефа (так называемые городские каньоны) в городах создается отличный от окружения микроклимат. Это подтверждается изменениями в энергетическом балансе городской среды.

Расчет этого показателя остается очень сложной задачей, так как нужно учитывать множество факторов: геометрию городского каньона, используемые материалы и их разнообразие, поток коротковолновой радиации, погодные условия, турбулентный обмен с вышележащими слоями атмосферы, а также теплоотдача от поверхности зданий. В настоящий момент разработкой и модернизацией модели энергетического баланса городской среды занимаются такие городские климатологи как Т. Оке, G. M. Mills, H. Kusaka и др [82,71,79].

В общем виде энергетический баланс поверхности можно представить так:

$$(1 - a)(K_{sf} + K_{df}) + \varepsilon L_{\downarrow} - L_{\uparrow} - G - H - LE = 0, \quad (1)$$

где K_{sf} и K_{df} - плотность потоков прямого и рассеянного коротковолнового солнечного излучения; $\varepsilon L_{\downarrow}$ и L_{\uparrow} - плотность нисходящих и восходящих потоков длинноволнового излучения соответственно (усредненные по длине волны); a и ε - альbedo и излучательная способность поверхности соответственно; G - плотность тепла, уходящего в подложку; H и LE - плотности турбулентного потока ощутимого тепла и энергии, обусловленные испарением воды, соответственно, с поверхности пограничного слоя [66].

Каждый из этих показателей в условиях городской среды подвергается изменениям.

Во-первых, в городской среде естественное покрытие (растительность и почва) заменяются на искусственные, из которых преобладающими являются бетон (стены зданий, тротуарное покрытие), железо (крыши, железнодорожные развязки и промышленные блоки), а также асфальт. Все эти материалы обладают отличительным набором теплофизических свойств. Так, основное различие в естественных и искусственных покрытиях заключается в их удельной теплоемкости (количестве энергии, необходимой для разогрева одной единицы массы вещества на один °C). Асфальтобетон – основа любого дорожного покрытия в городе – является лидером по этому показателю (975-1578 Дж/кг°C) [24]. Другие искусственные материалы и покрытия несколько отстают от него по этому показателю, но все же значение их удельной теплоемкости значительно выше, чем у открытой почвы (~8 Дж/кг°C) [16].

Большая теплоемкость городских покрытий приводит к усилению явления городского острова тепла в ночные часы. В то время как поверхность в сельской местности к полуночи уже успевает высвободить накопленное за день скрытое тепло, в городе этот процесс длится еще несколько часов, так как объем накопленного за день тепла гораздо больше, чем у естественных покрытий.

Различия проявляются и в альбедо поверхности. Природная растительность обладает бóльшим альбедо, нежели некоторые искусственные покрытия. Отражательная способность луговой растительности меняется в пределах 20-30%, лиственного леса 15-20%, хвойного леса – 15-20%. Открытая почва, а это редкость в природе, обладает альбедо от 5% у влажного чернозёма до 25-30% у подзолистых почв умеренной полосы. В то же время отражательная способность многих искусственных поверхностей, за исключением асфальта и рубероида (10-15%), намного ниже [16]. Это приводит к большому поглощению солнечной радиации и изменениям в радиационном балансе.

Во-вторых, уменьшается количество прямой и увеличивается количество рассеянной солнечной радиации. Города в настоящее время являются местом концентрации источников загрязнения атмосферы, таких как котельные, промышленные предприятия, тепловые электростанции, а также территорией с интенсивным движением автотранспорта. Мелкие частички пыли, пепла и сажи, попадая в атмосферу, становятся дополнительным источником ядер конденсации. Все это приводит к усилению процессов облакообразования. Влияние облачности на изменения в радиационном балансе – это давно известный факт. Верхняя граница облаков обладает высоким альбедо и приводит к рассеянию солнечных лучей. В дополнение, наличие самих твердых частиц приводит к дополнительному поглощению и рассеянию солнечных лучей.

Известно, что на городскую территорию попадает меньше прямой солнечной радиации, чем на окружающую ее местность. Продолжительность солнечного сияния определяется облачностью. В промышленных городах потери в продолжительности солнечного сияния могут достигать 10 и даже 20%. Если говорить не о продолжительности солнечного сияния, а о количестве солнечной энергии, достигающей земной поверхности, то при прохождении через запыленный городской воздух ее потери достигают примерно такого же порядка. В работе Nuffi показано, что в Льеже (Бельгия) в дни с сильным загрязнением воздуха продолжительность солнечного сияния в среднем на 55 мин меньше, чем в предместьях. Такое же сравнение было проведено в Лондоне, где продолжительность солнечного сияния в центре города на 16 %, а в предместьях на 5 % меньше, чем в близлежащей сельской местности [31].

Но у данного явления есть обратная сторона, приводящая к усилению эффекта городского «острова тепла» в ночные часы. Индустриальная дымка, состоящая в большей степени из аэрозольных частиц, усиливает противоизлучение, то есть препятствует быстрому охлаждению поверхности и удерживает тепло, не давая ему уйти в вышележащие слои атмосферы. Благодаря этому явлению значение радиационного баланса в городе, несмотря на уменьшение в приходящей части солнечной радиации, несколько выше, чем в близлежащей сельской местности.

В-третьих, уменьшается количество тепла, затрачиваемое на испарение. В природных ландшафтах умеренного пояса порядка 80% от общего радиационного баланса затрачивается на испарение влаги с поверхности почвы и транспирацию растениями. В городах большая часть выпадающих жидких осадков отводится в специальную ливневую систему канализации, при этом в разы уменьшая количество влаги на поверхности. То же самое происходит в весеннее время при таянии снега. Следовательно, то тепло, которое должно быть затрачено на испарение излишков влаги, в городской среде уходит на дополнительный нагрев поверхности.

В дополнение к уменьшению общего испарения происходит и значительное уменьшение количества тепла, затрачиваемого растениями на процессы транспирации излишков воды. Для поддержания процессов метаболизма большинство растений расходуют лишь 0,1 % жидкости, получаемой через корневую систему. Избытки влаги, проходящие по проводящим капиллярам к листьям и побегам, выходят в виде водяного пара через устьяца листьев. Именно этот процесс был назван транспирацией. Транспирируемая растениями влага может составлять существенную долю в суммарном испарении. В городах естественный покров заменяется на искусственные покрытия, а площадь, занимаемая зелеными насаждениями, во многих крупных городах составляет всего несколько процентов от общей, в то время как сельская местность практически полностью занята растительными сообществами. Из этого можно сделать вывод, что город прогревается сильнее, так как тепло, которое должно затрачиваться на транспирацию, идет на прогрев атмосферы и поверхности.

Еще один фактор, влияющий на изменения энергетического баланса городской среды - это увеличение площади нагреваемой поверхности в городских каньонах. Теплоотдача в пограничный слой атмосферы идет не только от горизонтальной поверхности, но и от стен зданий и сооружений. Это усложняет общий вид энергетического баланса. Существует три основных различия между балансом городского каньона и горизонтальной поверхности. Для условий горизонтальной поверхности G - поток тепла в подложку приравнивается к 0, так как не учитывается толщина слоя. При расчете энергетического баланса городского каньона мы говорим об объемном пространстве, где учитывается поток тепла на каждом отдельном уровне. Во-вторых, скорость переноса теплового потока от каждой грани каньона различно и изменяется в зависимости от его геометрии. Наконец, внутри каньона радиационный баланс отличается от условий открытой сельской местности за счет затенения части территории. Этот фактор зависит от геометрии каньона и высоты зданий. Помимо прочего усложняется турбулентная составляющая энергетического баланса [66].

Наконец, в городах, особенно с холодным климатом, плотность восходящего потока длинноволновой радиации дополняется антропогенными источниками тепла, которые включают системы городского отопления, выделение тепла автомобильными двигателями, а также, в меньшей степени, - процессы метаболизма людей и животных. К числу антропогенных источников относятся также выбросы

нагретых газо-воздушных смесей от некоторых предприятий. Температура таких выбросов может достигать 200°C, что не может не отразиться на состоянии атмосферы.

В результате многих исследований были сделаны выводы, что человеческая деятельность служит основной причиной усиления явления «острова тепла» и приводит к его большей глубинной и высотной протяженности. Особенно это проявляется в городах с холодным типом климата, где, действительно, в зимнее время при работе системы отопления интенсивность городского «острова тепла» гораздо выше, чем в летний период [98].

1.2.2 Пространственная структура «острова тепла».

Городской «остров тепла» представляет собой неоднородную по своему строению положительную температурную аномалию внутри города. Естественно, это не плоское двумерное явление, а трехмерное объемное, проявляющееся во всех направлениях: на высотах, на поверхности и на глубинах. С момента начала изучения данного феномена представления о строении городского «острова тепла» сильно изменились, а его структура представляется все более сложной.

Первое представление о пространственном распространении городского «острова тепла» в атмосфере было основано на исследовании шлейфов от загрязнения воздуха. Считалось, что тепловой след города распространяется в виде факела в направлении, совпадающем с направлением ветра. Такое описание представлено в одной из первых работ Тима Ока [36]. Он предполагал, что городская атмосфера вытягивается под действием устойчивого ветра, образуя два пограничных слоя между сельской и городской атмосферой (рис. 1.14). Один из них образовывался над городом, а другой над ближайшей по направлению ветра сельской местностью. При удалении от населенного пункта городской пограничный слой, по его мнению, сменялся так называемым городским факелом.

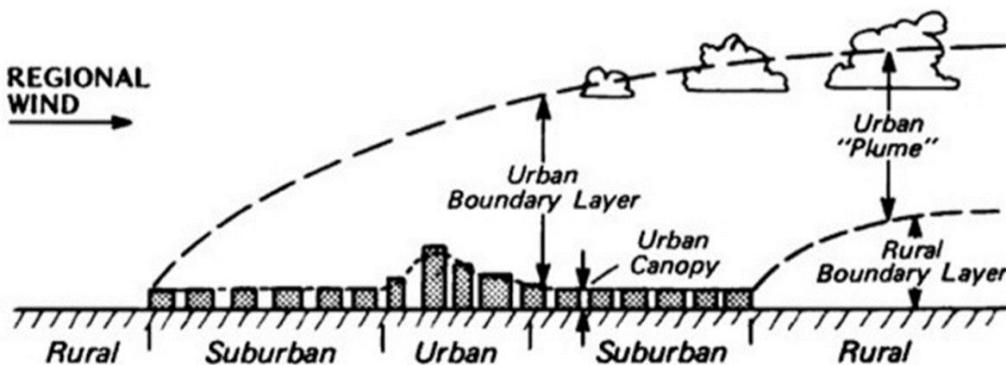


Рис. 1.14 Вертикальная структура «острова тепла» по представлению Т. Ока [36]

В настоящее время, благодаря большому количеству маршрутных и космических исследований, стало известно, что «остров тепла» обладает достаточно сложной пространственной структурой. Если провести поперечный температурный разрез через городскую территорию, можно обнаружить несколько

четко выраженных участков (рис. 1.15). При прохождении границы сельская местность – город возникает, так называемый, утёс «острова тепла». В этом месте образуется резкий градиент температур, связанный со столь же резким изменением типа поверхности. Этот градиент иногда может достигать $4^{\circ}\text{C}/\text{км}$. При движении в глубь города, в условиях однородной застройки, возникает однородное поле повышенной температуры под названием «плато острова тепла». Внутри этого участка могут возникать локальные минимумы и максимумы, связанные с локальными изменениями в поверхности (например, минимум может быть связан с проявлением охлаждающего эффекта парковой территории, а максимум с повышением плотности и этажности застройки).

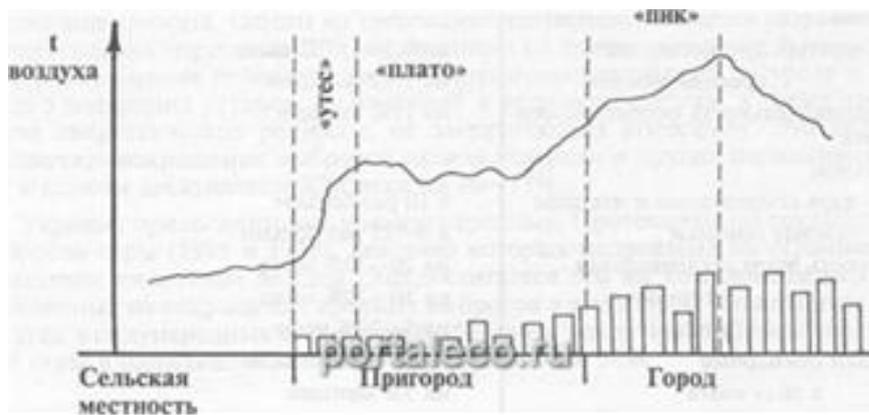


Рис. 1.15 Поперечное сечение острова тепла над городом, современное представление [38]

Как правило, в центре города возникает пик «острова тепла», где температура достигает максимального значения. Это связывают с различными факторами: увеличением плотности застройки, уменьшением площади зеленых насаждений, накопительным эффектом от застоя воздуха под влиянием застройки, наличием промышленных территорий.

Для сравнения с общими представлениями о строении городского «острова тепла» по данным о температуре поверхности 31.11.2016, полученным радиометром MODIS, установленным на космическом спутнике Terra, автором был построен температурный профиль с шагом в 1 км, проложенный через центр исследуемого в данной работе города Москва. На рис. 1.16 можно увидеть, что профиль сходен с общими представлениями, отраженными на рис. 1.13. На границе «город-пригород» наблюдается утёс «острова тепла» с градиентом температур $0,4^{\circ}\text{C}/\text{км}$. К центру города температура постепенно повышается и достигает своего максимума $-9,8^{\circ}\text{C}$, в то время как средняя температура в пригородной зоне составляет $-13 \div -14^{\circ}\text{C}$. Плавное изменение температуры на восточной границе можно объяснить тем, что именно здесь профиль проходит через парковую зону Измайлово и, как следствие, явление «утёса» мы наблюдаем еще до прохождения границы города.

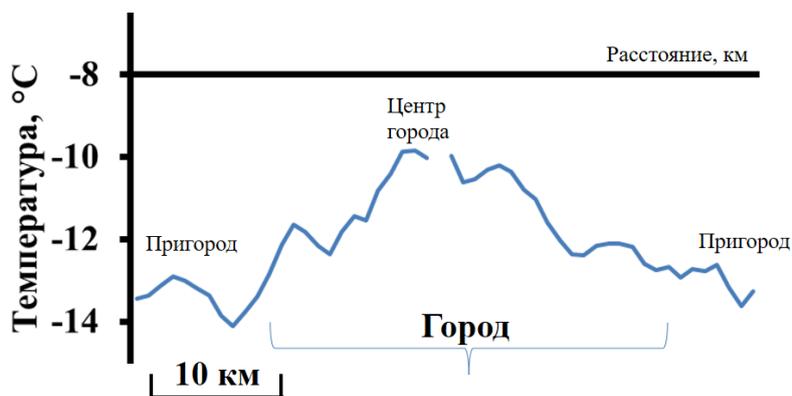


Рис. 1.16 Температурный разрез через центр города Москва по данным радиометра MODIS 31.11.2016

На термических картах неоднородность температурного поля внутри города наиболее заметна. На рис. 1.17 представлена карта средней интенсивности “острова тепла” в городе Бангкок по данным спутника Landsat 8 за 2014-2016 года [69]. Мы можем увидеть сильную неоднородность температурного воздействия различных частей города. Это объясняется наличием нескольких отличных друг от друга типов поверхности внутри города.

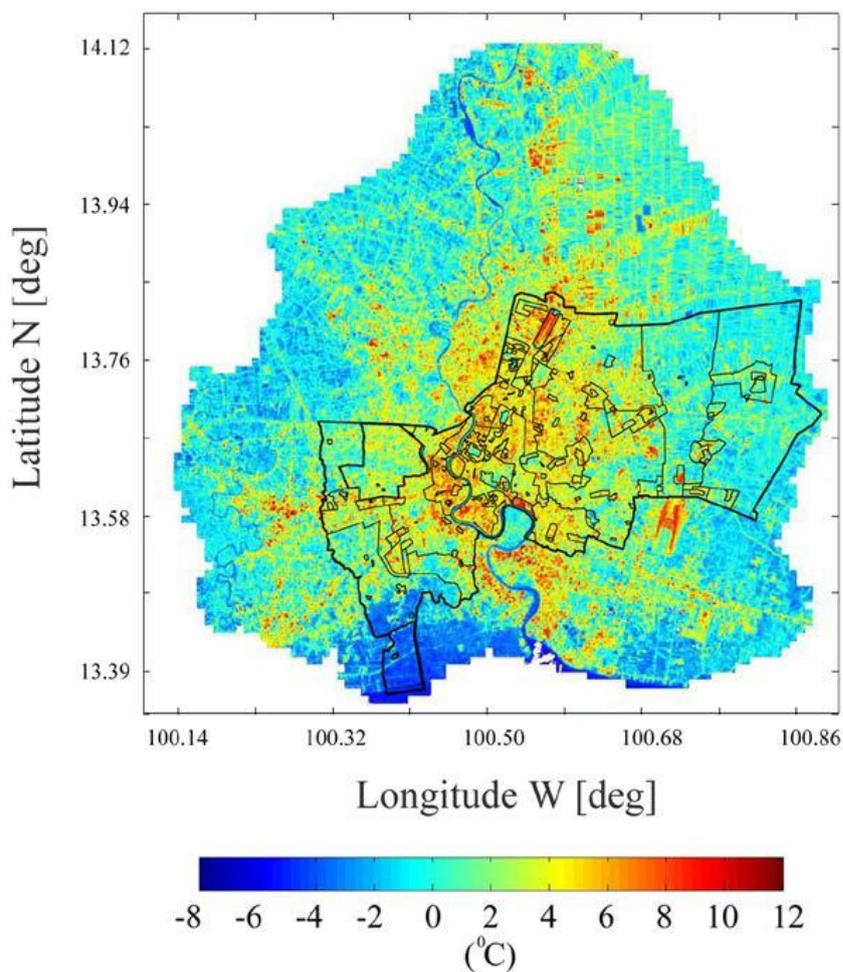


Рис. 1.17 Карта среднего значения “острова тепла” в Бангкоке за период 2014-2016 гг. [69]

В своих последних работах Тим Оке выделил 10 основных типов поверхности и 7 типов покрытия внутри города, которые по-разному влияют на температурный режим. Среди них можно выделить следующие группы: плотная застройка (высотная, средняя, малоэтажная); открытая застройка, то есть строения с растительностью между ними (высотная, средняя, малоэтажная); крупная малоэтажная застройка (например, промышленные зоны), одиночные здания; тяжелая промышленность. В каждом из этих типов может быть свой тип покрытия: плотная древесная растительность, кустарники, разреженная растительность с просветами оголенной почвы, травяная растительность, асфальтовые и бетонные покрытия, оголенный песок или почва и водная поверхность [82]. Максимальное влияние на повышение температуры оказывают высотные и средние здания в плотной застройке, а также промышленные площадки и предприятия тяжелой промышленности. Как известно, большинство городов имеют в центре наиболее плотную застройку, а города промышленного назначения образовались вокруг крупных градообразующих предприятий, где в центре города располагается промышленная зона. Именно благодаря этому в центре города и возникает пик «острова тепла» с максимальными температурами.

Что касается высотного распространения городского «острова тепла», то, по данным высотных метеорологических наблюдений, в среднем высота его распространения составляет 100-500 метров, но могут быть случаи распространения теплового влияния города и до высот в 1 километр [38].

С другой стороны, городской «остров тепла» имеет и глубинное распространение. Оно проявляется в увеличении температуры грунта в городе по сравнению с сельской местностью. Тепломагистрали, линии метро и другие подземные коммуникации обеспечивают прогревание грунта на различных глубинах. Способствуют прогреву также сравнительная сухость городской почвы вследствие частого образования в ней депрессионных воронок и искусственного стока осадков, промышленные и бытовые теплые стоки, приток тепла из более теплого городского воздуха и ряд других причин. Например, по данным температуры грунтовых вод для Москвы, эти различия наблюдаются до глубин 30 метров. По данным стационарных метеорологических измерений температуры грунта городской «остров тепла» в Москве распространяется на глубину значительно более 3 метров [28].

1.2.3 Методы изучения городских «островов тепла».

В литературе существует три основных источника данных для оценки влияния городского «острова тепла». Это данные метеорологической сети, результаты маршрутных съемок температуры и космические снимки. Для начала рассмотрим достоинства и недостатки каждого из них, а также методологию определения интенсивности.

Классическим является метод определения интенсивности «острова тепла» (I) по данным стационарной метеорологической сети. Этот вид данных имеет безусловное преимущество: ведутся регулярные, производимые 8 раз в сутки измерения температуры воздуха и других метеорологических показателей. Благодаря этому существует возможность наиболее подробно изучить периодичность

изменений, происходящих в городской среде, таких как суточные, сезонные, годовые и даже недельные вариации интенсивности «острова тепла». Также существует возможность оценить влияние городской среды и на другие метеорологические показатели, такие как влажность, количество осадков, скорость ветра и др. [75;76].

Так же, помимо уже организованной сети наблюдений на метеорологических станциях, возможна организация временных сетей наблюдений по всему городу, для наиболее точного определения состояния «острова тепла». Но такой способ наблюдений дорогостоящий, поэтому существует небольшое число наблюдений, сделанных таким образом.

Классически интенсивность «острова тепла» при использовании данного метода определяется как:

$$I = T_1 - T_2, \text{ где } (2),$$

где T_1 – это значение температуры воздуха на высоте 2 метров в метеорологической будке на метеорологической станции, расположенной в идеале в центре города или в пределах городской застройки; T_2 – это температура воздуха, полученная на сельской или пригородной станции.

Однако у этого метода есть существенные недостатки. Во-первых, значения, полученные на станции, не всегда характеризуют именно городскую среду или сельскую местность. Иначе говоря, в городе метеостанция может находиться, например, в пределах парка, а вот станция в сельской местности – в населенном пункте, а не на фоновой местности. В результате в оценках могут появиться ошибки. Они также могут появляться из-за влияния каких-либо посторонних неучтенных факторов, например, положения точки измерений на склоне возвышенности или, наоборот, в долине. Зачастую в литературе используются две станции, одна из которых находится в центре города, другая в ближайшем пригороде на территории аэропорта [50].

Во-вторых, при сравнении двух удаленных друг от друга точек может проявиться эффект географической зональности. При существующей плотности метеорологической сети в России может сложиться такая ситуация, что фоновая станция будет расположена в нескольких десятках, а иногда даже и в сотнях километров от города. Если сельская станция находится, например, на севере от города, мы можем получить завышенные значения интенсивности, и, наоборот, при положении фоновой станции на юге, значения параметра I могут быть занижены.

Существует несколько более географический подход, представленный в работе [75]. В данном случае за параметр I принимается разность средних значений температуры воздуха на высоте 2 метров на всех городских станциях и всех окружающих условно сельских станциях. Однако даже при таком подходе невозможно оценить пространственные закономерности изменения температуры, связанные, например, с влиянием растительного покрова или плотной городской застройки. В настоящее время в городах находится обычно от одной до нескольких метеорологических постов и станций. Если говорить в целом про нашу страну, то в России одна метеорологическая станция со штатом наблюдателей приходится в среднем лишь на 10,5 тыс. км².

Следующий тип данных – это данные маршрутных исследований. При таких исследованиях производятся измерения температуры воздуха посредством передвижных установок по заранее заданным линейным маршрутам. Такие измерения позволяют получить данные о пространственной структуре тепловой аномалии города вдоль линии маршрута. В результате получается что-то вроде температурного разреза. Такие исследования очень часто проводят для изучения влияния зеленых территорий на температурный режим города [81,87], а также использовались на начальных этапах изучения «островов тепла» в работах Лансберга и Бёера [15,31].

Однако, этот метод, как и другие, имеет существенное ограничение. Из-за недостатка средств и сотрудников такие исследования проводятся крайне редко, а, значит, отображают структуру городского «острова тепла» в конкретный момент времени и при определенных погодных условиях. Это приводит к тому, что анализ средних значений за продолжительный период времени становится невозможным. Также затруднительно численно оценить значение параметра I . Применяется подход разницы максимального и минимального значения температуры вдоль маршрута исследования.

В некоторых случаях существует возможность увеличения размера выборки за счет увеличения количества повторных наблюдений (многократных проездов вдоль трассы из одного конца в другой и обратно). При этом случайные ошибки с разным знаком стремятся к взаимному погашению, но получить точное значение так и не удастся из-за проведения маршрутных съемок только при определенной благоприятной погоде, то есть в антициклональных условиях, когда «остров тепла» имеет свое максимальное значение.

Еще одним ограничением маршрутных исследований является то, что в крупных городах очень сложно провести полный пространственный анализ структуры «острова тепла». Такие исследования требуют больших затрат времени и средств, а для одновременных измерений должна быть привлечена большая группа людей.

Одна из главных задач, поставленных перед исследователем в данной ситуации, – это правильная организация маршрута. При отображении в маршруте только одного типа поверхности (например, парк или плотная застройка) ошибки в вычислении влияния города будут неизбежны.

В последние два десятилетия широкое распространение получило использование данных, приходящих с различных космических аппаратов. Космические снимки используются в настоящее время в таких сферах деятельности человека как охрана природы и планирование городских территорий. Съемка ведется в широком диапазоне длин волн, включая инфракрасный тепловой диапазон от 1,3 до 1000 мкм.

Городские «острова тепла» не стали исключением. Они проявляются на тепловых снимках как зоны повышенной яркости, которые сильно выделяются на фоне окружающей сельской местности. Разница в яркостных характеристиках между городом и сельской местностью тесно связана со степенью застроенности территории: чем плотнее зона городской застройки, тем сильнее будет интенсивность

теплового излучения в ее пределах. Яркость внутри города бывает также неоднородна. Основными тепловыми аномалиями в границах города могут быть промышленные предприятия и плотно застроенная центральная часть.

Изучение этого явления в поле температуры поверхности ТС на примерах отдельных космических снимков было начато ещё в 1970-х гг. применительно к Вашингтону и Балтимору (США) [9]. Высокое пространственное разрешение от 2 км (NOAA) и выше, например, MODIS (1 км), Landsat (до 60 м), позволяет произвести подробный анализ пространственной структуры «острова тепла» с выделением всех компонентов: утёс, плато, пик и локальные минимумы, представленные парками или водными поверхностями.

В настоящее время многолетние радиометрические данные, полученные с различных систем ДЗЗ, были применены для расчета и анализа поверхностных температурных аномалий в таких городах как Рим (Италия) [64], Бангкок (Таиланд) [69], Будапешт (Венгрия) [86], Эрбил (Ирак) [15], Афин (Греция) [16], 28 городов севера Западной Сибири (Россия) [78] и многих других мест. Существуют работы, в которых обнаружение и разбор городского «острова тепла» производится по данным лишь одного или нескольких снимков, например, для условий Скопье (Македония) [68], Калькутты (Индия) [84] и Москвы [14].

Как правило, для этих целей используются данные вышеупомянутых спутников Landsat [14,68,69,84,94], Terra и Aqua [86,94], так как они находятся в открытом доступе и просты в обработке. Однако существуют работы, в которых применяются и другие спутники, например, ENVI-SAT [64].

Достоинством спутников серии Landsat служит высокое разрешение их радиометрических данных, а спутников Terra и Aqua – большая выборка снимков, поскольку зондирование Московского региона производится каждым из них дважды в сутки (мы здесь исследуем только дневные снимки обоих этих спутников, поскольку их качество гораздо выше ночных). Применительно к Москве в литературе до сих пор приводились лишь отдельные примеры спутниковых снимков [64,14].

У данного метода изучения «островов тепла» также существуют свои достоинства и недостатки.

К достоинствам можно отнести высокое пространственное разрешение космических снимков, а, следовательно, возможность подробно изучить внутреннюю структуру «острова тепла». Некоторые спутники предоставляют космические снимки в тепловом диапазоне с пространственным разрешением до 60 метров, что позволяет оценить внутреннее строение «острова тепла» вплоть до отдельных зданий. При всем при этом космические снимки некоторых спутников с хорошими пространственными и временными характеристиками находятся в свободном доступе в сети Интернет. Но данные с более высоким пространственным разрешением необходимо заказывать по высокой цене.

Еще одним достоинством метода ДЗЗ можно считать возможность изучения не только пространственных, но и временных характеристик теплового острова. В настоящее время существуют метеорологические спутники, которые пролетают над одной и той же территорией ежедневно несколько раз, другие раз в неделю, а третьи – приблизительно раз в месяц. В итоге, при благоприятных условиях,

исследователь может получить годовой, месячный и, в некоторых случаях, даже суточный ход изменений в тепловом поле территории. Также большой информативностью обладает наложение разновременных космических снимков друг на друга. При этом появляется возможность достаточно точного деления территории на различные типы объектов [14]. Кроме того, появляется возможность картографирования теплового поля территории, то есть визуальное представление «острова тепла».

С другой стороны, данный метод имеет и свои недостатки. Даже при хорошем временном разрешении выборка пригодных для анализа космических снимков территории умеренных и экваториальных широт достаточно невелика. Это связано с тем, что невозможно получить достоверную информацию о температуре поверхности, когда территория изучения покрыта облаками. Так, например, по данным Гидрометцентра России, территория Москвы и Московской области находится в безоблачных условиях в среднем всего 86 дней в году. По данным Метеорологической обсерватории МГУ были выявлены месяцы с самым высоким и самым низким баллом облачности. Применительно к нижней облачности по данным за период традиционной климатической нормы 1961-1990 гг. таковыми являются декабрь и май соответственно [35]. В результате такого неравномерного распределения солнечных дней в году, при анализе годового хода изменений интенсивности «острова тепла» могут возникнуть ошибки.

Еще одним минусом изучения интенсивности «острова тепла» методом обработки космических снимков является смещение средних оценок. Это происходит по двум причинам.

Первой причиной является, как говорилось ранее, возможность применения космических снимков только в безоблачных антициклональных условиях, а как известно именно они являются благоприятными для развития и усиления явления городского «острова тепла». Такая выборка случаев непременно приведет к завышению среднемесячных и среднегодовых оценок. Вторая проблема – это время пролета спутника, о чем также говорилось выше. Известно, что максимальные значения «острова тепла» достигаются ночью и ранним утром, когда менее теплоемкая почва в сельской местности уже остыла и отдала накопленное за день тепло, а бетонное покрытие в городе остается гораздо теплее естественного покрытия. С другой стороны, при определенных условиях днем город может быть даже несколько холоднее окрестностей. В итоге, от времени, когда спутник пролетает над изучаемой территорией, зависит, насколько и в какую сторону будут смещены средние оценки. Далее в работе будет приведен анализ таких смещений в сравнении с данными метеорологической сети Московского региона.

Что касается методологии определения интенсивности «острова тепла» I , то при работе с космическими снимками чаще всего встречается метод разности средних значений температуры поверхности внутри города и за его пределами в так называемой области сравнения. Подобный подход сравнения с сельской местностью не городского центра, а всей площади города в целом использован также в [3,4]

В таком случае параметр I будет рассчитываться как:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n T_{Гi}}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{Зj}}{m}, \text{ где } (3)$$

$T_{Гi}$ и $T_{Зj}$ – температура поверхности, измеренная внутри единичного пикселя городской и загородной территории соответственно; n – количество единичных пикселей внутри городской территории; m – количество единичных пикселей внутри загородной области сравнения. В нашем конкретном случае единичный пиксель имеет площадь 1 км².

Данный метод расчета интенсивности «острова тепла» более надежный, чем прочие. Однако и здесь есть свои нюансы. Территория самого города и загородная местность неоднородны и включают различные типы поверхности. В пределах города, как правило, имеются парковые зоны и водные объекты, понижающие среднюю температуру внутри города, в то время как сельская местность, окружающая город, содержит в себе небольшие города, сельскохозяйственные поля с открытой почвой и промышленные зоны. Отвержение того и другого приводит к занижению реальной интенсивности поверхностного острова тепла. Однако в данной работе при первом приближении мы будем считать, что это занижение невелико.

1.3 Использование спутниковых данных в городской климатологии. Свойства космических снимков, особенности измерений в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн, спутники Terra и Aqua, радиометр MODIS. Методические основы использования радиометрических данных о температуре поверхности.

Освоение космоса и использование космических аппаратов для изучения космического пространства в настоящее время является приоритетным направлением человеческой деятельности. Данные дистанционного зондирования Земли применяются сейчас в разнообразных областях хозяйственной деятельности: сельское и лесное хозяйства, мониторинг ЧС, поиск и разведка полезных ископаемых, изучение географической оболочки. Особое значение данные зондирования имеют для изучения атмосферы и атмосферных процессов. Благодаря им ученые могут получить подробные профили распределения газовых примесей по высоте и их пространственные поля, включая данные об общем содержании стратосферного озона, а также подробнее изучить циркуляцию атмосферы и распределение температуры воздуха и поверхности.

1.3.1 Краткая история спутниковых данных.

Впервые запечатлеть поверхность земли удалось только в 1858 году. Гаспар-Феликс Турнашон, более известный в мире как Надар, французский фотограф и карикатурист, поднялся над Парижем на воздушном шаре и впервые запечатлел на дагерротипе поверхность города [112].

В конце 19 века начали проводиться исследования, выполненные вне видимой части электромагнитного спектра. Уильям Гершель впервые открыл наличие в спектре излучения Солнца инфракрасные лучи и доказал, что максимум тепловой энергии приходит от Солнца именно в этой части

спектра. Приблизительно в то же время появляются работы немецкого физика Генриха Герца, описывающие длинноволновое радиоизлучение. Все это привело к расширению возможностей изучения физических свойств природных объектов с помощью фотографии.

Второй этап развития дистанционного зондирования связан с зарождением авиации. В 1909 году были получены первые аэрофотоснимки с борта самолета.

Во времена Второй Мировой войны произошел прорыв в изобретении съемочной аппаратуры. В это время широкое распространение получили инфракрасные камеры, используемые для обнаружения военных баз, а также радиолокаторы.

Следующий этап начался с развитием ракетной техники. В октябре 1946 года было принято решение установить на одну из испытываемых ракет фотоаппаратуру. Можно сказать, что первый космический снимок Земли был получен с американской автоматической ракеты V-2. Фотоаппарат сработал на высоте 105 км (рис. 1.18). Правда, назвать эту фотографию космическим снимком поверхности достаточно сложно, так как снимок имел плохое качество, а угол съемки позволил запечатлеть только небольшой участок земной поверхности.

Первые мультиспектральные снимки были произведены в 1959 году также американскими учеными с борта космического аппарата EXPLORER II автоматическими кинокамерами, которые после отделения 2-ой ступени на высоте 70 км совершили успешный парашютный спуск на поверхность Земли [43].

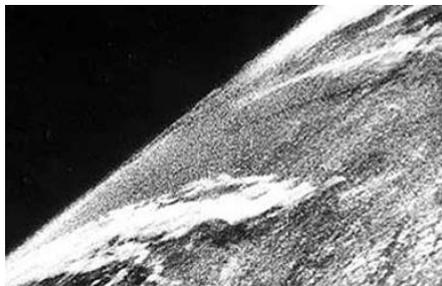


Рис. 1.18 Первый снимок поверхности Земли, полученный на высоте 105 км с ракеты V-2 [113]

Одним из достижений советского космонавта Г. С. Титова, стала первая ручная фото и видеосъемка поверхности Земли в течение его 25-часового пребывания в космосе 6-7 августа 1961 года. Это послужило началом новой эры – эры исследования Земли из космоса.

Первые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) имели метеорологическое назначение и предназначались для изучения общих законов циркуляции атмосферы и синоптических прогнозов.

С развитием съемочной аппаратуры увеличивалось пространственное и спектральное разрешение снимков, что привело к появлению так называемых ресурсных спутников, применяемых для целей экологического мониторинга и разведки полезных ископаемых.

Началом современной эпохи принято считать 1972 год, который стал отсчетной точкой успешного существования и применения спутниковой системы для изучения поверхности Земли. В том году был

запущен спутник, получивший впоследствии название Landsat-1 и успешно продержавшийся на орбите 14 лет.

В настоящее время происходит совершенствование вычислительной техники, съемочной аппаратуры и средств хранения информации для достижения нескольких основных целей: увеличения пространственного разрешения снимков, увеличения производительности космических аппаратов, активного использования радиолокаторов [43].

Все больше и больше искусственных спутников отправляются на орбиту планеты и несут на себе набор разнообразных съемочных аппаратов, предоставляющих разнообразную информацию о нашей планете. В настоящий момент на орбите Земли находится чуть более 2000 спутников различного назначения и их число неуклонно растет [113].

1.3.2 Электромагнитное излучение.

В основе любых дистанционных методов зондирования Земли, кроме акустических, лежит фиксация электромагнитного излучения, приходящего от объекта. Съемка поверхности может вестись в различных диапазонах длин волн, начиная с ультрафиолетового и заканчивая радиоволновым. Каждый из них несет определенный тип информации о земной поверхности. Сочетание снимков, сделанных в различных диапазонах длин волн, имеет наибольшую значимость. Наиболее популярным является синтез в натуральных цветах, то есть наложение друг на друга снимков в красном, зеленом и синем диапазонах видимого спектра, что позволяет нам получить аналог обычной фотографии поверхности. Однако существуют и другие различные варианты комбинаций. Так, например, соединение данных из инфракрасного, ближнего инфракрасного и зеленых каналов позволяет наиболее четко выделить растительные сообщества, а радиоволновые каналы являются самыми показательными для определения водных объектов [113].

Атмосфера неодинаково пропускает через себя лучи различной длины волны. Происходит так потому, что газы, содержащиеся в атмосфере, либо поглощают, либо рассеивают волны в том или ином диапазоне их длины. В результате эти волны не доходят до земной поверхности или не могут вернуться к датчику приемника, а, следовательно, не дают о ней никакой информации. С другой стороны, в спектре электромагнитных волн существуют диапазоны, в которых волны свободно проходят через атмосферу Земли и, достигая поверхности, отражаются обратно в космическое пространство. Такие диапазоны получили название окон прозрачности атмосферы (рис. 1.19).

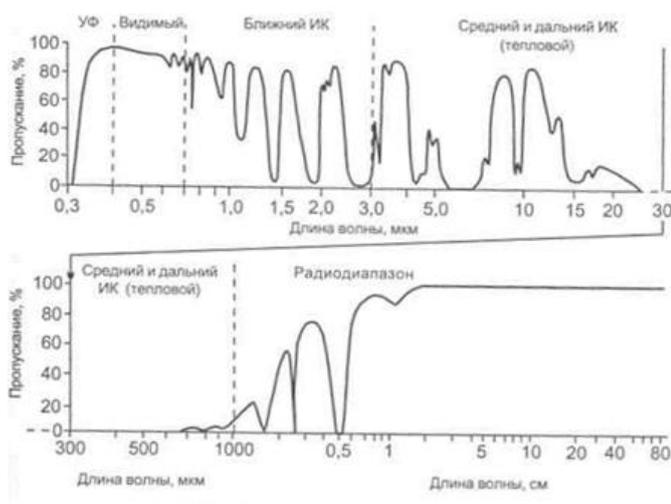


Рис. 1.19 Окна прозрачности атмосферы для различных участков спектра [113]

Все наземные объекты имеют различную поглощательную способность и разное альbedo в каждом из диапазонов длин волн. Например, растительность будет лучше всего отличаться от окружающей территории в красном и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, так как наибольшее значение отражательной способности проявляется именно в этой части спектра. С другой стороны, в диапазоне длин волн ультрафиолетовой части спектра растительность будет фактически неразличима, так как имеет наибольшую поглотительную способность. Исходя из этого, при выборе космического снимка для исследования того или иного объекта необходимо учитывать его спектральные характеристики.

1.3.3 Методы дистанционного зондирования Земли.

По своей сути космический снимок – это фотография, сделанная в различных диапазонах длин волн и, как следствие, предоставляющая информацию не только о внешнем виде объектов, но и их физических свойствах (температуре, плотности и др.).

В основе принципа действия дистанционных методов лежит измерение так называемого собственного или отраженного излучения электромагнитных волн различной длины и частоты, испускаемого объектом. По типу улавливаемого излучения дистанционные методы можно разделить на активные (прибор сам выпускает импульс и улавливает его возвращение от поверхности) и пассивные (прибор фиксирует солнечное излучение, отраженное от земной поверхности).

Излучение Солнца – это основной источник электромагнитного излучения, используемый в пассивных методах ДЗЗ. Главным достоинством этого метода служит большое спектральное разрешение, так как излучение от Солнца приходит в широком диапазоне электромагнитного спектра: от ультрафиолетового до радиоволнового. Часть его достигает поверхности Земли и отражается обратно в космическое пространство. В среднем 30 % от всего количества солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, отражается обратно в космическое пространство (планетарное альbedo). Еще одна часть поглощается объектами земной поверхности и атмосферой. Часть радиации рассеивается

в атмосфере. Затем отраженное и рассеянное излучение снова проходит через атмосферу Земли и, только потом, улавливается датчиком, установленным на космическом аппарате.

Основными приборами, работающими с пассивными методами, считаются фотоаппараты, инфракрасные датчики и радиометры.

Активные методы ДЗЗ основаны на излучении прибором своего собственного излучения в установленном диапазоне длин волн. Как правило, источником энергии для таких приборов служат разного рода лазеры и радиолокационные передатчики. Излучаемая энергия затем регистрируется датчиком в отраженном от поверхности земли или рассеянном атмосферой виде. Числовые характеристики измеренного спектра в дальнейшем переводятся в необходимый формат: числовой или картографический. К приборам, используемым в активных методах, можно отнести радары и лидары - как установленные на космическом аппарате, так и находящиеся на поверхности Земли [44].

1.3.4 Основные виды аппаратов ДЗЗ.

К основным типам аппаратуры ДЗЗ можно отнести: фотоаппаратуру, сканеры и радары. Рассмотрим особенности каждого из них

Самыми простыми в использовании являются фотоаппараты. При использовании световых фильтров фотосъемка может производиться в различных диапазонах длин волн от ультрафиолетового до инфракрасного.

Ширина полосы съемки и пространственное разрешение снимка в этом случае зависят от: высоты съемки и фокусного расстояния объектива. Благодаря изменению наклона оси съемки можно получить как простое плановое изображение поверхности, так и произвести съемку рельефа местности.

Запись информации при фотографическом методе производится на фотопленку, а не предоставляется в электронном формате. Это является основным его недостатком, так как процесс возвращения пленки на поверхности Земли.

Сканерные системы пришли на смену фотоаппаратов. Главное их достоинство – это возможность одновременной многоканальной съемки.

В основе действия данного прибора лежит качающийся или вращающийся элемент (например, зеркало), который фиксирует изображение вдоль движения носителя и посылает отраженный поток в объектив принимающего датчика. Затем информация о потоке энергии передается на точечный сенсор, где и преобразуется из световой в электрическую.

Технология сканерной съемки может быть различной. Выделяют три основных вида: оптико-механическая, оптико-электронная и мультиспектральная (многозональная). На рис. 1.20 отображен принцип действия каждой из них.

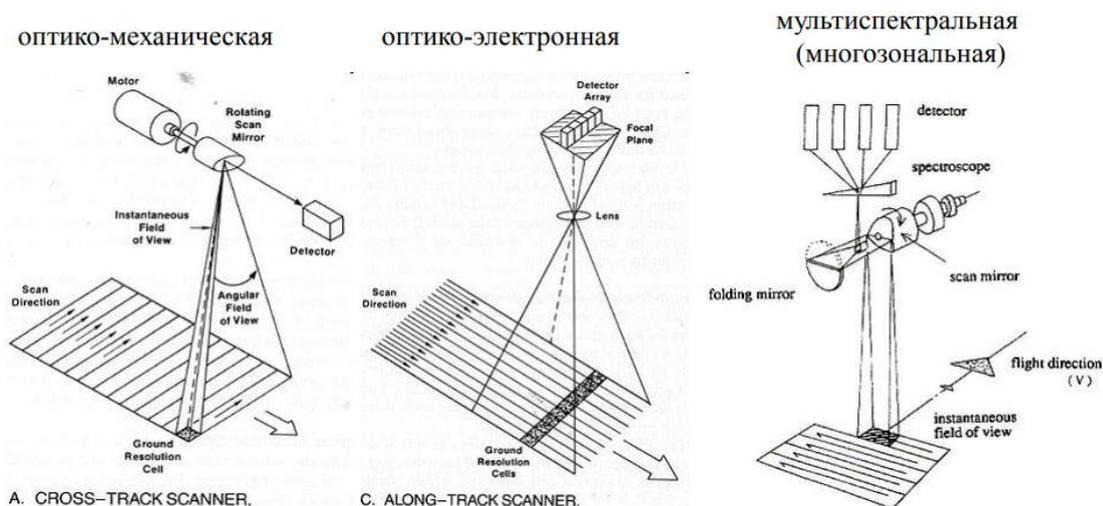


Рис. 1.20 Различные виды технологий сканерной съемки [43]

Основным недостатком сканерных снимков является ограниченность их использования в определенных метеорологических условиях. Сканеры улавливают в основном излучение в видимой и ближней инфракрасной части спектра, которое практически полностью поглощается облачным покровом.

Радарные съемочные аппараты представляют собой сложную систему, состоящую из лазера излучателя, приемного датчика, датчика преобразования информационного потока и системы передачи данных на земную поверхность. Неоспоримым преимуществом радиолокационной съемки является получение данных при любых метеорологических условиях, а также в ночное время, когда пассивные методы съемки не работают из-за отсутствия источника электромагнитного излучения. Принцип действия основан на испускании радиосигнала и фиксировании времени его возвращения на приемный датчик в результате отражения, а также интенсивности возвращенного сигнала.

В основном радиолокация применяется для геологических целей, целей орографии и топографии (исследование рельефа местности) и мониторинга водных объектов. Наиболее четко на радиолокационных снимках отображаются именно водные объекты, которые выглядят на снимках как абсолютно черные пятна. Это связано с физическими свойствами воды, которая является непроницаемым экраном для радиоволн.

По радиолокационным снимкам строятся так называемые цифровые модели рельефа, которые могут иметь пространственное разрешение менее 1 м и учитывать изменения в рельефе вплоть до нескольких сантиметров.

По текстуре радиолокационных снимков, то есть интенсивности возвращенного сигнала, определяют геологическое строение верхних слоев земной коры, а также интенсивность геохимических процессов. Наибольшей спектральной яркостью обладают магматические породы, в то время как рыхлые осадочные породы дают пятнистую структуру на снимке.

Особняком среди аппаратов ДДЗ стоят инфракрасные датчики, производящие съемку в тепловом диапазоне длин волн. Они фиксируют собственное излучение объектов земной поверхности, которое получается двумя основными путями: эндогенным (нагревом объектов внутренним теплом земных недр) и экзогенным (нагревом посредством поглощения солнечных лучей). Тепловое излучение частично поглощается в атмосфере, поэтому невозможно вести космическую съемку во всем диапазоне инфракрасных волн. Но экспериментально было выявлено 4 основных окна прозрачности, в которых инфракрасное излучение возвращается обратно в космическое пространство [44].

1.3.6 Снимки в тепловом ИК-диапазоне длин волн.

Результаты тепловой съемки поверхности Земли находят широкое применение в разных областях: картографировании тепловых полей Земли, определении температуры морской поверхности, наблюдениях за вулканической деятельностью, мониторинге лесных пожаров. Набирает обороты использование ИК-снимков для изучения процессов, происходящих в городской среде.

Современные тепловые ИК-изображения характеризуются высоким пространственным разрешением. Сенсоры предоставляют снимки с пространственным разрешением от 1 км (MODIS) до 90 м (Aster), 60 м (Landsat 7), 120 м (Landsat 5) [107].

В основе теплового инфракрасного дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) лежит регистрация излучения в диапазоне электромагнитных волн от 1,3 до 1000 мкм. Согласно закону смещения Вина, длина волны максимума излучения абсолютно черного тела обратно пропорциональна температуре объекта:

$$\lambda_{\max} = C/T \quad (4),$$

где $C \approx 3000$ [мкм · К].

Для большинства земных объектов длина волны собственного излучения максимальной интенсивности находится в пределах 10 – 12 мкм. Сама земная поверхность, средняя температура которой составляет около 15°C (288 К), характеризуется максимумом излучения на длине волны ≈ 10 мкм.

Тепловое ДЗЗ поверхности позволяет наблюдать объекты при отсутствии прямого солнечного излучения (т.е. ночью), однако атмосфера поглощает большую часть ИК-спектра. Окна прозрачности существуют в интервалах 3 – 5 мкм, 8 – 12 мкм, а также 30 – 80 мкм. В интервалах 3 – 5 мкм и 8 – 12 мкм в основном и производится съёмка в тепловом диапазоне, съёмку в окне прозрачности 30 – 80 мкм часто называют радиотепловой.

Для преобразования спектральной яркости в температуру используют три основных метода: метод одного ИК канала; метод расщепления окна, используемый в различных многоканальных алгоритмах и метод день-ночь, основанный на разнице в собственном эффективном излучении планеты, проявляющимся ночью, и влиянии солнечного излучения в дневное время. Однако для каждой

космической системы разрабатывается своя собственная методика пересчета спектральной яркости пиксела в тепловом диапазоне в радиояркую температуру [21].

В данной работе нами использовались космические снимки в тепловом ИК-диапазоне, полученные со спутников TERRA и AQUA и произведённые радиометром MODIS. Рассмотрим более подробно систему пересчета спектральной яркости в ИК диапазоне в температуру поверхности регрессионным спектральным алгоритмом, применяемым для снимков радиометра MODIS.

Для получения стандартного продукта пересчет температуры производится с учетом яркости в двух спектральных каналах теплового диапазона с центрами длин волн 11 и 12 мкм, соответствующими окну прозрачности атмосферы для теплового излучения.

В данном регрессионном алгоритме пересчет температуры поверхности производится из уравнения следующего вида:

$$T_s = C + \frac{\alpha(T_{11}+T_{12})}{2} + \frac{\beta(T_{11}-T_{12})}{2}, \text{ где} \quad (5)$$

$$\alpha = A_1 + A_2*(1-\varepsilon) + A_3*(\Delta\varepsilon/\varepsilon^2); \beta = B_1 + B_2*(1-\varepsilon) + B_3*(\Delta\varepsilon/\varepsilon^2); \quad (6)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})/2; \Delta\varepsilon = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12})/2, \text{ где} \quad (7)$$

T_s – температура поверхности суши; T_{11} и T_{12} – значения радиационной яркости пикселя в спектральных каналах 31 и 32 соответственно; ε_{11} и ε_{12} – спектральная излучательная способность поверхности в 31 и 32 каналах соответственно; C , A и B – это коэффициенты регрессии, зависящие от двух показателей: температуры приземного слоя воздуха T_b и общего влагосодержания атмосферы W , которые оперативно поступают все по тем же данным радиометра MODIS.

Данный алгоритм прост для вычисления и эффективно применяется для глобального мониторинга земной поверхности. Однако этот метод имеет существенные недостатки, что приводит к достаточно большой погрешности измерения температуры поверхности в 1°C . Недостатки связаны с тем, что в модели изначально существуют некоторые ограничения:

Во-первых, в модели учитывается поглощение теплового излучения только водяным паром и пренебрегается поглощение другими парниковыми газами, такими как углекислый газ и метан. Во-вторых, коэффициенты регрессии рассчитываются только с учетом ограниченного набора метеорологических условий при безоблачной атмосфере. Ну и наконец, ошибки в расчетах температуры поверхности зависят от ошибок измерения радиационной температуры (T_{11} и T_{12}) и ошибок задания излучательной способности поверхности ε_{11} и ε_{12} [13].

Однако, несмотря на все это, мы сделали выводы, что для целей данной работы даже при ошибках в расчете температуры поверхности в 1°C данные радиометра MODIS, установленного на спутниках-носителях Terra и Aqua, имеют неоспоримые преимущества перед другими съемочными системами благодаря своему пространственному и временному разрешению.

1.3.7 Спутники Terra и Aqua.

Aqua (оригинальное название EOS PM-1) — научно-исследовательский спутник, запущенный 4 мая 2002 года с авиабазы Ванденберг (США). Спутник Aqua является частью комплексной программы NASA EOS (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и глобальных изменений и состоящей из трёх специализированных спутников Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно. Это совместный проект трех держав: США, Японии и Бразилии. Спутник имеет следующие технические характеристики и показатели орбиты (табл. 1.1). У него полярная орбита, то есть при каждом новом витке вокруг Земли он проходит через полярную область Земли. Также его орбита является солнечно-синхронной, то есть спутник вращается вокруг Земли вслед за видимым движением Солнца.

На спутнике установлены различные инструменты для наблюдения за сушей, океаном, атмосферой, ледовым и снежным покровами и растительностью. Такой комплексный подход к сбору данных позволяет ученым изучать взаимодействие между всеми четырьмя сферами Земли, составляющими ее географическую оболочку.

В основном спутник Aqua предоставляет данные о гидросфере Земли. С его помощью получают достаточно точные, достоверные и ежедневные данные о количестве водяного пара в атмосфере, облаках, влажности почвы, а также о ледовой обстановке как на суше, так и в океане.

Таблица 1.1 Технические характеристики и элементы орбиты спутников Aqua и Terra [83]

Технические характеристики спутников AQUA и TERRA		
Спутник	AQUA	TERRA
Масса	3117 кг	4864 кг
Мощность	4444 Вт	2530 Вт
Элементы орбиты		
Эксцентриситет	0,000921	0
Наклонение	98,2°	98,2°
Период обращения	98,4 мин	98,1 мин
Апоцентр	686 км	685 км
Перицентр	673 км	654 км

На борту спутника установлено шесть уникальных научных приборов: атмосферный инфракрасный зонд AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), перспективный микроволновый блок зонда AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), бразильский зонд влажности HSB (Humidity Sounder for Brazil), перспективный микроволновый сканирующий радиометр по программе EOS — AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), спектрометрический радиометр среднего разрешения MODIS (Moderate-

Resolution Imaging Spectroradiometer), система измерения излучательной способности облачного покрова и Земли CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System). Каждый из шести приборов уникален по своим характеристикам и возможностям, и все они являются мощным инструментом в изучении Земли из космоса.

Проектный срок эксплуатации спутника в начале запуска составлял всего пять лет, однако спутник и его приборы успешно работают по настоящее время. На официальном сайте NASA выставлен прогноз о работе спутника еще в течение нескольких лет. Правда, не все приборы сейчас успешно функционируют. Данные высокого качества продолжают поступать с четырех из шести приборов: AIRS, AMSU, CERES и MODIS. Данные пониженного качества также продолжает передавать AMSR-E. Шестой прибор HSB успешно проработал всего девять месяцев и отключился уже в феврале 2003 года.

В рамках программы EOS 18 декабря 1999 г. был запущен спутник EOS-AM1 (под названием Terra) с испытательного полигона авиабазы Ванденберг, Калифорния. Спутник доставлен в космос на ракете-носителе Atlas IIAS. Terra был выведен на солнечно-синхронную полярную орбиту высотой 705 км под углом 98° по отношению к экватору. Спутник имеет следующие характеристики (см. табл. 1.1).

На спутнике Terra установлено специальное оборудование, предназначенное для комплексного изучения всех четырех сфер нашей планеты, а также изучения земной поверхности как целостной системы. Посредством установленной аппаратуры ведется наблюдение за земной атмосферой, поверхностью суши, океанами и радиационными составляющими (энергией и светом).

Terra одновременно изучает облака, водяной пар, мелкие частицы в атмосфере (так называемый "аэрозольные" или взвешенные частицы), следовые газы, поверхность суши и свойства океанической поверхности, а также взаимодействие между ними и их влияние на радиационный баланс Земли. Кроме того, Terra наблюдает изменения в радиационном балансе Земли - это количество поступающей энергии от Солнца минус отраженная энергия солнечного света и собственное излучаемое тепло планеты.

Этот спутник - совместный проект трех держав: США, Японии и Канады. На спутнике установлено пять независимых датчиков, три из которых предоставлены США (Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR), и Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)), один Японией (the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)) и ещё один – Канадой (Measurements of Pollution In The Troposphere (MOPITT)) [95].

В настоящее время спутник успешно осуществляет свою деятельность без существенных технических проблем. Прогнозируемое прекращение «жизни» летательного аппарата по данным NASA составляет также, как и для спутника Aqua, начало 20-х годов 21 века. Операционные инструменты: ASTER, CERES, MODIS, MISR и MOPITT работают хорошо, правда с периодическими сбоями в поступлении и качестве данных. Данные коротковолнового инфракрасного порта (SWIR) ASTER недоступны.

1.3.8 Радиометр MODIS.

Одной из задач данной работы, был анализ годового хода и многолетних изменений интенсивности поверхностного «острова тепла» в городе Москва. Для этого нам были необходимы регулярные данные о температуре поверхности региона. Радиометр MODIS, установленный на двух спутниках Terra и Aqua, является наилучшим источником таких данных. Неоспоримым преимуществом также является их доступность, поскольку все продукты данного аппарата размещены в открытом доступе на сайте EarthData [120].

Спектральный радиометр производит съемку в полосе 2330 км одновременно в 36 спектральных зонах видимого, ближнего, среднего и теплового инфракрасного диапазонах с пространственным разрешением 250, 500 и над сушей 1000 метров и радиометрическим разрешением 12 бит.

Съемочная система MODIS поставляет потребителю продукты различного уровня обработки. К ним относятся:

- базовые продукты уровней обработки от Level0 до Level1B;
- тематические продукты для научных исследований;
- конечные продукты для широкого круга пользователей.

Базовые продукты

Базовые продукты представляют собой космические снимки на первой стадии их обработки, начиная от так называемых «сырых» данных, приходящих со спутника в виде числовой матрицы значений, и заканчивая данными, прошедшими географическую привязку и калибровку. К базовым продуктам можно отнести:

1. Продукты уровня *Level0* (файлы PDS) – первичные «сырые» данные, записанные в виде цифр в двоичной системе исчисления, то есть в том виде, как они формируются на борту спутника. Такие данные доступны только для работников приемной станции и подвергаются в последующем специальной обработке и переводу в привычный для обычного пользователя формат.

2. Продукты уровня *Level1A* (продукт MOD01) – это результат распаковки данных предыдущего уровня в иерархический формат данных HDF. Эти данные не подвергаются никакой обработке.

3. Продукты уровня *Level1B* представляет собой результат калибровки данных предыдущего уровня. При преобразовании данных из уровня 1A в уровень 1B данные различного пространственного разрешения подразделяются на 4 типа файлов:

- MOD021KM (данные всех 36 каналов, приведенные к разрешению 1 км);
- MOD02HKM (данные с 1 по 7 канал, приведенные к разрешению 500 м);
- MOD02QKM (данные 1 и 2 каналов с разрешением 250 м);
- MOD02OVC (бортовые калибровочные данные).

При дальнейшей обработке и производстве тематических продуктов более высокого уровня к имеющимся данным добавляют дополнительную информацию, которая приведена в табл. 1.2.

Таблица 1.2 Дополнительная информация для формирования тематических информационных продуктов [96]

Имя файла	Комментарий
leapsec.dat	Файл поправок времени
GEO_parameters.dat	Геометрические параметры аппаратуры MODIS, используемые при расчете географической привязки
utcpole.dat	Параметры движения Земли
de2000.eos	Эфемериды космических тел, использующиеся при расчете положения Солнца и Луны
lwm1_n*x*	Маска вода-суша
Dem30sec_n*x*	Цифровая модель рельефа с размером ячейки 30 угловых секунд
ecosystem	Основные данные о подстилающей поверхности

4. Продукт MOD03 – это результат географической привязки данных сканера. Он содержит в себе данные о широте, долготе и высоте местности над уровнем моря, а также информацию об угле сканирования и положения Солнца над территорией. В дополнение к этим данным прикладывается маска «вода-суша» (т.е. шаблон границ береговой линии) и многие другие сведения для каждого отдельного пикселя с пространственным разрешением 1 км.

Тематические продукты для научных исследований

Существует 9 основных групп тематических продуктов MODIS, созданных для научных целей:

1. Маска облаков (*MOD35*) – распределение облачного покрова днем и ночью с разрешением 1 км;
 2. Растительность и почвенный покров (*MOD13, 15-17, 43, 44*), в том числе их состояние и продуктивность, определяемые по вегетационным индексам (NDVI и EVI), поляризационные эффекты и индикатриса отражения, распознавание типа земного покрова, первичная продуктивность растительности, индекс листовой поверхности LAI, доля излучения, абсорбируемая растениями при фотосинтезе;

3. Пожары и тепловые аномалии (*MOD14*) – оперативное обнаружение и мониторинг природных (лесных) пожаров, вулканов и других тепловых аномалий с разрешением 1 км. MODIS может зафиксировать пожар на площади менее 1 км². Это становится возможным благодаря резкому контрасту пожара даже очень маленькой площади по сравнению с температурным окружением;

4. Мониторинг снежного и ледового покровов (*MOD10, 29*), в т.ч. спектральная и отражательная способность снега и льда, их температура;

5. Температура поверхности, определяемая для суши (*MOD11*) и водных объектов (*MOD28*) с разрешением 1 км. Максимальная точность измерения – 0.3 – 0.5° для водных объектов и 1 °С для суши;

6. Концентрация и оптические свойства аэрозольных частиц - оптическая плотность, их эффективный радиус, фазовое состояние, высота и температура верхней границы;

7. Цвет океанической воды (*MOD19*), спектральная энергетическая яркость поверхности океана;

8. Концентрация хлорофилла (*MOD21*) в пределах 0.05 – 50 мг/л для вод класса 1 (прозрачные);

9. Флуоресценция хлорофилла (*MOD20*) при концентрации хлорофилла в поверхностном слое 0.5 мг/л.

Конечные продукты для широкого круга пользователей.

После конечной обработки данных радиометра на основе продуктов предыдущего уровня производятся тематические продукты для широкого круга пользователей. Они представляют собой различные тематические карты и схемы, сопровождаемые легендой и другой дополнительной информацией, а также векторные файлы. Например, на рис. 1.21 представлена карта расчлененности растительного покрова в бассейне реки Амазонка по данным радиометра MODIS о значении индекса NDVI. Участки, отмеченные красным цветом, отражают новые территории освоения бассейна реки человеком, и, как следствие, уменьшение площади лесов и снижение их продуктивности [30].

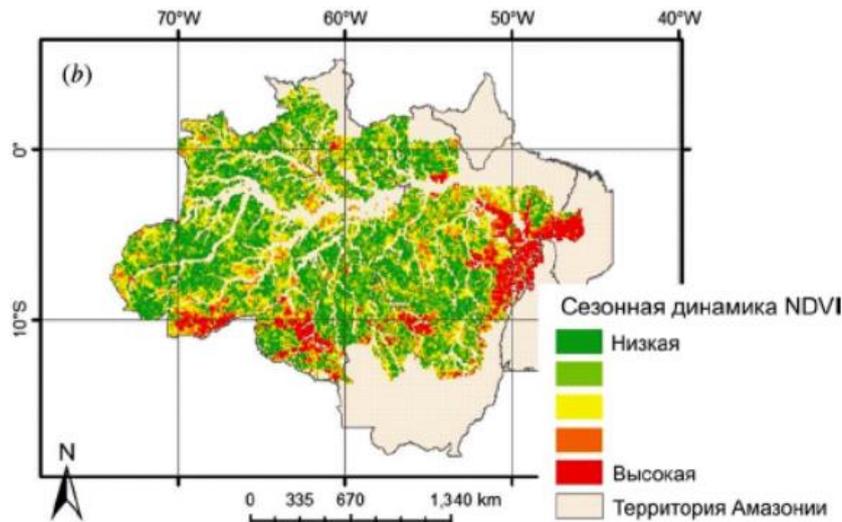


Рис. 1.21 Тематическая карта фрагментированности территории растительного сообщества бассейна реки Амазонки по данным сезонных значений NDVI [30]

Продукты конечного потребления рассчитаны на широкий круг пользователей и готовы к интеграции в пользовательские географические информационные системы.

На основе многолетних баз данных также могут создаваться карты динамики или прогнозные карты. Они позволяют отследить изменение того или иного параметра окружающей среды в прошлом, настоящем и будущем.

В настоящей работе для изучения явления городского «острова тепла» и его пространственной структуры использовались следующие продукты MODIS: MOD021KM (в данном продукте заключены данные о температуре поверхности) и MOD03 (данные, содержащие географическую привязку). Для дополнительных исследований были применены следующие тематические продукты: растительность и

почвенный покров (MOD13, 15-17, 43, 44), к которым относятся вегетационный индекс NDVI и индекс листовой поверхности LAI, а также маска облаков (MOD35).

Таким образом, из всего выше сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Спутниковые данные дистанционного зондирования Земли наилучшим образом подходят для изучения пространственных характеристик большого набора элементов;
2. Спутники Terra и Aqua являются одними из самых долгоживущих на орбите Земли и накопили огромный объем информации о географической оболочке планеты;
3. Установленный на этих спутниках радиометр MODIS продолжает нормально функционировать по сей день. Благодаря этому мы имеем возможность получить ежедневные данные о температуре поверхности за долгосрочный период с декабря 1999 года по настоящее время;
4. Для целей работы космические снимки радиометра MODIS являются наиболее подходящим источником данных благодаря своему высокому временному и пространственному разрешению, а точность предоставляемых данных о температуре поверхности (1°C) является достаточной для изучения общих закономерностей изменения температурного поля на территории Московского региона.

Глава 2. Поверхностный «остров тепла» Москвы.

В начале данной главы стоит повторить вышесказанное. Для решения основных задач, поставленных в этой работе, использовались данные, приходящие с двух полярно-орбитальных спутников Terra и Aqua серии EOS (Earth Observing System), контролируемые космическим агентством США, на которых установлен радиометра MODIS. Так как данная аппаратура аналогична для обоих спутников, становится возможным расширение количества данных, сравнение и осреднение их друг с другом.

2.1 Данные и программное обеспечение.

Радиометр MODIS осуществляет съемку в 36 спектральных каналах в диапазоне от видимой части спектра (от 0,45 мкм до 0,75 мкм), и различных частях инфракрасного диапазона (от 0,75 до 14,36 мкм). Ширина полосы съемки для данного прибора составляет 2330 км, что позволяет получить на одном снимке весь Московский регион. Правда существенным недостатком являются радиометрические и геометрические искажения при положении объекта на краях полосы обзора.

На рис. 2.1 слева изображен фрагмент космического снимка за 12.05.2011 года с борта космического спутника Terra, на котором г. Москва находится практически в центре полосы съемки. Можно заметить, что любые помехи на данном участке снимка отсутствуют, снимок четкий и геометрически правильный. В правой части рисунка 2.1 изображен фрагмент другого космического снимка, сделанного в июне того же года, где Москва находится уже на краю полосы обзора. Хорошо видно, что во втором случае геометрическая форма границ города сильно искажена. Город как бы вытягивается в направлении с севера на юг, при этом сжимаясь в направлении с запада на восток. Следует также отметить, что уменьшается четкость изображения, а текстура становится более шероховатой с множеством повторений и дублированием полос съемки. Помимо всего прочего, очень часто возникают пропуски данных, когда в матрице данных ряд пикселей со значениями чередуется с рядом, где каждому пикселю присваивается значение «нет данных». В местах, где четко выражено дублирование полос прохождения сканера в матрице данных о температуре поверхности также иногда наблюдаются повторения значений. Все это может привести к ошибкам в расчетах средней температуры поверхности внутри города. Как можно увидеть на данном фрагменте снимка произошло удвоение изображения парка Измайлово (показано красными стрелками), а в центральной части города отчетливо заметны несколько полос радиометрических помех.

Для вычисления температуры поверхности по данным радиометра MODIS использовался стандартный продукт Land Surface Temperature (LST). Температура поверхности в нем, как объяснялось ранее, рассчитывается исходя из спектральной яркости двух каналов съемки 31 и 32 с длинами волн 10,78–11,28 и 11,77–12,27 мкм соответственно. Калибровка данных осуществляется в зависимости от

широты местности, зенитного угла радиометра и влажности воздуха. Точность измерения температуры при этом составляет по проектным данным $\pm 1^\circ\text{C}$.



Рис. 2.1 Примеры фрагментов космических снимков. Слева космический снимок за 12.05.2011 – Москва находится в центре полосы съемки; Справа космический снимок за 02.06.2011 – Москва на краю полосы. Красными стрелками показан пример дублирования изображения [120]

При работе с данными о температуре поверхности использовались три продукта радиометра MODIS – файл географической привязки MOD03, файл содержащий данные о спектральной яркости во всех каналах съемки радиометра с разрешением в 1 км MOD021KM и, наконец, файл, который содержит в себе непосредственную информацию о температуре поверхности суши MOD11. Все эти данные находятся в открытом доступе в архиве официального поставщика данных на официальном сайте космического агентства NASA [120].

Если говорить про пространственное разрешение данных о температуре поверхности, то оно составляет 1 км при радиометрическом разрешении 12 бит. Такого разрешения вполне достаточно для изучения пространственной структуры температурного поля Московского региона.

Для обработки данных дистанционного зондирования Земли радиометром MODIS использовалось программное обеспечение, разработанное инженерно-технологическим центром СканЕкс. Программа ScanEx Image Processor (SIP) позволяет работать с различными форматами данных ДЗЗ и обеспечивает высокую производительность и скорость вычислительных операций. Большинство операций в данной программе автоматизированы и не требуют от пользователя определенных знаний и умений. Применяется эта программа для различного рода задач, от простых, таких как составление мозаик снимков и работа с синтезом каналов, до сложных задач построения тематических карт на основе классификаций объектов дешифрирования. После обработки космических снимков в программе ScanEx Image Processor получились таблицы с распределением температуры поверхности по исследуемой

территории в формате ex1. Одна ячейка таблицы отображает температуру поверхности в градусах Кельвина в одном пикселе снимка, то есть осредненное значение на 1 км² площади.

Ячейки со значениями -9999 - это пиксели, где по тем или иным причинам данные отсутствуют. Чаще всего такие значения появляются в пикселях, перекрытых облаками, индустриальной дымкой или шлейфами от пожаров. Так, например, в центральной части города почти в половине случаев (в 48%) отобранных снимков возникает небольшая область отсутствия данных, хотя сам снимок произведен в практически безоблачных условиях (рис. 2.2). Такое явление можно объяснить сильной индустриальной дымкой над центральной частью города из-за активного движения автотранспорта и замедленного воздухообмена. Особенно часто пропуски появляются на летних снимках, а на зимних гораздо реже. Такие значения автоматически удалялись при обработке данных.

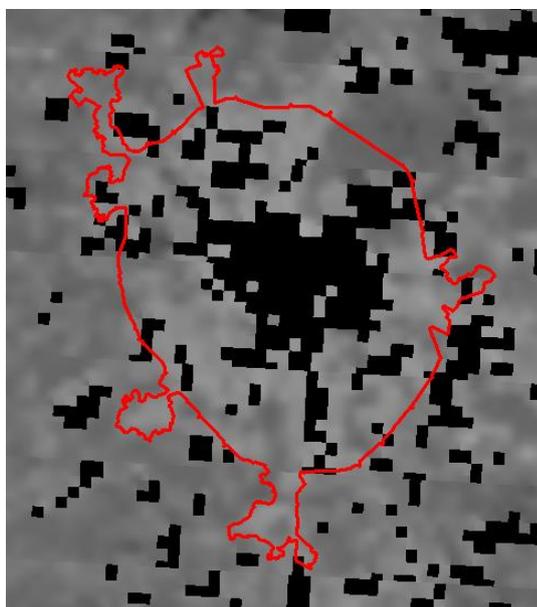


Рис. 2.2 Область значений «нет данных» в центральной части города. Красная линия – это граница города; черные квадраты – это пиксели со значением «нет данных»

При имеющемся у снимков пространственном разрешении в расчетной сетке при безоблачных условиях оказывается 1002 ячейки со значениями температуры поверхности (рис. 2.3), а на территории Московской области 45 955 ячеек. Это число во много раз превосходит плотность метеорологической сети на территории Московского региона, что позволяет подробно рассмотреть все тонкости изменения температурного поля.

Следует отметить, что при расчете температуры поверхности по данным спутников в большинстве случаев мы получаем температуру именно верхней части земной поверхности. Однако, если говорить о городской территории с плотной многоэтажной застройкой или лесных массивах с высокой степенью сомкнутости крон, при расчете температуры поверхности мы получаем температуру именно верхнего слоя этих типов, то есть температуру крон деревьев или крыш зданий. Такое измерение может привести к завышению значения интенсивности городского «острова тепла», так как температура крыш зданий и

сооружений в городе заведомо выше, нежели температура транспирирующих крон деревьев в сельской или пригородной местности.

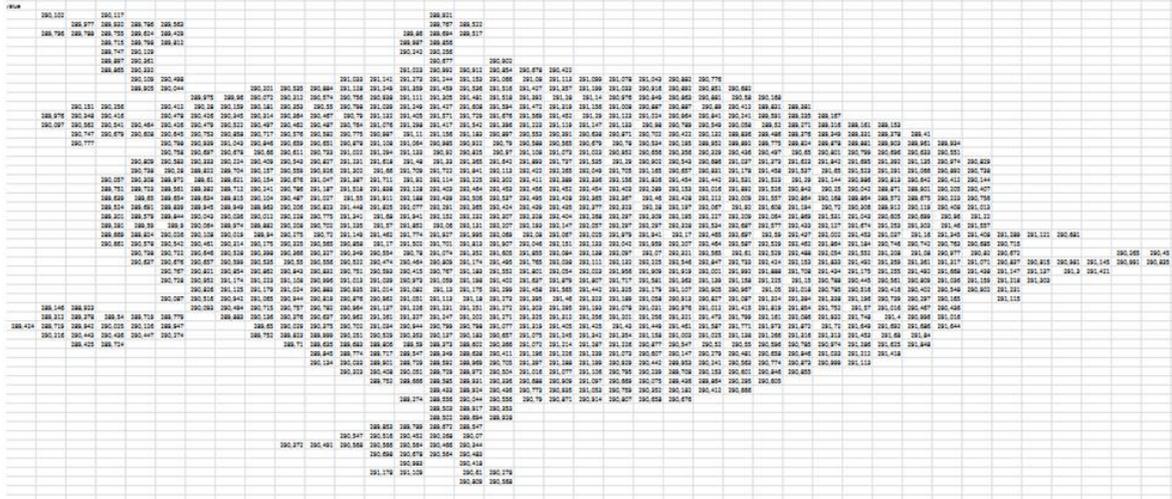


Рис. 2.3. Пример расчетной матрицы температуры поверхности при абсолютно безоблачных условиях. Число отдельных ячеек – 1002

2.2 Время пролета спутников.

Спутники Terra и Aqua пролетают над Центральной Россией два раза в сутки: в дневные и ночные часы (треки пролета спутников представлены на рис. 2.4). Это становится возможным благодаря приполярной орбите данных летательных аппаратов. Однако в данной работе использовались только дневные снимки. Это объясняется их доступностью для просмотра и визуального анализа облачности. Именно наличие плотного облачного покрова ограничивает количество снимков, пригодных для анализа.

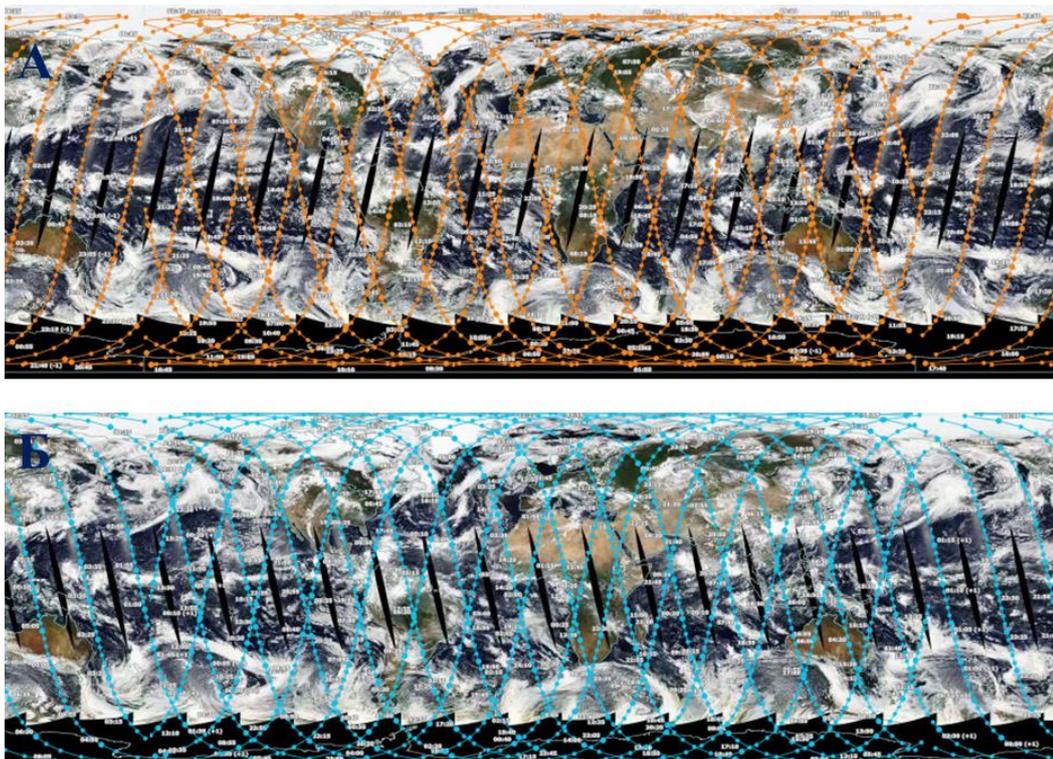


Рис. 2.4 Треки пролетов спутников 02.06.2011: верх – спутник Terra; низ – спутник Aqua [120]

В ходе работы на первом этапе отбора космических снимков осуществлялся визуальный контроль количества облаков. Каждый снимок Московского региона с обоих спутников за период с 2000 по 2020 просматривался на видимость территории города в условиях облачности и окончательное исключение снимков со сплошным облачным покровом. В результате за 21 летний период из 15342 имеющихся дневных снимков условно пригодными к анализу, то есть если хотя бы часть Москвы и Московского региона свободна от плотного облачного покрова, оказались всего 2112 снимка, что составляет 13,8 %.

В таблице 2.1 представлены ряды пригодных для анализа снимков за 2013 год, когда Москва находится в безоблачных условиях на снимках обоих спутников. Для каждого случая приведено время пролета по времени UTC (Universal Time Coordinated), что соответствует времени Гринвичского меридиана. Желтым цветом отмечены примеры тех дней, когда разница между пролетами спутников составляет всего 10 минут.

Табл. 2.1 Время пролета спутников над территорией Москвы в 2013 году на пригодных для анализа снимках, полученных с двух спутников

	Дата	25.01	18.02	21.02	25.02	26.02	02.03	04.03	05.03	22.03
Время пролета спутника по UTC	Терра	9:10	8:20	8:50	8:25	9:10	8:45	8:30	9:15	8:20
	Аква	9:20	10:10	10:40	10:15	9:20	10:35	10:20	9:25	10:10
	Дата	29.03	10.04	11.04	12.04	17.04	23.04	07.05	08.05	02.06
Время пролета спутника по UTC	Терра	8:25	8:50	7:55	8:40	8:55	8:20	8:30	9:15	9:10
	Аква	10:15	10:40	9:45	10:30	10:45	10:10	10:20	9:25	9:20
	Дата	24.06	26.06	30.06	02.07	09.08	11.08	14.10	18.11	10.12
Время пролета спутника по UTC	Терра	8:30	8:20	9:35	9:20	8:45	8:30	8:30	9:00	8:25
	Аква	10:20	10:10	9:45	9:30	10:35	10:20	10:20	10:50	10:15

Как правило такая ситуация складывается в одно и то же время в районе от 9 до 10 часов UTC. Это объясняется повторяемостью треков пролета спутника. Если говорить в целом о времени пролета, то спутник Terra пролетает над Московским регионом самое раннее в 7:50 по UTC, а самое позднее в 9:55 (т.е. с 10:50 до 12:55 по Московскому времени), в то время как Aqua, пролетающий следом, производит самую раннюю фотографию в 9:20, а самую позднюю в 11:05 по UTC (с 11:20 до 14:05 часов по Московскому времени). Это время считается поздним утром. А как известно именно в утренние часы интенсивность «острова тепла» минимальна. То есть такое время пролета спутника может привести к занижению значений.

Иногда Московский регион оказывается разделенным и его части располагаются на двух разных сценах одного пролета спутника. Например, южная часть Москвы и Московской области оказывалась на снимке, произведенном в 8:30, а северная на снимке с датировкой времени 8:35 по UTC. В таких случаях

производилось слияние сцен, то есть составление мозаики снимков, и только потом производился расчет температуры поверхности.

При работе с данными спутников требуется решить целый ряд методических вопросов:

1. Оценить влияние размера области осреднения данных на интенсивность поверхностного «острова тепла»;
2. Выявить пороговое значение покрытия снимка облаками, при котором анализ «острова тепла» возможен и не приводит к ошибкам в расчетах;
3. Провести сравнение с данными метеорологической сети о температуре воздуха и поверхности;
4. Определить смещение оценок среднесуточной интенсивности поверхностного острова тепла из-за дневного времени пролета спутников;
5. Произвести оценку смещения среднемесячных и среднегодовых значений интенсивности из-за влияния антициклональных условий, при которых облака отсутствуют и данные о температуре поверхности доступны [32].

2.3 Анализ пространственной устойчивости значений интенсивности «острова тепла» в Москве.

После описания основных методов анализа городского «острова тепла» приступим к разбору изложенных выше методологических проблем обработки спутниковых данных применительно к задачам данной работы.

Первая важная проблема - это оценка изменчивости характеристик интенсивности «острова тепла» в зависимости от выбора границ городской территории и области сравнения. Все это сводится к оценке устойчивости параметра I (интенсивность поверхностного «острова тепла») в пространстве.

Чтобы установить степень устойчивости I в пространстве были выбраны различные варианты геометрического представления Москвы и окружающей ее Московской области.

Для проведения анализа устойчивости интенсивности поверхностного «острова тепла» в зависимости от границ города, Москва была представлена в трех разных представлениях границ. Как говорилось выше, в главе 1, для вычисления интенсивности поверхностного «острова тепла» столицы были выбраны действовавшие до 2011 года границы города,

Второе представление - это Москва как прямоугольник, захватывающий большую часть города в традиционных границах, но выходящий своими углами за его пределы, имеющий площадь приблизительно равную площади реальных границ города, что составило 1030 км² (рис. 2.5).

Как можно увидеть, в северо-восточный и юго-западный угол прямоугольника вошли территории, явно отличающиеся по своим свойствам от городской застройки. Это восточная часть лесопарка Лосиный остров, а также лесные и сельскохозяйственные угодья юго-западной пригородной территории

Московской области. Третье представление - Москва вместе с присоединенной в 2012 году территорией Новой Москвы.

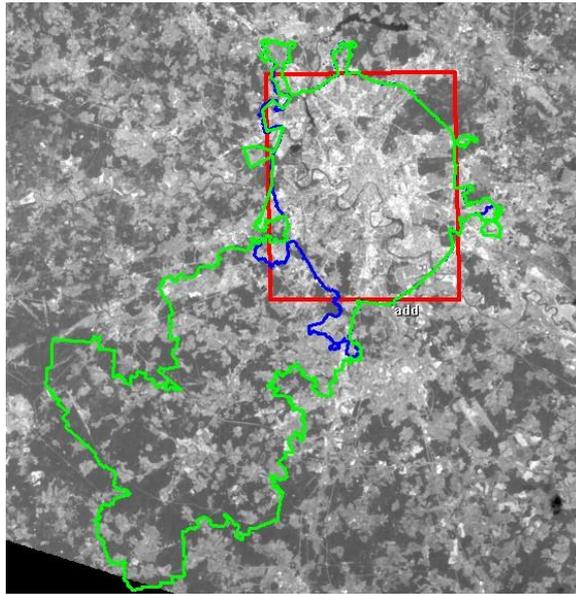


Рис. 2.5 Представления границ города Москва. Красный прямоугольник отображает квадратные границы города, синяя линия - граница Москвы до 2011 г., зеленая - границы Новой Москвы.

За область сравнения в данном случае был выбран прямоугольник, описанный вокруг административных границ Московской области (на рисунке рис. 2.6 изображена синим цветом).

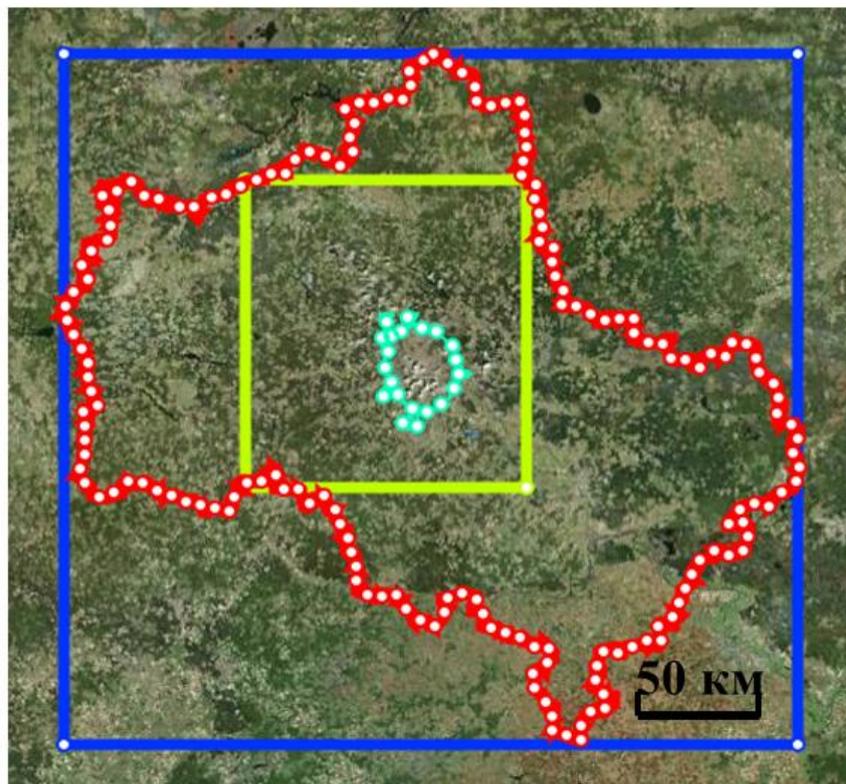


Рис. 2.6 Примеры проведения границ области сравнения

Данный анализ производился по ограниченной выборке снимков, полученных за период с 1 января 2010 года по 31 декабря 2013 года. Число таких снимков составило всего 65 с обоих спутников. Результаты расчетов параметров I представлены в табл.2.2. Как можно увидеть, что самое большое значение интенсивность поверхностного «острова тепла» принимает при учете реальных, действовавших до 2011 года границ столицы, в то время как I , рассчитанная для территории Новой Москвы, ниже более чем в 2 раза. Причем ее значение было меньше по данным всех снимков, а средняя разница составила 1,7 °С при стандартном отклонении 1,0 °С. Кроме того среднегодовые значения I для Москвы в новых границах слабо изменилось за рассмотренный период (от 1,2 °С в 2010 году до 1,7 °С в 2013). Это еще раз подтверждает несостоятельность применения в расчетах современных административных границ столицы.

Табл. 2.2 Значение интенсивности «острова тепла» при учете различных границ города

	Интенсивность "острова тепла" в границах Москвы до 2011 года	Интенсивность "острова тепла" в границах прямоугольника	Интенсивность "острова тепла" в границах Новой Москвы
Средние значения за 2010-2013	3,06	2,67	1,41

Что касается внешней области сравнения, то для анализа пространственной изменчивости Московский регион был представлен в виде трех различных по своей площади фигур: прямоугольник, описанный вокруг административных границ области, непосредственно Московская область в ее административных границах и прямоугольник, вписанный в реальные границы (рис. 2.6).

Площадь описанного вокруг Московской области в её крайних точках прямоугольника (синий прямоугольник на рисунке) составляет 94 851 км²; он включает в себя также части всех пограничных областей (Тверской и Ярославской на севере, Владимирской и Рязанской на востоке, Тульской и Калужской на юге, а также Смоленской на западе). Московская область занимает вместе с Москвой площадь 46 570 км² (красная граница с белыми кружочками), а вписанный в неё прямоугольник – 15 955 км² (желтый цвет). Он охватывает лишь ближайшие к столице районы области, причём сама Москва находится не в его центре, а смещена к юго-востоку. Такой выбор площадей позволяет нам наиболее точно оценить влияние выбора области сравнения на значение интенсивности «острова тепла».

Итак, для каждого из трех вариантов были проведены параллельные расчеты значения интенсивности «острова тепла» для города Москва в ее реальных административных границах. Набор данных при проведении этого анализа составил 99 отдельных снимков с двух спутников за период 2009-2013 год.

Оказалось, что проведённые эксперименты с тремя вариантами границ окружающей столицу территории не выявили заметных смещений оценок. Как можно увидеть в таблице 2.2 при сравнении с

большим прямоугольником $I = 2,8$ °С, с реальной границей области $2,7$ °С, а для маленького прямоугольника снова $2,8$ °С.

Однако, если рассматривать разность этих значений от случая к случаю (табл. 2.3), то можно заметить, что область в реальных границах наиболее средне отображает значение интенсивности «острова тепла».

Табл. 2.3 Значение интенсивности «острова тепла» при учете различных границ области

	Интенсивность "острова тепла". Область сравнения - реальные границы Московской обл. (I_p), °С	Интенсивность "острова тепла". Область сравнения – прямоугольник, вписанный в реальные границы области (I_m), °С	Интенсивность "острова тепла". Область сравнения – прямоугольник, описанный вокруг границ области (I_b), °С
Средние значения за 2009-2013	2,7	2,8	2,8

Различия максимальных значений разницы между административной границей и большим и малым прямоугольниками близко, а разброс значений одинаков (табл. 2.4). С другой стороны, при сравнении параметра I , рассчитанного для большой и маленькой области, мы получаем в среднем нулевое значение, хотя стандартное отклонение максимально, и разброс значений от максимального к минимальному также велик ($4,1$ °С). Это объясняется тем, что эти две области наибольшим образом отличаются друг от друга по своей структуре. При этом большой прямоугольник из-за своей большей площади включает в себя территории, географически отличающиеся друг от друга по климатическим показателям, например, юг Тверской области и север Рязанской.

Табл. 2.4 Разница значений интенсивности при расчетах с использованием различных границ области сравнения

	$I_p - I_b$	$I_p - I_m$	$I_b - I_m$
Среднее значение, °С	-0,1	-0,1	0,0
Стандартное отклонение, °С	0,4	0,4	0,7
Максимальное значение, °С	0,7	1,0	2,5
Минимальное значение, °С	-2,1	-1,0	-1,6

Однако, несмотря на это общие различия все же малы, и в дальнейшей работе для расчета интенсивности поверхностного «острова тепла» в качестве области сравнения было принято использовать большую область сравнения. Такой выбор объясняется несколькими объективными причинами. Во-первых, такая простая геометрическая форма области сравнения более объективна с географической точки зрения (выявление географической зональности). Во-вторых, город Москва в данном случае находится практически в центре области сравнения, что позволяет избежать отклонений при расчете интенсивности поверхностного «острова тепла», связанных с влиянием географической

зональности. Наконец, в область сравнения попадают другие крупные города, такие как Рязань и Тверь, которые позволят в дальнейшем выявить зависимости интенсивности поверхностного «острова тепла» от площади города и численности населения.

В дополнение был проведен численный эксперимент по определению минимальной площади области сравнения, при которой интенсивность поверхностного «острова тепла» принимает устойчивое значение. На примере одной расчетной сетки температуры за 06.05.2015 по данным спутника Terra был произведен расчет температуры поверхности по квадратам, границы которых проходили через каждые 5 км от границы города до расстояния в 60 км, что соответствует проведению границ малой области сравнения (рис. 2.7). Расчет производился в программном обеспечении Microsoft Excel. Далее эти значения сравнивались со средним значением температуры поверхности внутри города, и производился расчет интенсивности поверхностного «острова тепла» для каждого отдельного случая (табл. 2.5).

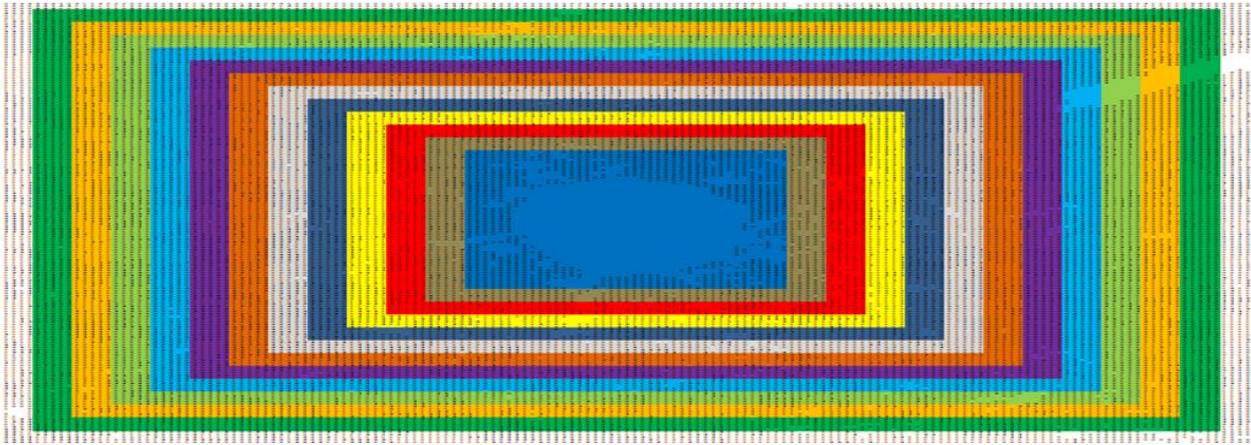


Рис. 2.7 Разбивка расчетной сетки температуры поверхности на квадраты, для определения минимальной площади сравнения. Разными цветами обозначаются квадраты, проведенные через каждые 5 км от границы города.

Данные в таблице 2.5 показывают нам, что до расстояния 45 км от границ города значение интенсивности поверхностного «острова тепла» неустойчиво и меняется от 1,8 °С на расстоянии 5 км от МКАД до 2,7 °С на расстоянии 45 км. При дальнейшем удалении области сравнения от границ города значимых изменений в значении параметра I не наблюдается. Такую зависимость интенсивности поверхностного «острова тепла» от размеров области сравнения можно легко объяснить наличием в ближайшем окружении столицы большого количества крупных пригородов с плотной городской застройкой, создающих свой собственный «остров тепла». При дальнейшем удалении от границ города доля земель с естественным растительным покровом возрастает, что приводит к снижению средней температуры в области сравнения и приближение ее к фоновым значениям.

Таким образом, величина интенсивности обладает устойчивостью в пространстве при удалении от столицы на 45 км и более. Следует отметить, что при подобном анализе, проведенном авторами в [32] на основе расчетной сетки температуры, полученной с другого космического снимка, это расстояние оказалось равным 60 км.

Что касается самой Москвы, то здесь выбор границ расчета температуры поверхности городской среды оказывает значительное влияние на значение параметра I , так как термическая неоднородность поверхности внутри города и его ближайшем окружении выражена сильнее

Табл. 2.5 Значения интенсивности «острова тепла» при разной степени удаленности от города

Расстояние от границы города, км	Температура в области сравнения разной площади, °С	Температура в Москве, °С	Интенсивность острова тепла, °С
5	18,6	20,4	1,8
10	18,4	20,4	1,9
15	18,2	20,4	2,1
20	18,1	20,4	2,3
25	18,0	20,4	2,4
30	17,9	20,4	2,5
35	17,8	20,4	2,6
40	17,7	20,4	2,6
45	17,7	20,4	2,7
50	17,7	20,4	2,7
55	17,7	20,4	2,7
60	17,7	20,4	2,7
~140	17,9	20,4	2,5

2.4 Методические проблемы сравнений спутниковых данных о температуре поверхности с данными наземной метеорологической сети.

Одной из главных задач данной работы стала оценка совместимости радиометрических дистанционных измерений температуры поверхности (T_c) с традиционными контактными измерениями этого показателя с использованием термометров ТМ-3 на метеорологических станциях. Разумеется, нужно учитывать принципиальное различие между точечными стационарными оценками температуры поверхности T_n и данными радиометрических измерений T_c с борта спутников, осреднёнными по большой площади. На рис. 2.8 приведено отображение примерного положения метеорологической станции и квадрата площадью 1 км^2 . На данном примере метеорологическая обсерватория МГУ находится в центре квадрата, однако, в процессе съемки границы квадрата пикселя могут смещаться. Заметим, что территория площадью 1 км^2 имеет неоднородную структуру. В данном случае территория включает в себя лесопарковую зону на северо-востоке, малоэтажную озелененную застройку в центральной части и плотную высотную застройку на юго-западе. Такое разнообразие само по себе создаёт неизбежный разброс при сравнении наземных данных о температуре воздуха и поверхности и космических данных.

Автором проведено сравнение температуры поверхности, измеренной на вскопанной площадке, расположенной на территории метеорологической обсерватории МГУ, и температуры поверхности в

единичном пикселе с координатами, соответствующими положению обсерватории. При этом использовалась часть выборки пригодных для анализа снимков за период 2011-2013 гг. (163 снимка).



Рис. 2.8 Положение метеорологической обсерватории МГУ и отображение возможного положения пикселя (квадрат площадью 1 км²)

Температура поверхности на метеорологической станции МГУ измеряется в сроки наблюдения 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 и 21 час по местному времени Москвы. Для наиболее точного соотнесения результатов двух методов измерения выбирался тот срок наблюдения, который наиболее близок ко времени пролета спутника (пример приведен в табл. 2.6). Иногда, например, 01.06.2011, время пролета спутника Aqua попало ровно между двумя сроками наблюдения. В таком случае, за температуру поверхности по данным наземной метеорологической сети принималось среднее значение между двумя сроками. Это наиболее объективно, так как температура поверхности имеет большую инерционность, и разница между сроками наблюдения достигает нескольких градусов, особенно в дневное время.

Параллельно производилось сравнение T_c с температурой воздуха (T_v), измеренной в метеорологической будке на высоте 2 метра на метеорологической обсерватории МГУ за тот же период времени. При этом учитывались данные стационарного термографа, которые позволяют определить температуру с точность до одного часа. В данном случае сравнение температур производилось в час наиболее близкий к часу пролета спутников, а в случае, когда спутник пролетал в получасовом промежутке между измерениями температуры воздуха, бралось среднее значение между двумя отсчетами. Результаты обоих сравнений приведены на рис. 2.9.

На левом графике отображена зависимость температуры воздуха и температуры поверхности по данным спутника. Можно заметить, что связь между параметрами достаточно высока. Все точки располагаются близко к линии тренда, а коэффициент корреляции достигает значения 0,99. Также мы видим, что сама линия тренда (черная жирная линия на графике) проходит практически ровно под углом 45° по отношению к оси X, что соответствует идеальному совпадению значений. Это подтверждается

коэффициентом линейной регрессии k , значение которого в данном конкретном случае близко к 1 и составляет 1,09.

Табл. 2.6 Время пролет спутника и срок наблюдения

Дата	Время пролета спутника UTM	Московское время пролета	Срок наблюдения
15.02.2011	9:55	12:55	12:00
08.03.2011	8:55	11:55	12:00
09.03.2011	9:10	12:10	12:00
31.03.2011	10:20	13:20	12:00
31.03.2011	8:30	11:30	12:00
01.04.2011	9:15	12:15	12:00
04.04.2011	9:55	12:55	12:00
11.05.2011	10:15	13:15	12:00
12.05.2011	9:10	12:10	12:00
20.05.2011	10:10	13:10	12:00
20.05.2011	8:20	11:20	12:00
23.05.2011	10:40	13:40	15:00
23.05.2011	8:50	11:50	12:00
01.06.2011	10:30	13:30	12:00-15:00
01.06.2011	8:45	11:45	12:00
06.06.2011	10:50	13:50	15:00
06.06.2011	9:00	12:00	12:00
28.07.2011	8:40	11:40	12:00
15.08.2011	8:25	11:25	12:00
18.08.2011	8:55	11:55	12:00
28.08.2011	9:50	12:50	12:00
23.11.2011	9:50	12:50	12:00

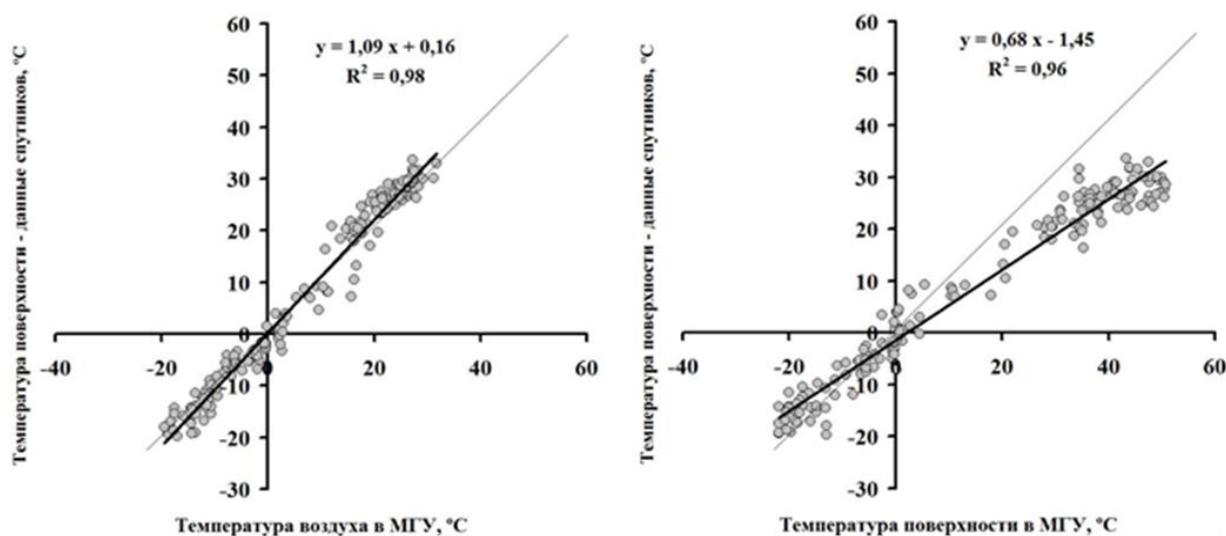


Рис. 2.9 Сравнение радиометрических измерений температуры поверхности с борта спутников со стационарными данными о температуре воздуха (слева) и поверхности (справа) в МО МГУ, в °С. Жирные линии – линейные тренды; тонкие линии – соответствие «один к одному»

Что касается зависимости T_{Π} и T_C , то связь между параметрами достаточно тесная с коэффициентом корреляции 0,98. Однако линия тренда сильно отклоняется от «идеального» положения. Коэффициент линейной регрессии в данном случае, невысок и составляет 0,68. Особенно ярко различия проявляются в области высоких значений температуры. В момент, когда температура поверхности на станции была максимальна и составила 52,4 °С, температура поверхности по данным спутника была намного меньше и составила всего 30 °С. Очевидной причиной этого служит завышение стационарных отсчётов температуры поверхности в тёплое время года вследствие сильного нагрева поверхности открытой почвы на вскопанной площадке размером 4×6 м в около полуденные часы, на которой устанавливаются напочвенные термометры [7]. Рассмотрим сезонные вариации зависимости этих параметров друг от друга (табл. 2.7). Из значения температуры поверхности по данным спутников (T_C) вычиталось поочередно значение температуры воздуха (T_B) или температуры поверхности на вскопанной площадке (T_{Π}). Отрицательное значение разницы обозначает смещение в сторону занижения оценок температуры по данным спутников, а положительные ее завышение. Стандартное отклонение показывает разброс значений разности.

Таблица 2.7 Средние значения и среднеквадратические отклонения разностей температуры поверхности по данным спутников T_C и температуры воздуха T_B и поверхности T_{Π} по стационарным данным МО МГУ в разные сезоны в 2011–2013 гг., в °С.

	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
$T_C - T_B$	$-0,8 \pm 2,1$	$0,8 \pm 3,5$	$2,8 \pm 2,1$	$-0,3 \pm 2,2$	$0,9 \pm 3,0$
$T_C - T_{\Pi}$	$2,1 \pm 3,4$	$-6,2 \pm 7,6$	$-15,0 \pm 5,4$	$-3,4 \pm 3,8$	$-6,5 \pm 8,6$

Из сезонных значений разницы видно, что наибольшие различия и в том, и в другом случае, проявляются именно в летнее время. Если сравнивать T_C и T_B , то в летний сезон, особенно в полуденное время суток, поверхность, имеющая большую теплоемкость, всегда сильнее нагревается, чем воздух. Что касается T_C и T_{Π} , то в летнее время года поверхность вскопанной площадки в среднем на 15 °С теплее, чем средняя поверхность внутри пикселя, который включает в себя температуру более холодных поверхностей естественного травяного покрова и крон деревьев. К тому же существует менее значимая причина отрицательной разницы. При плотном древостое, например, на соседней территории Ботанического сада МГУ, необходимо учитывать смещения в измерениях температуры из-за различной высоты подстилающей поверхности (0 метров) и верхней границы крон (до 10 метров над уровнем поверхности). С учетом термического градиента при нормальной температурной стратификации атмосферы это смещение составляет лишь ~0,1 °С.

Только зимой, когда термометры ТМ-3 установлены на поверхности снежного покрова, их отчеты показательны для окружающей станцию местности, и различия между T_C и T_{Π} наименьшие. Заметим, что район МГУ характеризуется парковыми зонами (Ботанический сад МГУ и пр.) с преобладанием растительных поверхностей. Городская застройка в радиусе 1 км здесь разрежена, и оголенного грунта в

окрестностях МО МГУ также почти нет, кроме только специального обнаженного измерительного участка на территории самой обсерватории – впрочем, небольшого. В результате, вопреки ожиданиям, с температурой поверхности по данным спутников гораздо лучше соотносятся стационарные данные о температуре воздуха, нежели о температуре той же поверхности: средняя по всей выборке разность T_C и T_B составляет менее $1\text{ }^\circ\text{C}$, тогда как значение T_{Π} в среднем за год больше T_C на $6,5\text{ }^\circ\text{C}$. Полученный результат подтверждает, что температура поверхности вскопанных площадок зачастую не показательна и не отражает фоновые условия окружающей станцию местности, особенно в тёплое время года. Заметим, что сходное сравнение значений T_C и T_B в Будапеште показало их разность от $1,1$ до $6,6\text{ }^\circ\text{C}$ днём и от $-1,1$ до $-1,8\text{ }^\circ\text{C}$ ночью в зависимости от времени года [86].

Изложенная выше оценка совместимости различных данных о температуре окружающей среды необходима для решения важных методологических задач расчета интенсивности поверхностного «острова тепла» по данным спутников. Время пролета спутника ограничивается коротким промежутком времени, охватывает всего не более двух часов (с $10:50$ до $12:55$ по местному Московскому времени). Как изложено в [31,36] именно в это время городской «остров тепла» в поле температуры воздуха сглаживается или приобретает значение отрицательной температурной аномалии. Применительно к Москве данное явление изложено в [75].

Не менее значимы отклонения, возникающие из-за наличия спутниковых данных исключительно в антициклональных условиях, когда интенсивность «остров тепла» достигает максимальных значений. В результате этого, мы можем получить завышение среднегодовых оценок I .

С целью решения изложенных выше методологических проблем проводился расчет интенсивности «острова тепла» в Москве по данным наземной метеорологической сети Московского региона за двухлетний период (2014-2015 гг.). Полученные данные сравнивались с данными о поверхностном «острове тепла» за тот же отчетный период. Данный анализ проводился не для сравнения характеристик между собой, а лишь для оценки смещений. Поверхностный «остров тепла» (I_c) и остров тепла в поле температуры приземного слоя воздуха (I_b) – это совершенно разные характеристики, отличающиеся своими физико-географическими свойствами. Значение I_b , рассчитанное по данным метеорологической сети в начале 2010-х гг. составила $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ по данным [32], в то время как I_c оказалась равной $2,6\text{ }^\circ\text{C}$ по данным за период с 2009 по 2013 год. Таким образом, поверхностный «остров тепла» выражен сильнее, нежели «остров тепла» в приземном слое воздуха.

Интенсивность «острова тепла» в поле температуры приземного слоя воздуха рассчитывалась как разница между средней температурой воздуха на всех метеорологических станциях внутри города и всех станциях внутри Московского региона. На территории Москвы и Московской области располагается 17 метеорологических станций, четыре из них - в городе Москва, а остальные 13 в ближайших пригородах области (рис. 2.10). Как можно заметить, распределение станций по территории области неравномерно.

Наибольшая плотность сети наблюдается на западе области, в то время как на востоке и юго-востоке находятся всего 3 метеорологические станции.

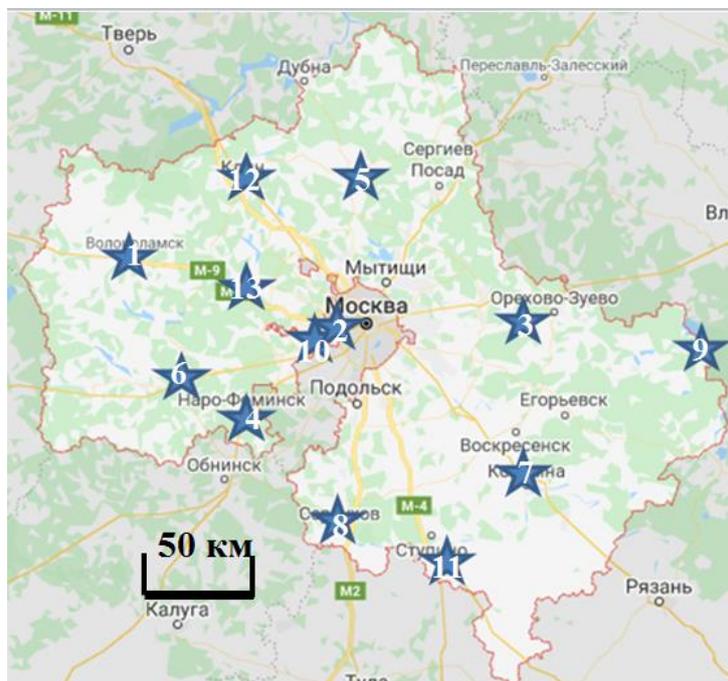


Рис. 2.10 Примерное расположение действующих метеорологических станций на территории Московской области. Цифрами обозначены следующие станции; 1 – Волоколамск; 2 – Немчиновка; 3 – Павловский Посад; 4 – Наро-Фоминск; 5 – Дмитров; 6 – Можайск; 7 – Коломна; 8 – Кашира; 9 – Черусти; 10 – Подмосковная; 11 – Кашира; 12 – Клин; 13 – Ново-Иерусалим.

На территории Москвы плотность стационарных метеорологических станций также мала (рис. 2.11). Всего одна станция приходится практически на 250 км^2 . Внутри такой площади, особенно в пределах города, неоднородность термического поля очень велика, и достоверность оценки пространственной структуры “острова тепла” очень низка



Рис. 2.11 Расположение метеорологических станций внутри Москвы

Еще один недостаток метеорологической сети внутри города Москва заключается в том, что три из четырех станций не вполне отражают городские условия и находятся в парковой зоне (рис.2.12), которая, как будет говориться ниже в главе 3 на несколько градусов холоднее, чем окружающая городская среда

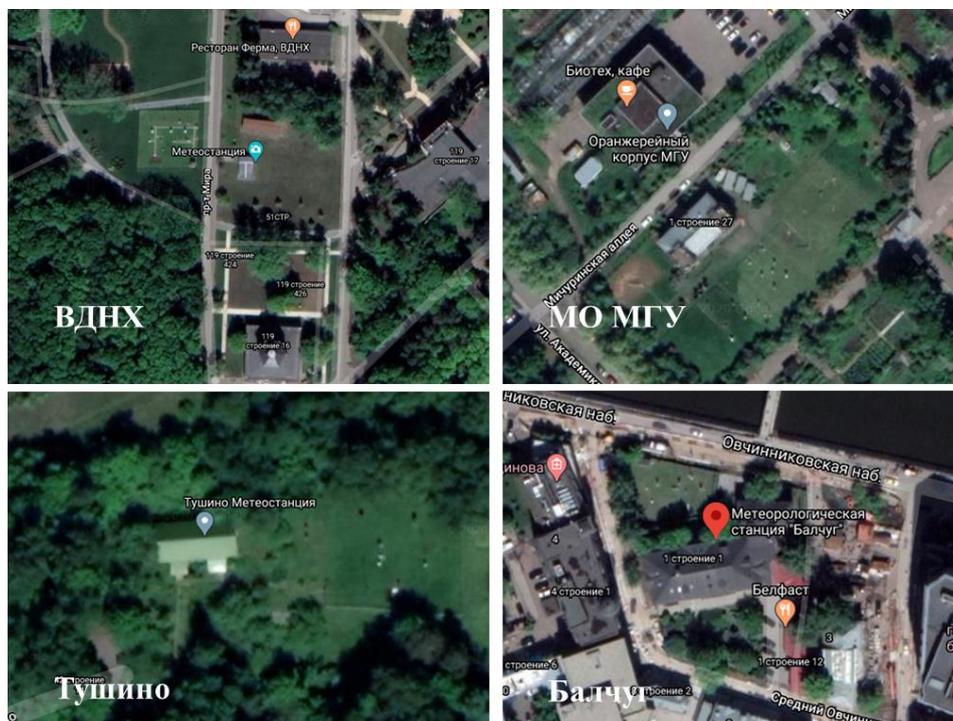


Рис. 2.12 Ближайшее окружение метеорологических станций в Москве. Снимки взяты с сервиса GoogleMap

Месторасположение станции Тушино наиболее всего отличается от городских условий. Во-первых, она находится на границе города приблизительно в 50 м от МКАД, однако в радиусе 100 м нет ни одной крупной постройки. Во-вторых, метеостанция находится практически на берегу Химкинского водохранилища (на расстоянии 50 м). Все это говорит о том, что температура воздуха, измеренная на данной станции, слабо характеризует городскую среду и, как следствие, не позволяет четко выделить параметры городского «острова тепла».

Что касается станции Балчуг, то ее месторасположение наибольшим образом отражает городские условия. Площадка метеостанции - это практически единственный участок с естественным растительным покровом среди плотной городской застройки в центре столицы. Это является одной из причин того, что в условиях благоприятных для образования «острова тепла» температура воздуха на данной станции на несколько градусов выше, чем на других метеостанциях в черте города. Расчет максимальной интенсивности «острова тепла» в Москве по формуле (2) с использованием данных станции Балчуг показал ее превышение над средней интенсивностью (по данным всех Московских станций) в 2 раза. Однако, даже здесь значения температуры могут быть несколько занижены из-за охлаждающего эффекта находящейся в 20 м водной поверхности реки Москвы.

Несмотря на все это, данные метеорологической сети остаются самыми надежными. Они имеют вековые ряды ежедневных измерений температуры воздуха по 8 срокам наблюдения, что позволяет подробно оценить временные характеристики «острова тепла». Наблюдения на метеорологических станциях в Московской области ведутся по сокращенной программе (5 сроков наблюдения).

Анализ отклонений интенсивности поверхностного «острова тепла» (I_c) в момент пролета спутника от среднесуточного значения I_c производился посредством сравнения интенсивности «острова тепла» по данным о температуре воздуха (I_b) в 12 часовой срок наблюдения (наиболее близкий к среднему времени пролета обоих спутников) и среднесуточного значения I_b за период с 2014 по 2015 гг.

Средняя за эти два года I_c в момент пролета спутников составила $2,8\text{ }^\circ\text{C}$. Для расчета показателя I_b среднесуточные значения температуры воздуха (T_b) были получены как среднее между температурой воздуха по 8 срокам наблюдения в городе и 5 срокам наблюдения в области. Средняя за два года (2014-2015) T_b внутри города, составила $7,49\text{ }^\circ\text{C}$. За этот же период средняя температура на 13 Подмосковных станциях составила $6,46\text{ }^\circ\text{C}$. Из этого следует, что интенсивность «острова тепла» как разность средних значений температуры воздуха по городским и сельским станциям, составляет $I_b = 1,03 \pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$. Интенсивность «острова тепла» как разность между средней температурой городских ($9,17\text{ }^\circ\text{C}$) и сельских станций ($8,84\text{ }^\circ\text{C}$) в 12 часовой срок наблюдения составила $0,33\text{ }^\circ\text{C}$.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что доступность данных о температуре поверхности только во время пролета спутника приводит к занижению значений интенсивности. Если предположить, что смещение происходит в том же порядке значений, что и при расчетах по данным наземной сети метеорологических станций, то среднесуточное значение интенсивности поверхностного «острова тепла» должно быть втрое выше и составить примерно $7,5\text{-}8,0\text{ }^\circ\text{C}$.

Выявим теперь закономерности изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» из-за наличия данных о температуре поверхности только в безоблачных или малооблачных условиях, соответствующих антициклональному типу погоды, при котором явление «острова тепла» усиливается. Рассчитаем средние значения температуры воздуха внутри города и области за период 2014-2015 гг. в те дни, в течение которых мы имеем один или несколько пригодных для анализа снимков. За данный период таких снимков оказалось 189, покрывающих 173 дня с учетом повторных. Температура воздуха определялась по данным стационарных термографов в час, наиболее близкий к времени пролета спутника как это излагалось выше при сравнении с данными Метеорологической Обсерватории МГУ. При условии наличия последовательных снимков за один день брался отсчет времени средний между ними. Если же пролет спутника попадался на получасовой интервал между отсчетами температуры воздуха, то учитывалось среднее значение температуры между двумя ближайшими отсчетами.

Средняя температура воздуха во время пролета спутников за два года составила $11,45\text{ }^\circ\text{C}$ в Москве и $10,98\text{ }^\circ\text{C}$ в Подмосковье с точность $\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$. Это означает, что интенсивность приземного «острова тепла» при антициклональных условиях погоды составила $0,47\text{ }^\circ\text{C}$. При сравнении данного показателя со

значением интенсивности полученной в среднем за весь период наблюдения по ежедневным данным в 12 часов дня ($0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$), можно увидеть существенное завышение оценок. То есть влияние антициклонального типа погоды приводит к завышению данных об интенсивности «острова тепла» практически в полтора раза, то есть на 40%. Если, как и в предыдущем случае предположить, то это отношение свойственно также интенсивности поверхностного «острова тепла», то его расчетное среднегодовое значение за тот же период времени должно составить $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Все это подтверждает тот факт, что при анализе поверхностного «острова тепла» по данным спутников мы не можем достоверно говорить о суточном и годовом значениях параметра интенсивности. Однако даже при этих недочетах данные о температуре поверхности показательны и позволяют достоверно определить закономерности пространственной структуры и влияния различных типов поверхности на температурный режим города, что будет описано в данной работе ниже.

2.5 Численные эксперименты по имитации облаков на снимках и их влияние на расчет интенсивности поверхностного «острова тепла».

Еще одной важной методической задачей, поставленной автором, является анализ влияния облачности на значение интенсивности поверхностного «острова тепла». Это является серьезной проблемой работы со спутниковыми данными, так как плотный облачный покров в силу своих физических свойств является непроницаемым для лучей видимой и инфракрасной части электромагнитного спектра. В умеренных и экваториальных широтах, где балл облачности максимален, это является основной проблемой доступности космических данных о температуре поверхности. Так, в Москве средний балл покрытия облаками по данным ежечасных визуальных наблюдений на Метеорологической обсерватории МГУ за период с 1954 по 2007 год составляет 7,7 баллов, что означает покрытие облаками в среднем 77% небосвода [9].

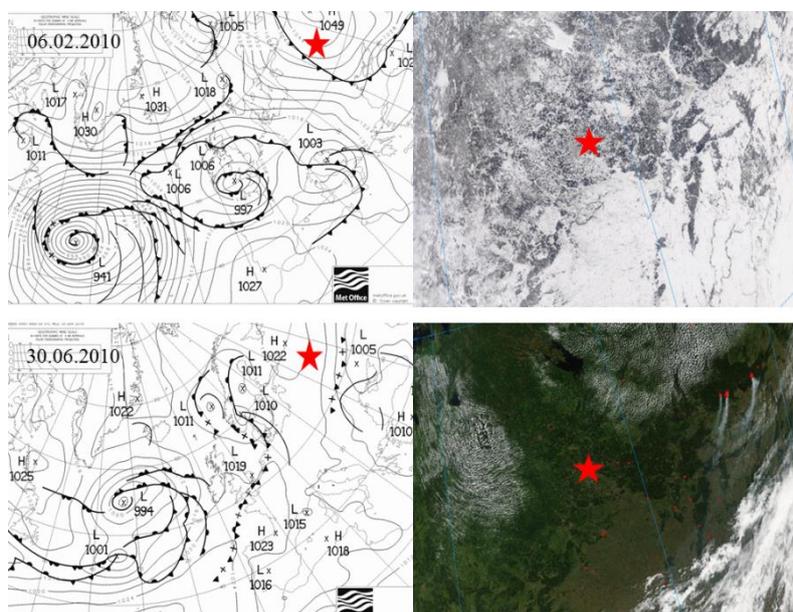
Применительно к космическим данным это выражается в практически полном покрытии снимка облаками, или в случае прохождения через территорию съемки атмосферного фронта части снимка с четкой границей между облачным покровом и ясным небом. На первых этапах работы, например, в [41,74] пригодными считались снимки, на которых при визуальном отборе над территорией Московского региона наблюдались абсолютно безоблачные условия с наличием облачного покрова или шлейфов от ТЭЦ и лесных пожаров не более чем на 5% исследуемой территории. Помимо прочего, критерием причисления снимку статуса «пригодный» являлось положение Москвы примерно в центре полосы съемки, где радиометрические помехи минимальны.

Однако при таком подходе выборка снимков очень мала. Она составляла всего 108 из 3652 возможных за пять лет с 2009 по 2013 гг., то есть всего лишь 3% от общего числа данных. Например, при рассмотрении выборки за 2010 год, когда в летние месяцы над территорией Европейской части России установился блокирующий антициклон, и условия были практически безоблачными, за июль этого года

к пригодным было отнесено только 4 снимка с обоих спутников. Из-за наличия на снимках четко выраженных шлейфов от торфяных пожаров в регионе порядка 15 из них были исключены из выборки. Малый размер выборки приводит к большим пропускам в данных и невозможности построить достоверный годовой ход значений интенсивности поверхностного «острова тепла».

Исходя из всего вышесказанного, было принято решение о расширении выборки за счет снимков с большим покрытием облаками. Для этого требовалось решить важную методическую задачу – определить, при какой доле покрытия облаками анализ «острова тепла» всё еще возможен, то есть смещение оценок интенсивности сравнительно мало.

Для решения этой методической задачи был проведен численный эксперимент с искусственной имитацией облачного покрова. Были выбраны отдельные снимки совершенно ясного неба над Московским регионом при антициклональных условиях, как зимой, так и летом. К ним относятся снимки за следующие даты: для анализа влияния облачности в области сравнения 06.02.10 и 30.06.10, а для эксперимента с территорией Москвы 13.01.09 и 06.06.11. В расчетной матрице температуры поверхности этих снимков почти во всех отдельных ячейках со значениями температуры внутри единичного пикселя имелись достоверные радиометрические данные о температуре поверхности. Сначала для анализа синоптической ситуации были рассмотрены карты погоды для этих дат (рис. 2.13).



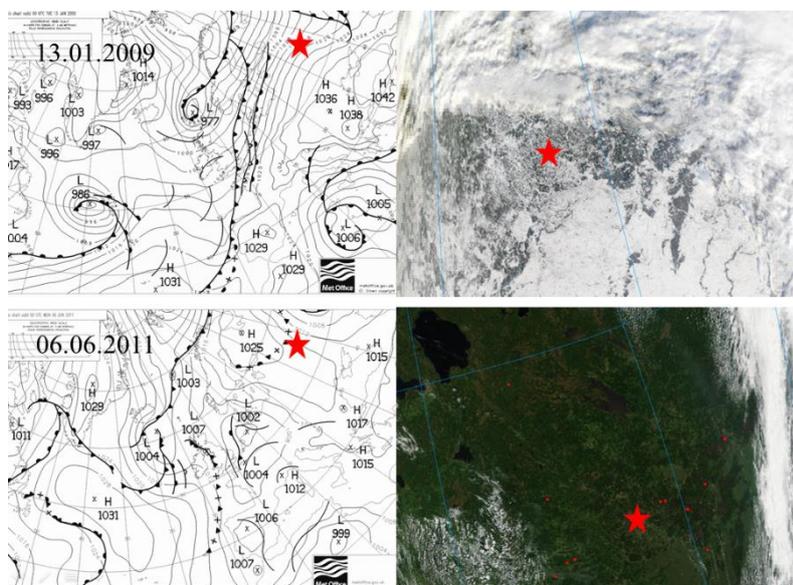


Рис. 2.13 Примеры снимков, выбранных для анализа влияния облачности. Слева изображены синоптические карты, справа фрагмент космического снимка в естественных цветах

Слева на рисунке представлены синоптические карты Европейской территории, предоставленные службой Росгидромета и составленные по данным метеорологической сети в срок наблюдения наиболее близкий к времени пролета спутника (12:00). Справа отображен фрагмент сцены пролета спутника, на котором отображается территория Московского региона. Красными звездочками отмечено примерное положение города Москва. Можно заметить, что практически в каждом из этих случаев, за исключением снимка 13.01.2009 года, когда территория города расположена в зоне высокого градиента давления между циклоном над Скандинавией и мощным антициклоном над Черным морем, Москва находится близко к центру антициклона.

Рис. 2.13 подтверждает, что в выбранные даты на территории Московского региона преобладали антициклональные условия, что означает равномерное распределение температуры по территории региона. Это позволяет провести достоверный численный эксперимент с имитацией облаков. Он заключался в поочередном исключении части значений температуры поверхности с северной, южной, западной и восточной части области. Максимально возможное число таких ячеек в матрице, приблизительно равно площади Московской области в ее административных границах и составляет 45955 без учета ячеек, относящихся к территории города Москва.

Те ячейки, которые исключались из матрицы, как бы играли роль воображаемых облаков, которые могли в это время существовать над регионом. Исключение ячеек производилось поочередно с четырех направлений числом кратным 5%, то есть с каждого края области обрезалось некоторое количество ячеек, число которых в процентном соотношении от общего числа ячеек области равно 5, 10, 15 и так далее до 50 % (рис. 2.14).

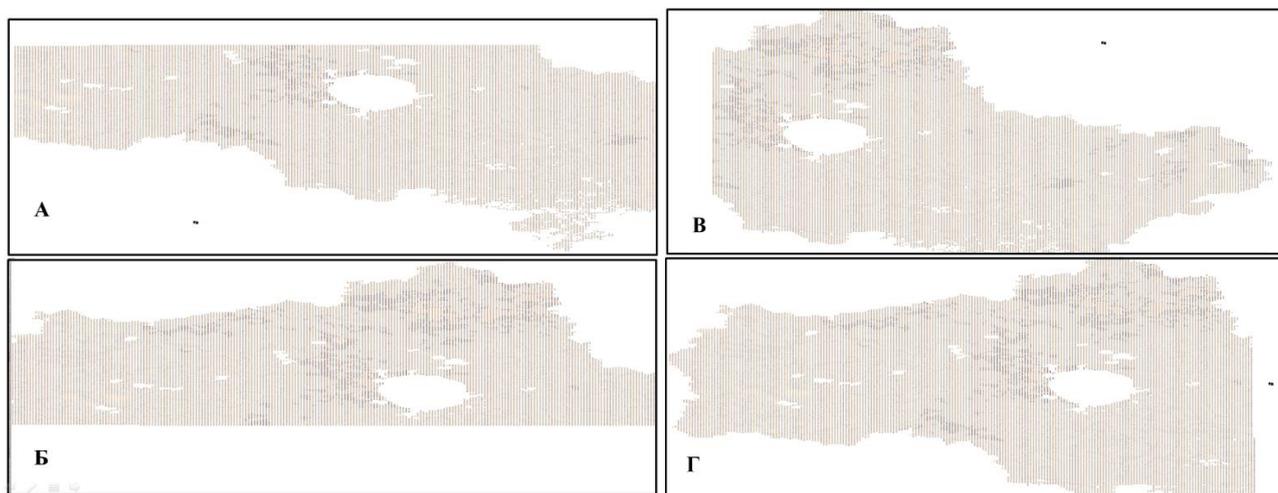


Рис. 2.14 Примеры обрезки значений матрицы температур поверхности в разных направлениях и с разным процентом имитации облаков: А – 20% с севера; Б – 35% с юга; В – 30% с запада и Г – 25% с востока

На каждом этапе после исключения очередных 5% ячеек производился расчет температуры поверхности в оставшейся части области для того, чтоб выяснить в какой мере частичное покрытие снимка облаками приводит к смещению оценок ТС. Затем была рассчитана интенсивность поверхностного «острова тепла» по отношению к средней температуре поверхности в Москве в данный конкретный день (табл. 2.8). Из таблицы видно, что при увеличении установленного процента облачности, интенсивность меняется в различной степени в зависимости от расположения теоретических облаков. Особенно четко прослеживается закономерность в результатах эксперимента с летним снимком.

Табл. 2.8 Расчет интенсивности поверхностного «острова тепла» при исключении части ячеек расчетной матрицы температуры поверхности

Направление исключения	Интенсивность поверхностного "острова тепла" 06.02.2010, °С				Интенсивность поверхностного "острова тепла" 30.06.2010, °С			
	Север	Юг	Запад	Восток	Север	Юг	Запад	Восток
Доля исключенных ячеек								
0	3,6				5,6			
5%	3,4	3,2	3,2	3,4	5,4	5,8	5,4	5,4
10%	3,5	3,2	3,1	3,4	5,3	5,9	5,4	5,4
15%	3,5	3,2	3,0	3,4	5,2	6,0	5,3	5,5
20%	3,6	3,1	3,0	3,3	5,1	6,1	5,2	5,6
25%	3,6	3,1	3,0	3,3	5,0	6,2	5,1	5,8
30%	3,6	3,1	3,0	3,2	4,9	6,2	5,0	5,9
35%	3,6	3,0	3,1	3,2	4,8	6,2	4,9	6,0
40%	3,6	3,0	3,1	3,2	4,7	6,3	4,9	6,1
45%	3,6	3,0	3,2	3,3	4,6	6,3	4,8	6,2
50%	3,7	3,0	3,3	3,3	4,5	6,4	4,7	6,2

Следует отметить, что изначально доля ячеек на отобранных для эксперимента снимках не была 100%. Например, в расчетной матрице зимнего снимка (06.02.2010) после обработки и удаления непригодных ячеек со значением -9999, то есть «нет данных», количество расчетных значений температуры поверхности было всего 44 880, что составляет 97,7% от максимально возможного их числа. Обрезка крайних участков, имитирующих облачный покров, как говорилось ранее, производилась через каждые 5% от имеющегося числа ячеек, то есть составляло при обрезке 5% территории 92,7% от максимально возможного, а при обрезке 50% - 48,8%. Что касается летнего снимка, то изначально количество ячеек с достоверными данными о температуре поверхности было чуть больше и составило 45 374, что составляет 98,7% от максимально возможного их количества.

Для большей наглядности представления результатов и оценки влияния облачного покрова на смещение оценок параметра I была рассчитана разница между интенсивностью в начальных условиях и при удалении части ячеек. На рис. 2.15 изображены графики изменчивости интенсивности поверхностного «острова тепла» в зависимости от доли облачного покрытия в разных частях Московской области на примере зимнего снимка (слева) и летнего (справа).

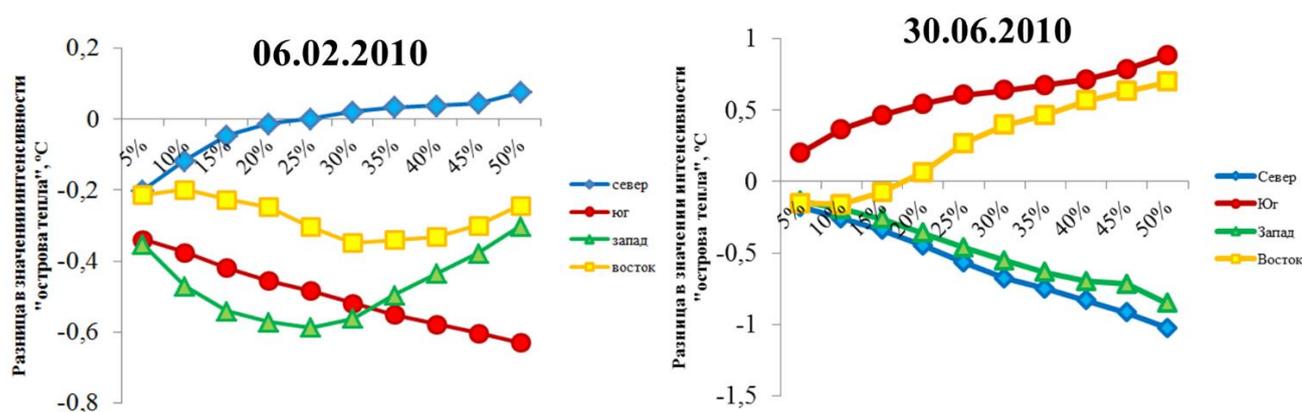


Рис. 2.15 Результаты численных экспериментов с имитацией облаков в разных частях и в разной доле космического снимка.

Наиболее четкую закономерность изменений показывает эксперимент, проведенный на расчетной матрице космического снимка в летний период. При начальных условиях интенсивность, рассчитанная для всей имеющейся площади области, составляла 5,6 °C. В этот день Москва находится близко к центру антициклона, южнее расположился акклюзивный циклон над территорией Центрального-Черноземья.

На графике хорошо прослеживается закономерность увеличения изменчивости этого параметра при увеличении доли облачного покрова, причем хорошо согласующаяся с законами общей географической зональности. Так, например, чем больше площадь Московской области сокращается в северной ее части, тем меньше становится интенсивность «острова тепла». Это вполне ожидаемо, так как мы отрезаем часть ячеек с априори более низкими значениями температуры и сравниваем температуру в городе с более теплыми южными частями области. С другой стороны, если мы убираем

часть южных ячеек, то значение интенсивности начинает расти. Следует обратить внимание на то, что при удалении западных и восточных ячеек, закономерность в изменении интенсивности также четко прослеживается. Причем удаленные западные ячейки оказывают влияние качественно схожее с северными, а восточные – с южными. Действительно, ведь, как известно, географическая зональность в Подмосковье и летом [35], и в среднем за год [6] проявляется в общем повышении температуры воздуха по направлению с северо-запада на юго-восток.

Видно, что при удалении уже 5% южных ячеек влияние облачности сказывается сильнее, чем при удалении других областей влияние которых при таком же проценте удаленных ячеек остается одинаковым. При удалении 5% южных ячеек происходит изменение интенсивности на 0,2 °С в сторону ее увеличения, а при удалении северных, западных и восточных регионов она изменяется на 0,17; 0,14 и 0,15 °С соответственно в сторону уменьшения интенсивности. Примечательно, что удаление первых 15% восточной части территории приводит к уменьшению значений интенсивности, а затем переходит в сторону увеличения. Это, скорее всего, можно объяснить наличием на восточном краю области широкого массива природных лесов (~70%) и заболоченных территорий (~5%), в то время как при приближении к Москве количество зеленых площадей значительно уменьшается (до ~50%), а доля урбанизированных земель, наоборот, увеличивается (~30%), что подтверждается данными модели Land Use Land Cover (рис. 2.16).

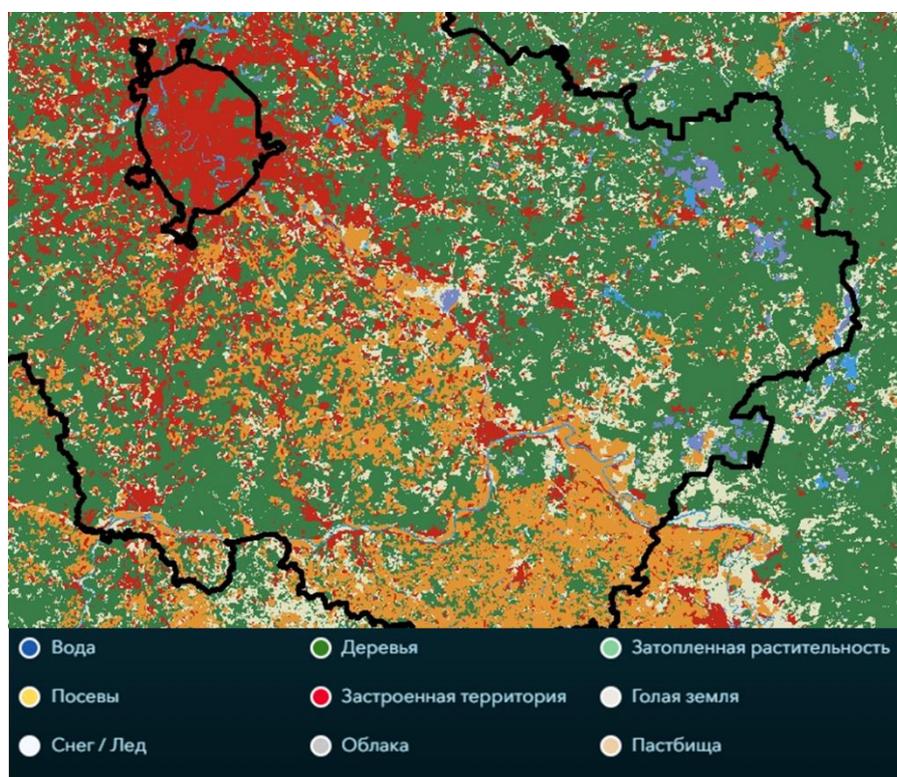


Рис. 2.16 Карта типов землепользования восточной части Московской области [118]

Что касается эксперимента с зимним снимком, то результаты оказались неоднозначны. Начальная интенсивность поверхностного «острова тепла» 06.02.2010 года составила 3,6 °С. Как ни странно, в данном случае наблюдается обратная закономерность в изменчивости интенсивности «острова тепла». При удалении южных ячеек параметр I начинает закономерно уменьшаться, а при удалении северных наоборот увеличиваться. При удалении западных и восточных ячеек закономерных изменений в значении интенсивности не наблюдается. Для объяснения обратимся к синоптической карте в 12-часовой срок наблюдения 06.02.2010 года. Если вернуться к рис. 2.15, то можно заметить, что Москва находится близко к центру антициклона, но в зоне больших градиентных потоков. Над южными регионами Европы образовалась циклоническая серия с явно выраженной системой атмосферных фронтов. В тоже время над территорией Скандинавии существовал достаточно мощный циклон. В этих условиях к западу от Москвы сформировался холодный фронт. Скорее всего, такие синоптические условия привели к изменению знака вариаций на противоположный.

Основной вывод эксперимента заключается в том, что при удалении даже половины площади Московского региона интенсивность «острова тепла» меняется незначительно. Как в зимних, так и в летних условиях значение интенсивности изменялось менее чем на 20% от его величины, то есть менее чем на 1 °С. Если говорить точнее, то в зимних условиях к максимальному изменению значения интенсивности в 0,18 раз привело удаление 50% южной территории области, а в летних условиях 50% северных территорий привело к изменению интенсивности в 0,19 раз.

Аналогичный эксперимент был проведен с исключением части ячеек в пределах традиционных границ Москвы. Как и в предыдущем случае от температурной матрицы города поочередно отсекались территории кратные 5%. В дополнение был произведен анализ влияния наличия индустриальной дымки в центре города на значение интенсивности «острова тепла», то есть в центре города также последовательно удалялись квадраты с площадью кратной 5% от общего количества ячеек (рис. 2.17).

Максимальное количество ячеек в матрице расчета температуры поверхности составило 1002. При этом случаи с полным их заполнением очень редки даже при визуальном отсутствии облачности. Очень часто из-за наличия индустриальной дымки или по причине излишней контрастирующей с фоном радиометрической яркости центра Москвы, при автоматическом расчете температуры поверхности формируются ячейки со значением «нет данных». Такое можно наблюдать на рисунке 2.17 А, Б, В и Г, где в центре города находится несколько пустых ячеек.

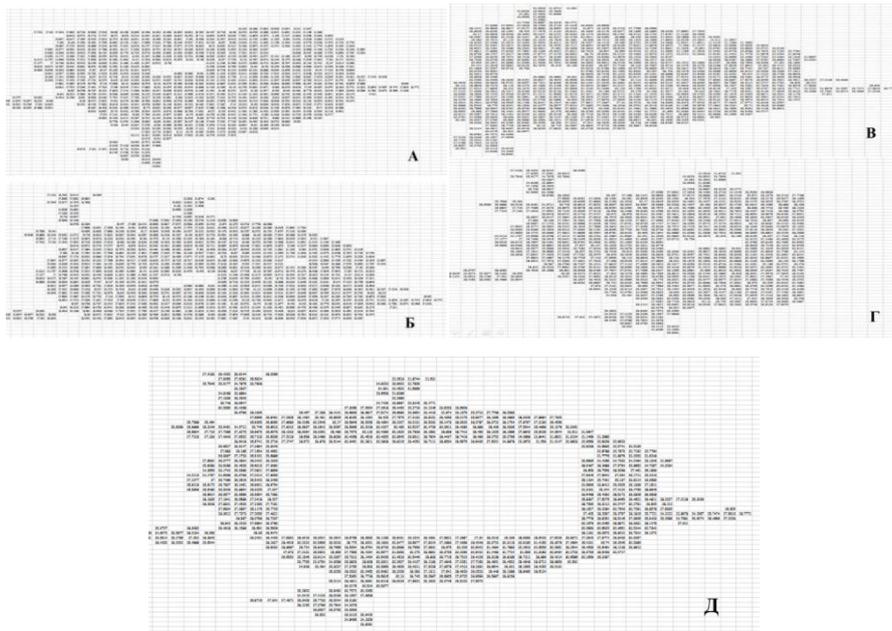


Рис. 2.17 Примеры обрезки значений матрицы температур поверхности города Москва в разных направлениях и с разным процентом имитации облаков: А – 15% с севера; Б – 20% с юга; В – 25% с запада; Г – 30% с востока и Д – 35% в центре столицы

После расчета значений интенсивности для каждого отдельного случая исключения определенной части города мы получили следующую картину (рис. 2.18).

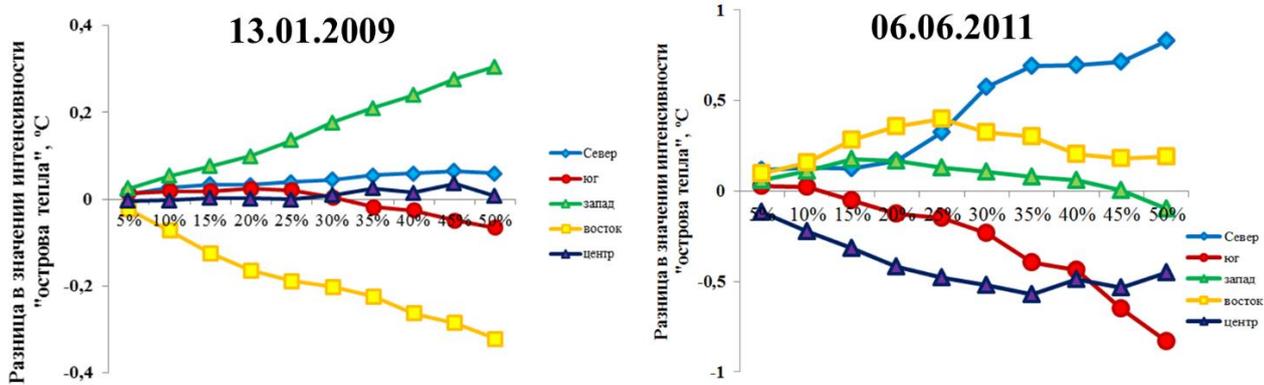


Рис. 2.18 Результаты численных экспериментов с имитацией облаков в разных частях и в разной доле космического снимка, проведенного для территории Москвы.

Итак, 13.01.2011 года город Москва находился в поле действия сильных градиентных потоков, образовавшейся между двумя четко выраженными системами циркуляции атмосферы – это мощный циклон над Скандинавией и устойчивым антициклоном над Черноморским побережьем. Разница в давлении на уровне земли между центрами эти систем составила 65 гПа. С северо-запада к территории Московского региона приближались два, следующих друг за другом, атмосферных фронта (теплый, а затем холодный). На самом космическом снимке, хорошо различим плотный облачный покров к северу от региона. В исходной расчетной матрице температуры поверхности города Москва имелось 983 ячейки.

Это означает, что в начальных условиях облачный покров или индустриальная дымка занимали 2% территории города.

В результате проведенного на примере расчетной матрицы зимнего симка эксперимента выявлена следующая изменчивость I . В данном случае, в отличие от эксперимента с территорией области, в зимнее время удаление частей города с северного и южного направлений, а также в центре практически не повлияло на значение интенсивности «острова тепла» (практически близка к нулю). В зимнее время - это объясняется тем, что поверхность в городе практически однородна, как в центре, так и на его окраинах из-за наличия снежного покрова и отсутствия лиственной растительности. Что касается северного и южного районов столицы, то их удаление приводит к незначительному (изменчивость интенсивности составляет 5,5 и 6,5% при удалении 50% территории города соответственно), но разнонаправленному смещению оценок I .

С другой стороны, можно увидеть закономерное изменение параметра I при удалении западной и восточной части города. Следует отметить, что изменчивость интенсивности при удалении западной и восточной частей города проявляется больше, чем при удалении различных частей области сравнения. В этих двух случаях значение интенсивности изменилось при удалении половины территории города на 27 и 29% соответственно, что практически в два раза больше, чем при имитации облаков над территорией области.

Влияние облачности на западной окраине проявляется в увеличении значения интенсивности, в то время как удаление восточной приводит к снижению теплового влияния города. Так как протяженность города в направлениях с север-юг и с запад-восток невелика (всего 35 и 30 км соответственно) географическая зональность не проявляется. Скорее всего, здесь сказывается влияние синоптической ситуации и преобладающего типа подстилающей поверхности.

В правой части рисунка 2.18 представлены результаты эксперимента для территории Москвы в летнее время. В этот день (06 июня 2011 г.) Москва находилась в зоне северных градиентных потоков между циклоном с центром над Средним Поволжьем и антициклоном над Белым морем, в условиях вхождения прохладной и очень сухой арктической воздушной массы (относительная влажность в МО МГУ в 12 ч составила лишь 29%, а в 18 ч – даже 23%), следствием чего и явилось полное отсутствие облаков. В этот день интенсивность «острова тепла» при начальных условиях составила 4,7 °С.

В летнее время изменения интенсивности «острова тепла» проявляются более значимо, так как именно в летнее время в условиях отсутствия проявления географической зональности на значение параметра I оказывает влияние неоднородность поверхности города. Данное утверждение подтверждается сильными изменениями I при исключении центральной части города. Можно увидеть, что при удалении первых 25% процентов центра города происходит сильный скачок значения интенсивности, затем влияние центральной части ослабевает. Это связано с наибольшей плотностью

застройки в Москве в пределах Третьего Транспортного кольца и особенно внутри Садового кольца, которое является историческим центром города (рис. 2.19а).

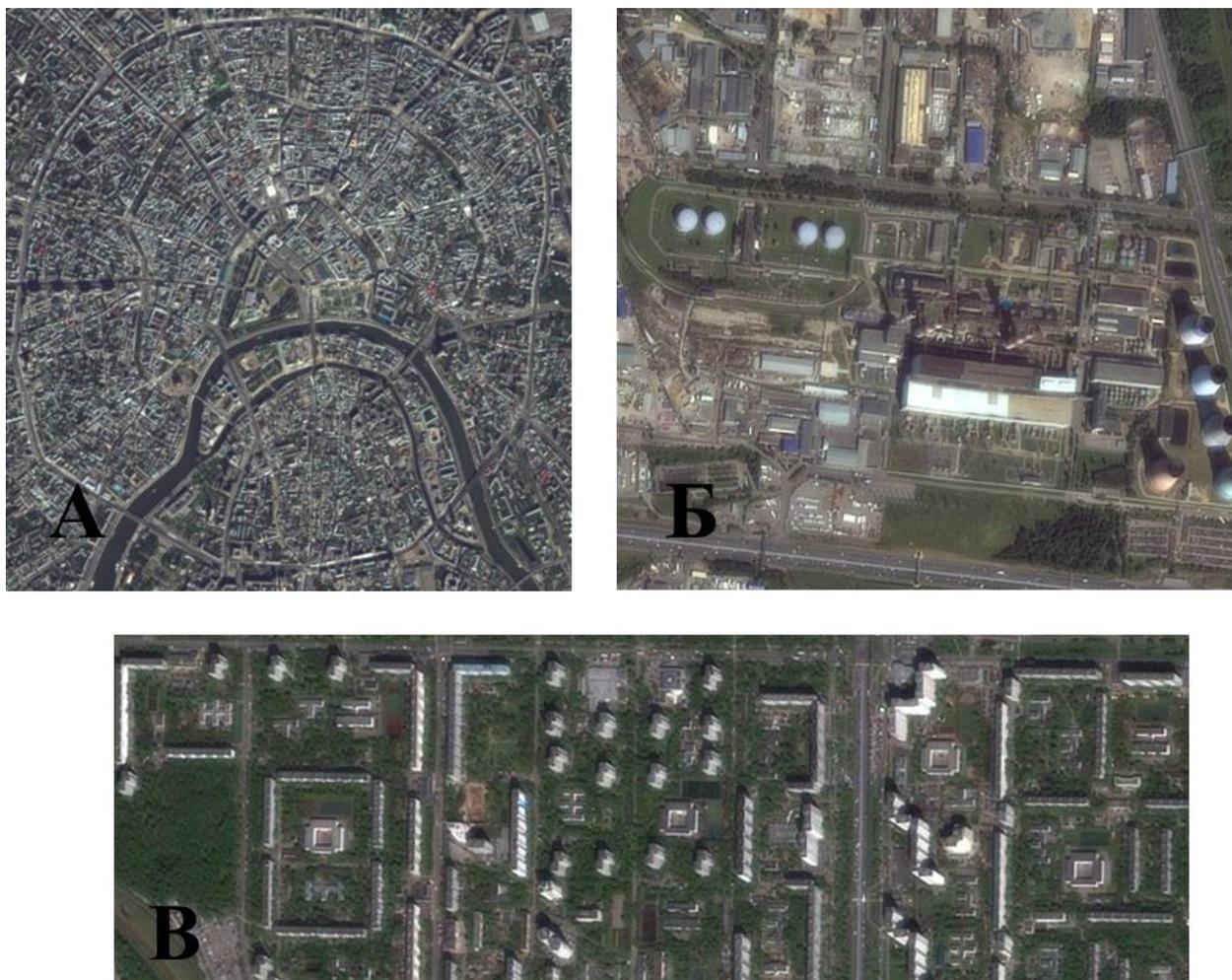


Рис. 2.19 Фрагменты космических снимков различных частей города. А – Застройка в пределах Садового кольца; Б – Промышленная зона на юге Москвы; В – Жилая застройка на севере города. Фото получены с геоинформационного портала kosmosnimki.ru

Противоположное друг другу влияние оказывают удаление северной и южной части города. При удалении северных территорий интенсивность «острова тепла» увеличивается с $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в начальных условиях до $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при удалении 50% территории. Исключение ячеек южного направления приводит к противоположному эффекту уменьшения интенсивности «острова тепла» до $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причем удаление первых 10 % территории не приводило к изменениям в интенсивности, но резко увеличилось при исключении от 40 до 50% территории. Для определения причины необходимо обратиться к генеральному плану функциональных зон Москвы (рис. 2.20). Итак, южные районы города имеют более плотную жилую застройку, а также большое количество промышленных территорий, состоящий преимущественно из малоэтажных, но крупно площадных зданий с преобладанием бетонного типа покрытия (рис. 2.19б). Доля парковых зон в общей площади района меньше (9,9%), чем на севере (15,1%).

Кроме того, северная часть города, согласно генплану, отведена преимущественно под средне этажную жилую застройку (рис. 2.19в).

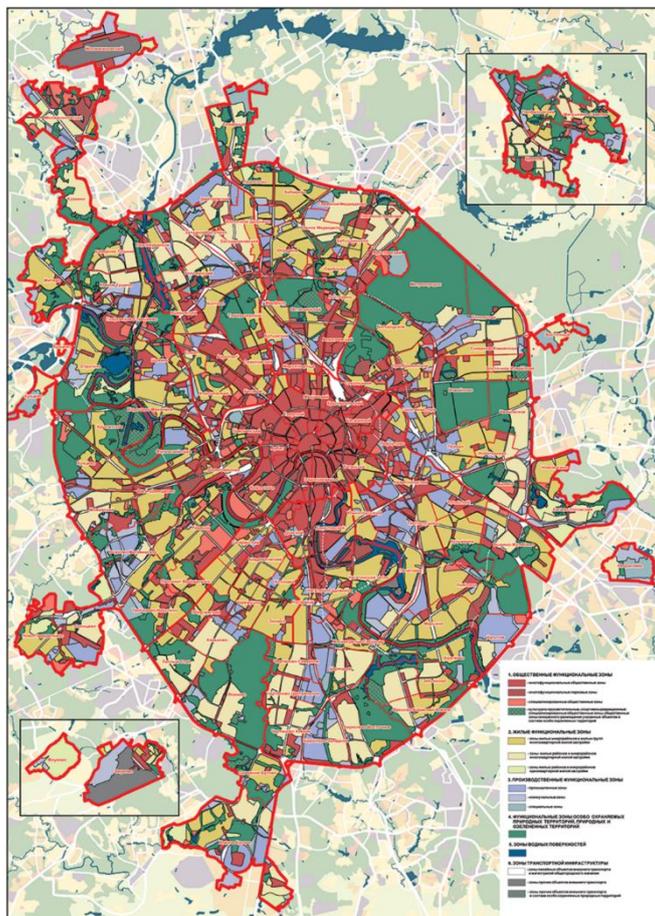


Рис. 2.20 Генеральный план застройки г. Москвы [82]

Что касается западной и восточной частей города, то они оказывают сходное друг с другом влияние. При удалении первых 25% территории происходит усиление интенсивности, а далее ослабление. Такой ход графика можно объяснить наличием на западных и восточных окраинах города примерно одинакового количества парковых зон, температура поверхности которых холоднее. При приближении к центру города доля зеленых насаждений становится меньше, а плотность застройки возрастает, что и приводит к стабилизации значений интенсивности.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что термическая неоднородность внутри города выше, нежели чем внутри области сравнения, где основным фактором влияния остается все же географическая зональность. Также наличие облачного покрова внутри города приводит к более сильному изменению интенсивность «острова тепла». По результатам эксперимента с имитацией облаков на зимнем снимке максимальное изменение этого параметра было достигнуто при удалении 50% восточной части города и составило 29% от первоначального его значения. Облачность на летних

снимках приводит к наибольшим изменениям в 17,7% при удалении 50% северной или южной территории города.

По результатам проведённых экспериментов было решено считать пригодными для анализа все космические снимки с отсутствием явных радиометрических помех, нахождением Москвы в центре полосы съёмки и покрытием облаками не более 20% площади Москвы и не более 50% площади Подмосковья.

Результатом данного эксперимента стало расширение выборки снимков. После контроля и проверки на соответствие критериям отбора в основную выборку, вошло 1378 снимка, что составляет всего 8,9 % от максимально возможного их количества (15342).

Следует упомянуть еще одну тонкость в работе со снимками спутников Terra и Aqua. Зачастую мы имеем два отдельных снимка, выполненных в один и тот же день с разницей в 1 ч. 50 мин. Остается вопрос, рассматривать эти снимки как отдельные случаи фиксирования явления «острова тепла», или как среднее из двух случаев? Хотелось бы отметить, что иногда интенсивность между снимками за один и тот же день может значительно отличаться. Среднее значение разницы между I по данным разных спутников составляет примерно $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при стандартном отклонении $\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальное ее значение достигает $3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако однозначно сказать какой из спутников дает завышенное значение не удастся, так как разница всегда имеет различный знак. Единственное, о чем с уверенностью можно говорить, это о том, что в большинстве случаев по результат съёмки спутником Aqua средняя температура поверхности выше, чем по космическим снимкам Terra, что вполне логично с учетом его более позднего пролета, приближающегося к обеденным часам, когда при нормальных условиях температура воздуха и поверхности максимальна.

Было принято решение учитывать не отдельные значения интенсивности «острова тепла», а среднее значение при наличии двух снимков, произведенных за один и тот же день. Для каждого из дней значение I принимались либо по данным снимка одного спутника (если второй не отвечал принятым критериям), либо в виде средних значений по двум снимкам, если оба были хорошего качества. После всех расчетов автор получил 931 осредненное «среднесуточное» значение параметра.

2.6 Общая характеристика поверхностного «острова тепла» Москвы, закономерности годового и суточного хода его интенсивности.

После рассмотрения методической части работы приступим к основным ее результатам. Как говорилось выше, в главе 1.3, под интенсивностью поверхностного «острова тепла» в Москве мы понимаем разницу средних значений температуры поверхности по данным спутникового зондирования Земли внутри традиционных границ города и в области сравнения, представленной в виде описанного вокруг Московской области прямоугольника площадью 94851 км^2 .

Среднее из всех имеющихся значений интенсивности по данным отдельных снимков составляет 2,6 °С при стандартном отклонении $\sigma = \pm 1,5$ °С. Если же рассчитывать этот параметр по «среднесуточным» значениям, то оно остается неизменным (2,6 °С) правда при чуть меньшем значении стандартного отклонения $\sigma = \pm 1,4$ °С.

В дальнейшем все значения были разбиты по месяцам. Это позволило рассчитать среднемесячные значения интенсивности поверхностного «острова тепла». Из-за того, что снимки распределены по месяцам неравномерно (например, в марте их число равняется 116, в то время как в ноябре всего 46) было принято решение рассчитать среднее значение интенсивности, нормализуя его на годовой ход, то есть как среднее из 12 среднемесячных значений, где каждому месяцу присваивается одинаковый вес в общей среднегодовой оценке. В результате оказалось, что это значение осталось неизменным и составляет также 2,6 °С при среднемесячных значения σ изменяющихся в пределах от 0,9 в июне, июле, сентябре и октябре до 1,6 в апреле. Причем в процессе расширения выборки, это значение оставалось стабильным, о чем рассказывается в [32].

В отдельные дни интенсивность поверхностного «острова тепла» меняется в широких пределах от -3,2 до +7,7 °С. Однако, иногда при осреднении данных двух снимков минимальные значения могут сглаживаться. Об этом говорит количество зафиксированных случаев отрицательного значения интенсивности. При полной выборке снимков такие обстоятельства наблюдаются 39 раз, а при расчете «среднесуточных» значений обнаружен всего 21 день, когда интенсивности поверхностного «острова тепла» в среднем была отрицательной. Все эти дни наблюдаются в осенне-весеннее время: 3 в марте (22.03.2012, 18.03.2018 и 16.03.2020 года), два в апреле 2020 года, 4 в сентябре, 6 в октябре, 5 в ноябре и 1 в декабре. Еще в течение шести дней интенсивность «острова тепла» была слабоположительной (попадала в диапазон от 0 до 0,1 °С).

На рис. 2.21 отображена гистограмма распределения значений интенсивности по отдельным снимкам (справа) и для «среднесуточных» значений (слева). Можно заметить, что распределение значений близко к нормальному, с максимум в области от 2,3 до 2,9 °С. Основная масса значений попадает в диапазон от 0,4 до 4,4 °С. Интенсивность поверхностного «острова тепла» крайне редко бывает больше 6 °С и меньше 0 °С.

Максимальные значения интенсивности, напротив, наблюдаются во все сезоны года. Рекордное значение в 7,7 °С было достигнуто 16 апреля 2013 года, в то время как второе по величине (6,5 °С) 31 мая 2016 года, а на третьем месте расположилась интенсивность со значением 6,2 °С 19 января 2010 года. Но следует отметить, что даже в первых 80 снимках-лидерах по значению I нет ни одного осеннего.

Основной причиной таких различий служит синоптическая обстановка, сложившаяся в течение того или иного дня. Все случаи аномально сильного поверхностного «острова тепла» были связаны с расположением Москвы в центре антициклона или отрога, вблизи оси гребня или в малоградиентном барическом поле с высоким фоном атмосферного давления. Наименьшая же I присуща очень ветреным

осенним дням при нахождении столицы в зонах интенсивных градиентных потоков на периферии антициклонов или гребней. Еще одной причиной и завышенных, и заниженных значений может послужить неравномерное покрытие территории снегом в осенне-весенний период.



Рис. 2.21 Гистограмма распределения значений интенсивности поверхностного «острова тепла» в Москве. Слева – рассчитанная по «среднесуточным» значениям, справа – по отдельным снимкам

Большой временной охват спутников (более 20 лет) позволяет нам достоверно оценить годовой ход интенсивности поверхностного “острова тепла”. Каждый из месяцев в достаточной мере обеспечен космическими снимками (табл. 2.9). Наибольшее количество снимков наблюдается в мае, в то время как наименьшее в июне. Это связано с тем, что в последние несколько лет июнь отличается сильными условиями облачности. Так, например, в июне 2017 года не оказалось ни одного пригодного для анализа снимка, а в 2020 – всего 2 за один и тот же день. Также наименьшей обеспеченностью снимками обладает ноябрь и декабрь, так как в среднем за многолетний период эти месяцы обладают наибольшим баллом облачности.

Табл. 2.9 Количество пригодных для анализа снимков в различные месяцы года за период 2000-2018 гг.

месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
Количество пригодных для анализа снимков	115	162	165	95	166	71
месяц	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Количество пригодных для анализа снимков	86	131	145	92	72	74

На рисунке 2.22 приведены графики количества снимков, отобранных за определенный месяцы в период с 2000 по 2020 гг. и среднего балла облачности в этот месяц по данным сайта «Климат Москвы»

[ссылка на сайт климат Москвы]. Как можно увидеть, в летние и весенние месяцы года (март-август) зависимости между графиками нет, что подтверждается рассчитанным коэффициентом корреляции (0,17). Скорее всего, именно в эти месяцы на количество пригодных снимков оказывает влияние более частое положение Москвы на краю полосы съемки и наличие индустриальной дымки над городом. С другой стороны, при соотнесении количества снимков и балла облачности в осенне-зимние месяцы года (сентябрь-февраль) выявлена достаточно тесная зависимость с коэффициентом корреляции 0,76. Это объясняется тем, что в осеннее время года, при максимальном значении балла облачности, именно он оказывает влияние на количество отображенных снимков.

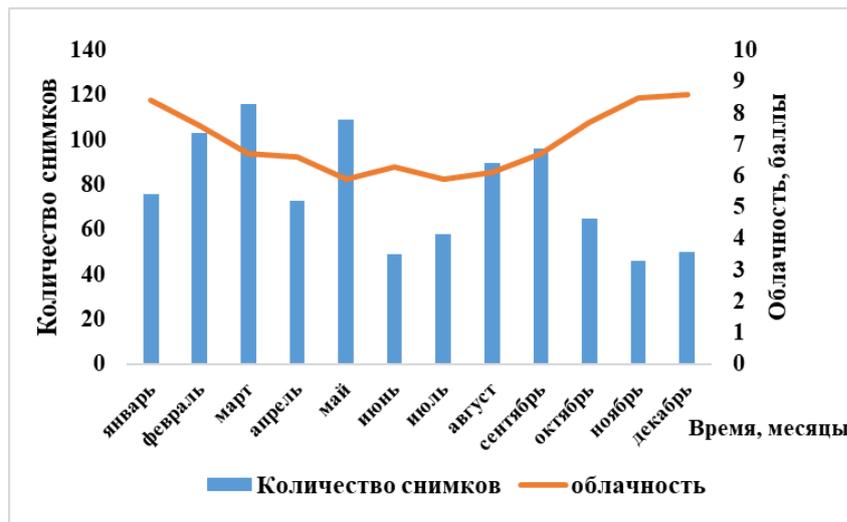


Рис. 2.22 Зависимость количества снимков в выборке за отдельные месяцы года и средний балл облачности

Вернемся к расчетам параметра I . Сначала следует остановиться на его средне сезонных различиях (табл. 2.10). Они рассчитаны как средние из всех дней со снимками, за тот или иной календарный сезон года. В классической литературе бытует мнение о том, что остров тепла в поле температуры приземного слоя воздуха лучше проявляется именно в зимнее время из-за наибольшего вклада непосредственного влияния источников тепла. Как мы можем увидеть в таблице, в нашем случае это утверждение не подтвердилось. Различия между зимним и весенним значениями незначительны. Однако, среди сезонов явно выделяются два – это лето с максимальным значением и осень с абсолютным минимумом даже с учетом значения стандартного отклонения. Для выявления причин такого распределения давайте рассмотрим график годового хода среднемесячных значений интенсивности поверхностного «острова тепла» (рис. 2.23).

На графике можно увидеть четко выраженный годовой ход среднемесячных значений интенсивности поверхностного «острова тепла». Максимальное его значение наблюдается в июне и составляет $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а минимум в октябрь со значением интенсивности $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зимние и весенние месяцы, как было отмечено ранее, значение интенсивности остается неизменным и держится вблизи значения 3

°С. Доверительные интервалы, построенные с 5% уровнем значимости, показывают, что все различия статистически достоверны как между условиями июня и июля, так и между зимними и весенними, и осенними месяцами.

Табл. 2.10 Средние сезонные значения интенсивности поверхностного «острова тепла» и значения стандартного отклонения

Сезон года	Зима	Весна	Лето	Осень
Интенсивность поверхностного «острова тепла», °С	2,9 ±1,2	2,7 ±1,2	3,6 ± 1,1	1,2 ±1,0

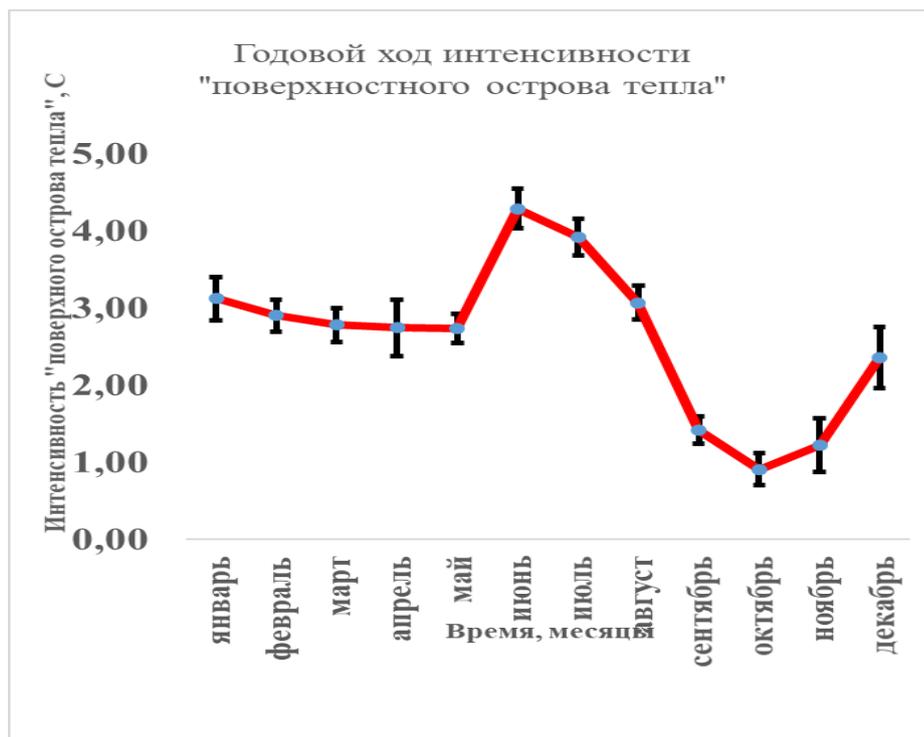


Рис. 2.23 Годовой ход интенсивности поверхностного «острова тепла». Доверительные интервалы построены со значением доверительной вероятности 0,95

Хотелось бы отметить, что различия между летними и осенними месяцами остаются статистически значимыми при любом более высоком уровне значимости, даже при доверительной вероятности 0,999 (рис. 2.24). Очевидно, что различия в интенсивности поверхностного острова тепла создаются контрастом термических и радиационных свойств поверхности в городе и за его пределами, а также свойства растительного покрова. Скорее всего именно по этой причине наибольшая интенсивность наблюдается в середине лета, когда растительность находится в активной фазе вегетации и, следовательно, характеризуется наибольшими затратами тепла на транспирацию в сельской местности (в городе растений меньше). Плюс ко всему, именно в летнее время искусственное городское покрытие является наибольшим аккумулятором тепловой энергии, что и вызывает различия между городской средой и пригородной сельской местностью с открытым растительным покровом.

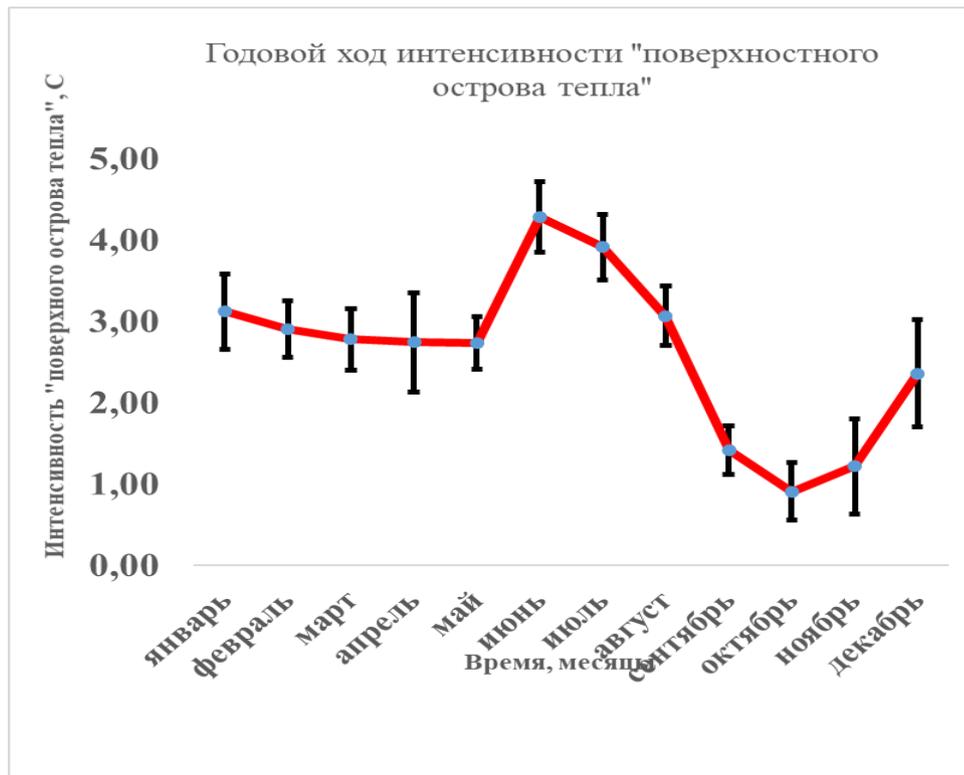


Рис. 2.24 Годовой ход среднемесячные значений интенсивности поверхностного «острова тепла». Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 0,999

Судя по всему, летний максимум поверхностного «острова тепла» - это не случайность, так как он выявлен и для других городов мира, например, для Будапешта [86].

С другой стороны, осенью различия в термических свойствах поверхности сходят на нет по мере отмирания растительного покрова. Отрицательные значения интенсивности, возникающие в сентябре и октябре, могут быть связаны с процессом увеличения срока вегетации растительного покрова в городах. Это означает, что в начале осени в сельской местности растительность уже остановила свою фотосинтетическую активность, а в городе из-за более высоких температур этот процесс продолжается еще несколько недель. Из-за большого количества осадков почва в сельской местности приобретает большее значение теплоемкости, в то время как мокрое асфальтовое покрытие, наоборот отражает большую часть и без того слабой солнечной радиации [46].

В зимние и весенние месяцы условия считаются промежуточными, так как на всей территории региона устанавливается снежный покров, а влияние растительности не проявляется. Однако, все же, «остров тепла» проявляется с достаточно высоким значением интенсивности. Это объясняется тем, что в сельской местности снежный покров сплошной и чистый с высоким значением альбедо, в то время как в городе производится его очистка на дорогах, тротуарах, а его поверхность, там, где он сохраняется, сильно загрязнена. Кроме того, в весеннее время в городе раньше начинают образовываться проталины. Также немало важным, особенно в зимнее время, остается вклад антропогенных источников тепла. При отоплении зданий стены с уличной стороны прогреваются, приводя к увеличению температуры

поверхности городской застройки. После начала вегетации растений происходит резкий скачок интенсивности от весенних к летним месяцам.

Заметим, что вопрос о годовом ходе интенсивности приземного «острова тепла» по данным метеорологических наблюдений в Москве непросто и неоднозначен, поскольку разные факторы действуют разнонаправленно. Так, в поле температуры приземного слоя воздуха влияние городского отопления и связанных с ним выбросов тепла может быть явной причиной усиления острова тепла зимой. С другой стороны, летом значительно чаще отмечаются ясные ночи и застои воздуха, приводящие к усилению этого явления. Разные работы, анализирующие годовой ход интенсивности «острова тепла» в Москве за разные периоды показывают разнонаправленные сезонные значения. Например, в работе [5] и [73] за 1977–1988 гг. и 1991–2002 гг. соответственно выявлен максимум в зимнее время, а в период с 1959 по 1987 гг. в работе [39] максимум интенсивности проявился в летнее время. Такие же выводы были сделаны в работах [5,69] с конца 1990-х гг. и по настоящий момент времени. Таким образом, годовой ход интенсивности приземного «острова тепла» в столице существенно менялся за последние десятилетия.

Подобных исследований, касающихся поверхностных «островов тепла» по данным спутников очень мало. В работе [78] произведен анализ интенсивности «островов тепла» в городах Западной Сибири. Для различных территорий ее значения изменяются от 1 до 2 °С. При этом явных сезонных различий не обнаружено. В [69] и [94] приведены оценки средней разности лишь между зонами плотной городской застройки и сельской местности вне города: около 4 °С в Бангкоке и 4,3 °С ночью в Афинах (днём, напротив, городская застройка там холоднее ~ на 1 °С). В Эрбиле (Ирак) в сухом сезоне город в целом, напротив, создает «остров холода»: температура городской поверхности приблизительно на 4 °С ниже, чем окружающей его пустыни [91].

2.7 Многолетние изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» Москвы за последние 20 лет и их связь с современными изменениями климата.

В условиях глобального потепления интересным остается вопрос, происходит ли усиление «острова тепла» в городах с неизменной плотностью застройки за последние несколько лет. Если не учитывать добавленные в 2011 году территории «Новой Москвы», внутри традиционных границ города плотность застройки остается практически неизменной [106]. Исходя из этого, рассмотрим изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» с течением времени. Для этих целей были рассчитаны среднегодовые значения I с 2000 по 2020 гг. При расчете среднегодовых значений автор столкнулся с одной существенной проблемой. Из-за наличия плотного облачного покрова в отдельные месяцы, за некоторые из них не было выявлено ни одного пригодного для анализа снимка. В табл. 2.11 приведено количество снимков в отдельные месяцы различных лет. Наименее обеспеченным космическими снимками оказался 2017 год известный своим холодным и дождливым летом, в то время как максимальное количество снимков было отобрано за 2018 год. В течение 13 лет из 21 выявлено

отсутствие снимков за некоторые месяцы. Для того, чтобы избежать ошибок, было принято решение рассчитать среднегодовые значения как среднее из четырех средних сезонных (зима, весна, лето и осень).

Табл. 2.11 Количество снимков в отдельные месяцы разных лет

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Всего
2000*	-	1	2	2	6	3	2	-	5	5	3	-	29
2001*	5	7	4	1	4	-	2	2	10	2	-	8	45
2002	1	2	5	5	8	2	11	9	10	2	3	17	75
2003	6	8	12	1	7	-	6	-	12	3	1	2	58
2004	1	7	4	6	-	-	-	4	6	3	8	1	40
2005	2	13	3	12	3	2	5	11	4	24	9	1	89
2006	7	20	15	3	6	2	4	2	15	-	-	1	75
2007	6	17	13	1	9	4	1	12	16	1	2	3	85
2008	7	3	3	7	4	1	4	4	7	2	9	4	55
2009	6	10	6	3	14	2	1	5	7	3	1	8	66
2010	12	7	7	6	4	11	14	2	2	10	-	2	77
2011	4	5	9	4	13	10	6	9	2	4	2	-	68
2012	14	7	13	3	8	4	6	6	-	-	-	-	61
2013	2	6	7	5	6	1	-	6	-	4	2	2	41
2014	17	6	6	9	14	6	12	1	10	6	3	3	93
2015	7	10	18	6	13	7	5	16	8	2	2	2	96
2016	7	4	7	1	3	1	5	5	-	3	5	5	46
2017	1	-	2	3	3	-	-	8	6	-	2	-	25
2018	2	13	12	3	26	4	2	18	15	9	13	2	119
2019	8	6	7	10	8	9	-	9	5	3	5	-	70
2020	-	10	10	4	7	2	-	2	5	6	2	13	61

* В годы, помеченные звездочкой снимки получены только со спутника TERRA, так как AQUA еще не был запущен.

На рис. 2.25 представлено изменение среднегодовых значений интенсивности «острова тепла» за период с 2000 по 2020 гг. На графике можно увидеть две кривые, одна из которых описывает I как среднее из средних сезонных значений (черная линия с кружками) имеет плавный ход. Однако в ряду данные имеются пробелы. Это 2012 год, в течении которого не оказалось ни одного пригодного для анализа снимка в осенний период и 2017 год, где за зимний период было получено лишь одно непоказательное (слишком низкое 0,4 °C) значение параметра, а также ни одного снимка в течение июля и июня, когда интенсивность поверхностного «острова тепла» максимальна. Вторая кривая (линия с белыми квадратами) описывает скользящие средние с шагом 5 лет.

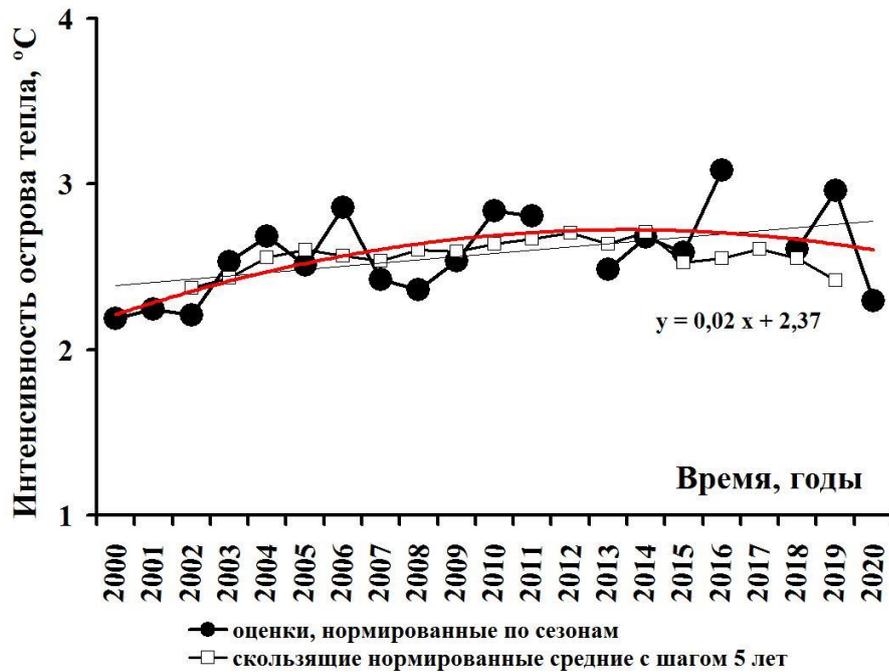


Рис. 2.25 Изменение интенсивности поверхностного «острова тепла» во времени

Что касается изменений «острова тепла» со временем, то можно заметить, что функция описывается слабоположительным, но статистически незначимым линейным трендом. Это говорит об отсутствии каких-либо изменений за последние 20 лет. Однако, изменения 1 год от года сложны и могут быть описаны степенным трендом. Параболический тренд подходит для этого наилучшим образом, ведь увеличении степени функции приводит к полному совпадению с параболическим. Линия тренда 2-ой степени показывает, что за последние 20 лет интенсивность поверхностного «острова тепла» Москвы менялась следующим образом: устойчивый рост 1 вплоть до 2006 г. сменился затем стабилизацией значений в середине периода, а в последние годы наметилась противоположная тенденция к его ослаблению.

В рамках работы были рассмотрены изменения средней температуры поверхности в Москве и Московской области (рис. 2.26). Как можно увидеть на графике, значения средней температуры поверхности год от года сильно меняются в силу межгодовой изменчивости погодных условий. Обе функции описаны слабоположительным линейным трендом, что показывает очень медленную тенденцию к общему потеплению поверхности. Следует отметить, что потепление происходит практически с одинаковой скоростью как на территории города, так и в сельской местности.

2.8 Влияние карантина из-за пандемии коронавируса в 2020 году на поверхностный «остров тепла» Москвы.

В начале 2020 года по всему миру быстро распространилось вирусное заболевание под названием COVID-19. Его быстрое распространение и множество жертв повлияли в том числе и на экономическую ситуацию во многих странах. Правительство большинства государств было вынуждено ввести

карантинные меры и остановить работу многих промышленных предприятий. В Российской Федерации с 30 марта по начало июня были введены меры самоизоляции людей. Соответственно в этот период произошло резкое уменьшение количества автомобильного транспорта, промышленность остановилась, а теплоэнергетика снизила производительность. Все это привело к значительному снижению загрязнения атмосферного воздуха, например, в Москве, в восьми городах Пакистана [49], а также в небольших городах ближнего Востока [61].



Рис. 2.26 Изменение температуры поверхности в Москве и Московском регионе 2000-2020 гг.

Интересен и тот факт, что влияние карантина привело к ослаблению городских «островов тепла» в поле температуры приземного слоя воздуха. Москва не стала исключением [72]. Возможной причиной такого уменьшения температурного влияния городской среды может послужить как непосредственное снижение прямых антропогенных выбросов тепла, так и изменение радиационного баланса городской среды из-за снижения влияния городской дымки.

Нам уже известно, что «остров тепла» в поле температуры приземного слоя воздуха и поверхности – это совершенно разные явления, возникающие по разным физическим причинам. Давайте попробуем разобраться как же повлиял карантин на изменение поверхностного «острова тепла» в различных городах мира и Москве в том числе.

При анализе публикаций на эту тему мы заметили значительные расхождения в поведении поверхностных «островов тепла» в различных природных условиях. В ряде мест отмечено ослабление поверхностного «острова тепла», например, в восьми крупных городах Пакистана по данным радиометра MODIS [49], а также в городах ОАЭ в ночное время суток [51]. По данным того же радиометра поверхность города Нью-Дели во время карантина также оказалась холоднее его окружения. Анализ температуры поверхности в семи крупнейших мегаполисах Индии в апреле 2020 года по данным

спутника Landsat-8 показал, что температура поверхности в них ниже, чем в апреле предыдущих двух лет на $0,3 \div 7,1$ °C [60]. Аналогичный анализ был проведен для городской агломерации Джакарта, Индонезия [53]. Он показал, что во время карантина в мае 2020 года температура поверхности городской среды была ниже, чем в этот же период до пандемии и после ее завершения. Однако численных оценок интенсивности поверхностного «острова тепла» не производилось, а температура поверхности в сельской местности не измерялась.

А вот в городах бассейна рек Инд и Ганг интенсивность поверхностного «острова тепла», наоборот, днём увеличилась на $0,2 \div 0,4$ °C [61]. Авторы объясняют это остановкой уборки сельскохозяйственных культур с полей, что, в свою очередь, привело к увеличению затрат тепла на транспирацию и охлаждению поверхности сельской местности вокруг города. Неоднозначные результаты изложены в работе [60] по анализу поверхностного «острова тепла» в 21 мегаполисе Ближнего Востока по данным спутника AQUA. Анализ данных по некоторым городам в период карантина с марта по июнь показал либо увеличение интенсивности поверхностного «острова тепла», либо незначительное его снижение. Таким образом, влияние периода самоизоляции на I неоднозначно и может быть различным в зависимости от географических и социально-экономических условий.

Давайте попробуем разобраться, что происходило в период карантина (с 30 марта по 8 июня 2020 года) с температурой поверхности в Москве по данным спутников TERRA и AQUA. За данный период всего 12 космических снимков с обоих спутников оказались пригодными для анализа, т. е. соответствуют критериям, изложенным в главе 2.5 (свободны от облаков не менее 80% города и 50% области). Они попали в следующие даты: 1, 4, 9 и 22 апреля, 1-3 и 11 мая, а также 6 июня. Для выявления особенностей влияния карантина на поверхностный остров тепла за тот же период с 30 марта по 6 июня были отобраны все пригодные снимки с 2000 по 2019 гг. Общая выборка за этот период составила 275 снимков.

В табл. 2.12 приведены данные о средней температуре поверхности в Москве и Московской области. Можно увидеть, что температура поверхности в Москве как в 2020 году, так и за период с 2000-2019 гг. с марта по июнь выше, чем в области сравнения. Это доказывает наличие в этот период года четко выраженной тепловой аномалии. Однако, во-первых, приземная температура весной и начале лета 2020 г. была ниже (на $4,3$ °C в Москве и на $4,1$ °C в Московской области) средних многолетних значений. Кроме того, интенсивность поверхностного «острова тепла», как разница между городом и сельской местностью также была меньше, чем обычно ($2,6$ °C, что на $0,2$ °C ниже, чем в среднем за предыдущие 20 лет). Возвращаясь к рисунку 2.25, можно заметить, что интенсивность поверхностного «острова тепла» в 2020 году в среднем также оказалась ниже, чем во все предыдущие годы.

Следует отметить, что во время карантина в 2020 году все доступные для анализа снимки, кроме одного (6 июня), были сделаны до 12 мая. Как было показано на рис. 2.23 в июне интенсивность поверхностного «острова тепла» максимальна и быстро возрастает в конце весны – начале лета. Однако в мае и начале июня 2020 года над территорией Московского региона наблюдалась циклоническая погода

и высокая облачность. Именно поэтому с 12 мая до 8 июня 2020 года был получен всего один пригодный для анализа снимок, в то время как за предыдущие 20 лет к анализу было принято 118 снимков за этот период. Было принято решение пересчитать все значения за более короткий период с 30 марта до 11 мая как в 2020 году, так и за предыдущие 20 лет (табл. 2.13).

Табл. 2.12 Значение температуры поверхности в Москве и Московской области в период карантина с 30 марта по 6 июня.

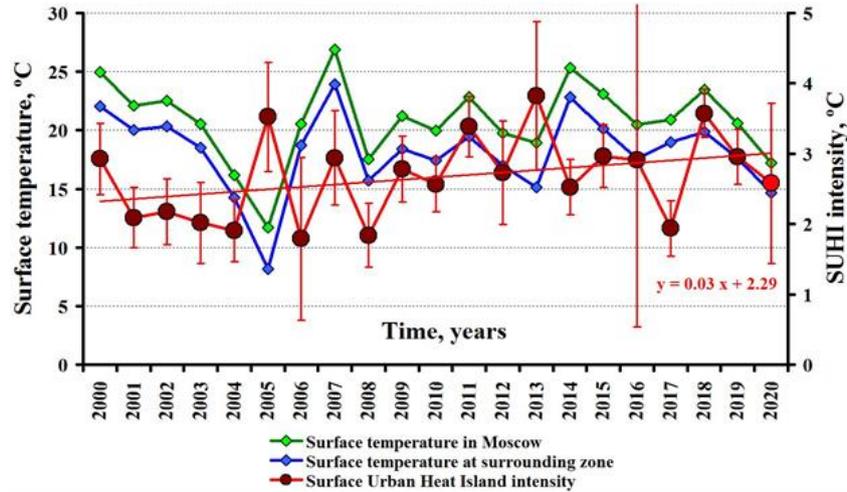
	Москва	Московская область	Разница
Температура поверхности, °C			
2020 (12)	17.2 ± 7.8	14.6 ± 7.2	2.6
2000÷2019 (275)	21.5 ± 6.4	18.7 ± 6.5	2.8
Вегетационный индекс (NDVI)			
2020 (12)	0.28 ± 0.11	0.38 ± 0.13	-0.10
2000÷2019 (275)	0.35 ± 0.16	0.47 ± 0.19	-0.12
Индекс листовой поверхности (LAI): до 9 июня			
2020		16.7 ± 8.4	
2000÷2019		20.8 ± 12.6	

Табл. 2.13 Значение температуры поверхности в Москве и Московской области в период карантина с 30 марта по 11 мая.

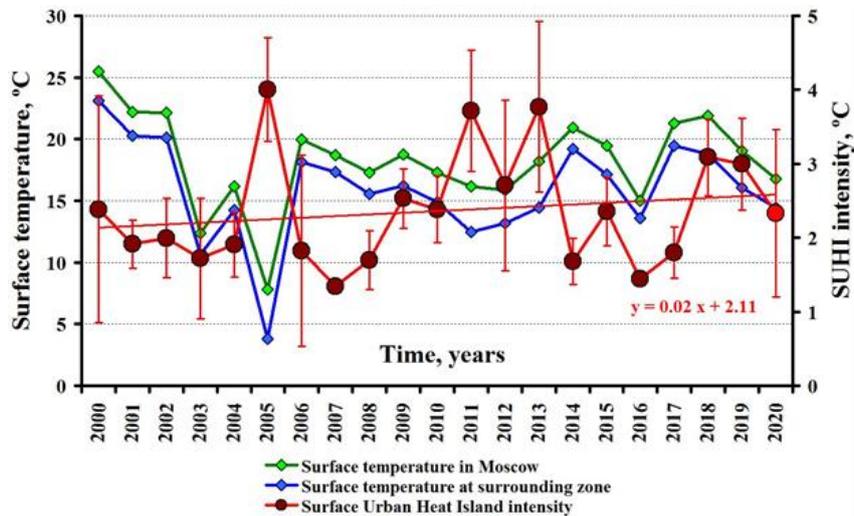
	Москва	Московская область	Разница
Температура поверхности, °C			
2020 (11)	16.7 ± 8.0	14.4 ± 7.5	2.3
2000÷2019 (156)	18.2 ± 6.3	15.6 ± 6.8	2.6
Вегетационный индекс, (NDVI)			
2020 (11)	0.26 ± 0.09	0.36 ± 0.11	-0.10
2000÷2019 (155)	0.25 ± 0.12	0.34 ± 0.15	-0.09
Индекс листовой поверхности (LAI): до 16 мая			
2020		11.9 ± 3.8	
2000÷2019		13.0 ± 5.7	

Как можно заметить, при пересчете на сокращенный период карантина, средняя температура поверхности в Москве и Московском регионе, как и ожидалось, стала ниже. Интенсивность поверхностного «острова тепла» также снизилась. За период с 2000 по 2019 гг. она составила 2,6 °C, в то время как в 2020 году на 0,3 °C ниже. Однако из-за большого разброса значений интенсивности эта разница оказывается статистически незначимой.

Как видно из рис. 2.27б, приземная температура как в Москве, так и в сельской местности колеблется до 11 мая в широком диапазоне: от 7,8 °C в 2005 г. до 25,5 °C в 2000 г. и от 3,8 в 2005 г. до 23,1 в 2000 г. соответственно (для полного периода карантина на рис. 2.27а динамика аналогична). Тесная связь между температурой поверхности внутри и вне города очевидна: коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями обоих параметров равен 0,98. Суммарная выборка всех имеющихся снимков Terra и Aqua за период частичной изоляции до 11 мая за 21 год составляет 167, в том числе 11 снимков в 2020 году. В среднем за 2000÷2020 годы температура поверхности составляет 18,1 °C в Москве и 15,6 °C во внешней зоне.



а) Полный период карантина с 30 марта по 8 июня



б) Сокращенный период карантина с 30 марта по 11 мая

Рис. 2.27 Температура поверхности и интенсивность поверхностного городского «острова тепла» в среднем по Москве в период карантина в 2020 году с 2000 по 2020 год. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 0,05.

Что касается непосредственно значения интенсивности поверхностного «острова тепла» в календарный период карантина изменяется от 1,3 °C в 2007 г. до 4,0 °C в 2005 г. Столь большие изменения этого параметра от года к году объясняются учетом различных дат с пригодными для анализа снимками (начало апреля или мая), наличием или отсутствием снежного покрова, степенью развития растительности и т.д., например, интенсивность поверхностного «острова тепла» в 2005 году оказалась чрезвычайно высокой по причине наличия снимков только в первой декаде апреля, когда снежный покров даже в Москве был еще чрезвычайно высоким.

Помимо среднего значения интенсивности поверхностного «острова тепла» за весь период карантина было бы интересно посмотреть на его динамику за этот период. Для этого был построен график изменения I по отдельным датам с пригодными для анализа снимками (рис. 2.28).

Как видно, поверхностный «остров тепла» в Москве в начале карантина (в первых числах апреля) был близок к своей обычной интенсивности. Затем он был значительно слабее, чем в среднем за 20 лет до конца апреля, так что его интенсивность 9 и 22 апреля была даже отрицательной и, наконец, за исключением только одного изображения с неожиданно высоким значением (1 мая), она снова стала близкой к своему среднему значению.

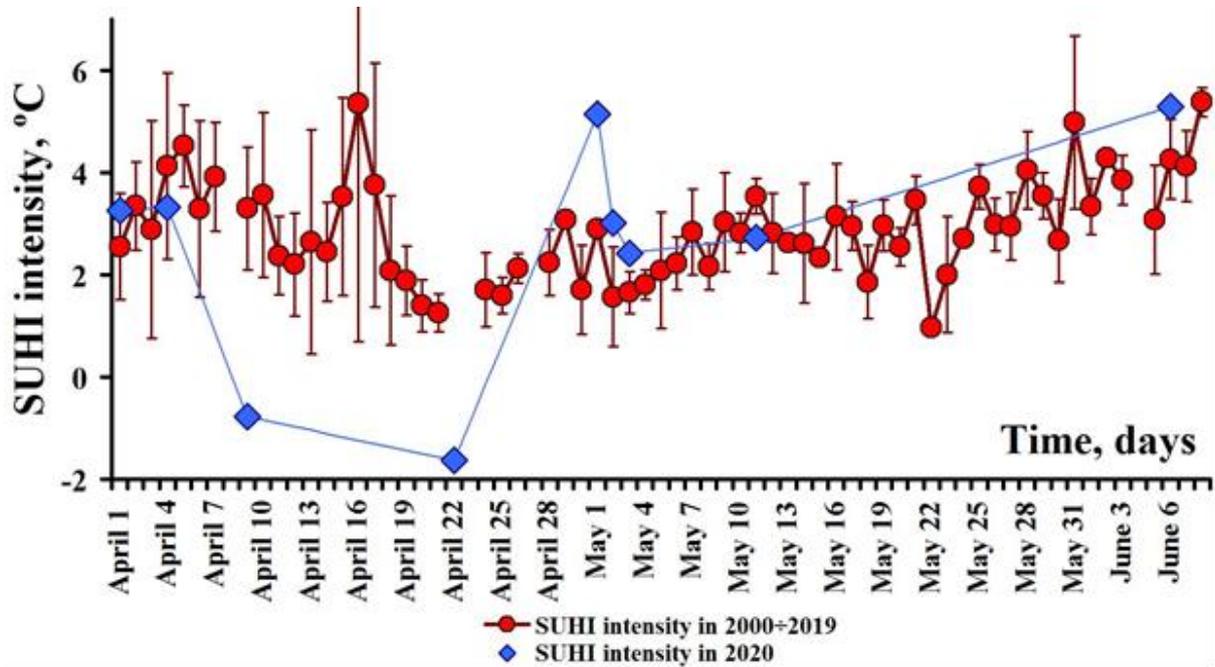


Рис. 2.28 Изменение интенсивности поверхностного «острова тепла» за отдельные дни в период карантина 2020 года и в среднем за период 2000-2019 гг.

Результаты расчета температуры поверхности в Московском регионе приведены на рис. 2.29. Обе карты демонстрируют, во-первых, общую географическую зональность в распределение этого параметра по территории региона, и, во-вторых, наличие положительной температурной аномалии в пределах города Москва. Однако, в среднем за 20 лет (с 2000 по 2019 год) в период карантина температура поверхности была значительно выше, чем в 2020 году. Поверхностный остров тепла в обоих случаях отображается в виде трех замкнутых или полузамкнутых изотермах.

Как говорилось ранее поверхностный «остров тепла» зависит не только от антропогенных условий, но и состояния растительности. Для выявления причин изменения интенсивности поверхностного «острова тепла» в период карантина 2020 года были проанализированы спутниковые данные Terra и Aqua о вегетационном индексе NDVI и индексе листовой поверхности LAI.

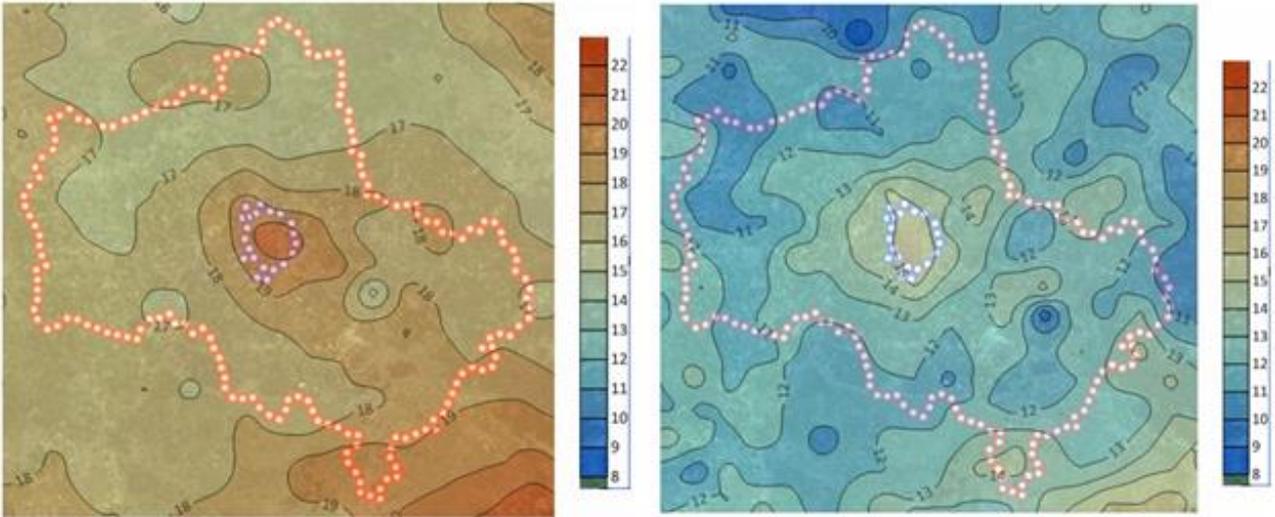


Рис. 2.29 Карты распределения температуры поверхности по территории Московского региона в период карантина (с 30 марта по 11 мая): слева в среднем за 2000-2019 гг., справа – в 2020 году.

Данные о вегетационном индексе NDVI были получены по тем же 11 снимкам, которые использовались ранее для расчета интенсивности поверхностного «острова тепла» за период с 30 марта по 11 мая 2020 года. Как видно из таблицы 2.13 и рис. 2.30, среднее значение NDVI за весь период карантина составляет 0,28 при стандартном отклонении $\pm 0,11$ в Москве и $0,38 \pm 0,13$ в Московской области. Максимальные (0,5 в Москве и 0,6 в области) и минимальные (0,1 и 0,2 соответственно) значения соответствуют постепенному развитию растительности от апреля к июню.

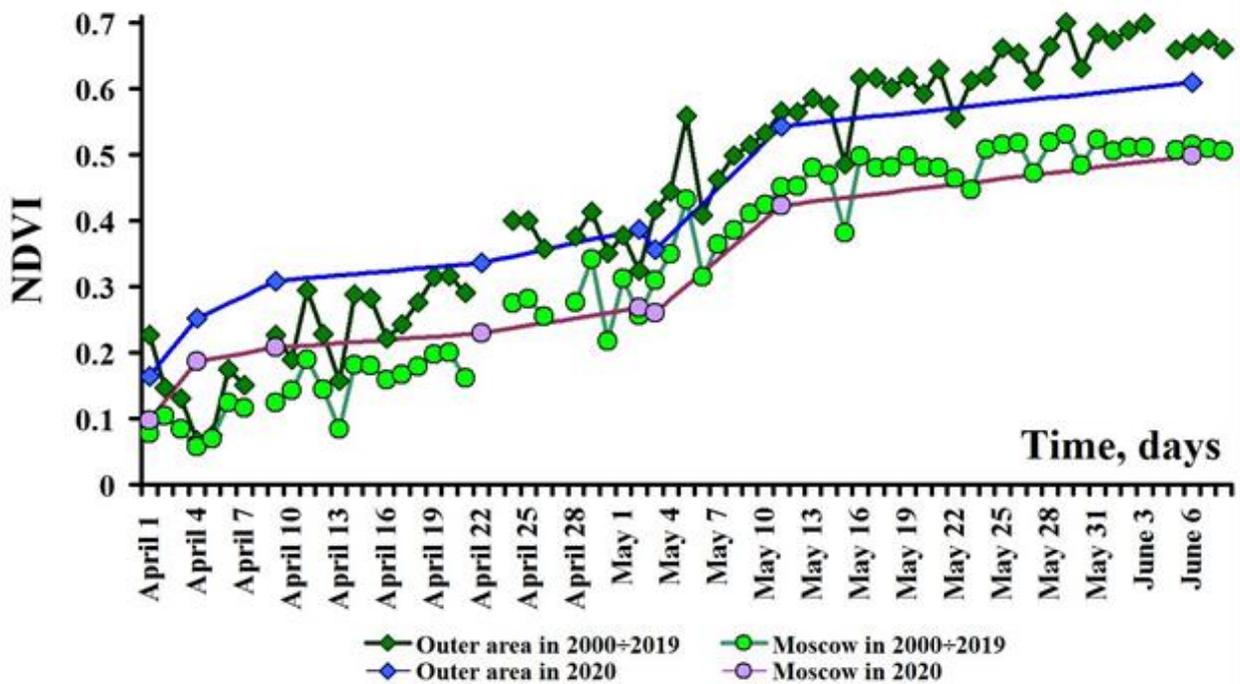


Рис. 2.30 Изменение значения вегетационного индекса NDVI в период карантина 2020 года в Москве и Московской области

Как видно, в начале периода карантина (4 и 9 апреля) NDVI был выше, чем в среднем за предыдущие 20 лет. В середине (22 апреля, 2, 3 и 11 мая) значения в 2020 г. и в среднем за 2000÷2019 гг. близки друг к другу. Наконец, в конце карантина (6 июня) NDVI в сельской местности в 2020 году, наоборот, был ниже обычного. Очевидными причинами такой динамики являются, во-первых, экстремально жаркая и почти бесснежная зима в Москве, которая привела к раннему развитию вегетации, и, во-вторых, холодная весна, которая в дальнейшем затормозила это развитие. Тем не менее в целом значения NDVI во время карантина в Москве были близки к обычным как в городе, так и в сельской местности.

Однако совсем другую картину показывает индекс листовой поверхности LAI. Значения данного индекса были рассчитаны только для территории Московской области девяти отдельных периодов по 8 дней с 30 марта по 9 июня. Результаты представлены на рис. 2.31. Они получены за все годы, кроме 2001 г. Для территории Москвы невозможно получить данные о индексе листовой поверхности, так как в стандартном продукте радиометра MODIS - MOD15, Москва причислена к антропогенным территориям с нулевым значением листового индекса.

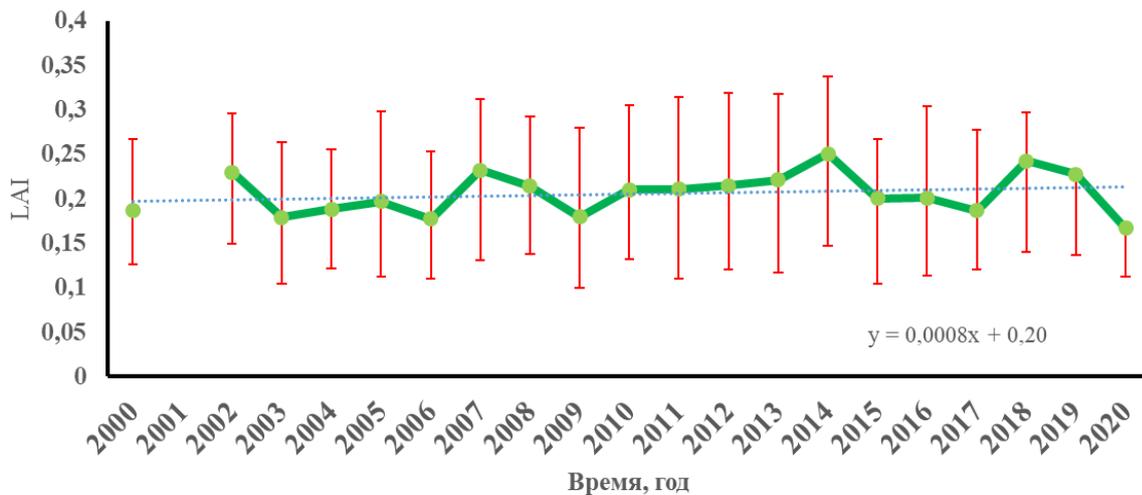


Рис. 2.31 Изменение индекса листовой поверхности в календарный период карантина за последние 21 год

Среднее за календарное время карантина значение LAI в Московской области (табл. 2.13) за период 2000; 2002-2019 гг. составило 0,21, в то время как для периода карантина 2020 года оно оказалось значительно ниже (0,16). Как показывает рисунок 2.31 – это самое низкое значение листового индекса начиная с 2000 года. Однако с учетом доверительных интервалов, построенных с доверительной вероятностью 0,95, это снижение не является статистически значимым.

Но, как и в случае с NDVI, следует рассмотреть более подробно динамику роста листового индекса в период карантина 2020 года по дням. Данные о LAI предоставляются NASA в среднем за 8-дневный период. На рис. 2.32 представлены средние для Московской области значения LAI за каждый 8-дневный период карантина в 2020 году и в среднем за 2000 и 2002-2019 гг. Мы можем увидеть вполне логичную

динамику изменения LAI со временем, то есть в среднем за 2000 и 2002-2019 гг. постепенный рост значений от одного 8-дневного значения к другому вплоть до начала июня, а затем при достижении растительностью максимального расцвета и размера листвы выход на асимптоту. Что касается 2020 года, то картина здесь значительно отличается от среднемноголетней. В начале периода карантина из-за аномально теплой зимы развитие листвы у древесных пород началось значительно раньше, что привело к завышенному значению LAI. Однако после 15 апреля происходит резкое замедления роста из-за значительного снижения температуры воздуха в этот период, и уже 1 мая различия между среднемноголетними значениями и значениями 2020 года, становятся статистически значимыми.

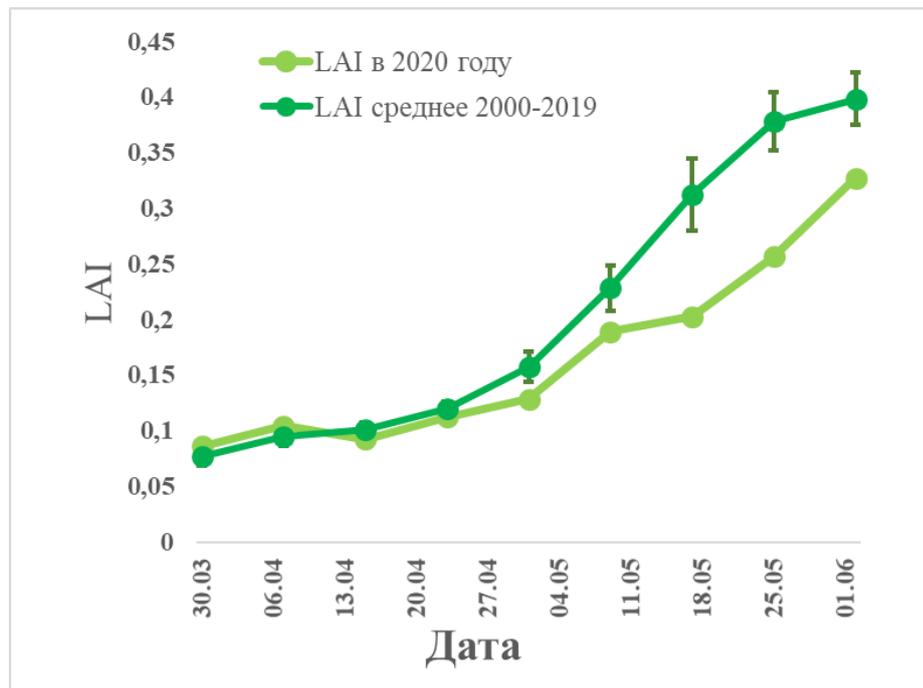


Рис. 2.32 Изменение 8-дневных значений листового индекса LAI в период карантина COVID-19 за 2020 год и в среднем за 2000-2019 гг.

Таким образом, динамика LAI подтверждает, что затраты тепла на транспирацию во время карантина COVID-19 в 2020 г. в Московской области были значительно ниже, чем обычно, в результате прохладной весны. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что ослабление поверхностного «острова тепла» в Москве в это время, по-видимому, было вызвано не только снижением активности антропогенной деятельности, но и (и, вероятно, в большей степени) природными факторами, такими как замедлением развития растительности из-за специфических погодных условий.

Выводы к главе.

1. Интенсивность поверхностного «острова тепла» по данным спутников зависит от выбора границ города. При учете реальных границ Москвы, действовавших до 2011 года, значение этого параметра на 15 % выше, чем при расчете средней температуры поверхности по

равновеликому по площади прямоугольнику и на 64 %, чем при учете новых границ столицы с учетом территории Новой Москвы.

2. Значение I не зависит от площади области сравнения на расстоянии от 45-60 км до 140 км от границ города. На территориях ближайшего пригорода высоки неоднородность типов поверхности и доля городской застройки, что и приводит к занижению расчетов интенсивности поверхностного «острова тепла».
3. Доля безоблачных снимков в общей выборке за период с 2008 по 2018 гг. очень невелика и составила всего около 10 %.
4. Наличие облачного покрова на снимке Московского региона приводит к ошибкам в расчетах интенсивности «острова тепла». Например, перекрытие облаками 50% северной части области в летний период времени приводит к занижению оценок на 17%, а наличие облачности и дымки на 35% центральной части города приводит к максимальному занижению значений параметра на 12%.
5. По итогам эксперимента было принято решение считать пригодными для анализа снимки с долей облачности над территорией Москвы не более 20%, а над территорией области не более 50%.
6. Вопреки ожиданиям значение температуры поверхности по данным спутников наилучшим образом коррелируется и соотносится с данными о температуре воздуха. С другой стороны, температура поверхности, измеренная на вскопанной площадке размером 4*6 метров, сильно отличается от того же параметра, измеренного спутниками как в целом за год, так и по сезонам года. Наибольшие различия наблюдаются в летнее время.
7. Анализ влияния времени пролета спутника на значение интенсивности «острова тепла» показал, что по данным наземной сети метеорологических станций в регионе среднесуточное значение этого параметра в три раза больше, чем полученное для срока наблюдения 12 часов (наиболее близкого к среднему времени пролета спутников).
8. Выявлено отклонение в расчетах интенсивности поверхностного «острова тепла» вызванное наличием данных о температуре поверхности только в антициклональных условиях. При учете данных о температуре воздуха по ежечасным наблюдениям на метеорологических станциях можно сделать вывод, что среднегодовое значение параметра I превышает его реальное значение на 40%.
9. Средняя за период исследования (2000-2020 гг.) интенсивность поверхностного «острова тепла», рассчитанная как среднее значение из 12 среднемесячных, составляет 2,6 °С, что означает превышение температуры поверхности в городе по сравнению с сельской местностью в течение всего года;

10. От случая к случаю значение параметра I меняется в широких пределах от $-3,3$ °C до $+7,7$ °C. Данный параметр в большей степени зависит от синоптических условий, сложившихся над городом. Максимальные значения проявляются в условиях расположения Москвы в центре антициклона или в зоне застоя воздуха со слабыми градиентными потоками. Минимальные же (отрицательные) значения встречаются при пролете спутника поздним утром при положении Москвы в зоне действия сильных градиентных потоков;
11. В средне сезонных различиях максимальное значение интенсивности достигается летом ($+2,9$ °C), в то время как минимальное, часто отрицательное, зафиксировано осенью ($1,2$ °C);
12. В годовом ходе среднемесячных значений интенсивности явный максимум наблюдается в июне ($+4,2$ °C), а минимум в октябрь ($0,9$ °C). Различия в годовом ходе в большей степени соотносятся с периодом вегетации растительности, а также различиями в условиях залегания снежного покрова в городе и за его пределами;
13. Достоверных изменений характеристик поверхностного «острова тепла» со временем за 21 год не обнаружено, однако отдельные, малообеспеченные снимками года, могут приводить к смещению линии тренда в одну или другую сторону;

Глава 3. Пространственная структура поверхностного «острова тепла» и термический режим разных типов городской поверхности в Москве.

Рассмотрим особенности термического режима различных типов городской поверхности внутри города Москва. В результате анализа данных было отмечено, что внутри города температура поверхности весьма неоднородна. Было решено выделить на территории Москвы наиболее значимые типы поверхности, которые наибольшим образом отличаются по своим термическим свойствам.

Первая попытка выделить на территории города различные области с отличающимся термическим режимом была произведена Чандлером в 1965 году [54]. Он разделил территорию Большого Лондона на 4 локальные зоны, каждая из которых отличалась своими микроклиматическими и физическими свойствами, а также формой и типом застройки. Следом за ним Ауэр произвел метеорологически обоснованную классификацию территории г. Сент-Луиса на 12 зон с учетом городской растительности и характеристик застройки [96]. В настоящее время наибольшее распространение получила классификация городской территории Т. Ока, получившая название классификации локальных климатических зон (ЛКЗ). Эта классификация получила широкое распространение благодаря своей универсальности и возможности применения для территории любого города. В ее основу заложены принципы классификации по логическим связям. Выделение зон основывалось на высотном уровне объектов, структурной компоновке, типе преобладающего покрытия и его теплофизических свойствах. В результате анализа ландшафтов в классификации Т. Ока выделено 10 типов застроенных территорий с учетом ее высоты и плотности, а также 7 типов наземного покрытия (трава, асфальт и бетон, растительный покров разной высоты и типов). Каждая зона должна иметь достаточную однородную площадь для выделения ее на территории города - как правило, линейный размер этих объектов должен составлять от сотен метров до нескольких километров на поверхности Земли [22].

3.1 Термическая неоднородность городской поверхности и основы её классификации на примере Москвы.

Для территории Москвы имеется классификация, разработанная в работе [22] по данным спутника Landsat согласно термическим свойствам различных видов городских объектов. Данная классификация содержит в себе 12 типов термической поверхности. К делению применен экологический подход, так, например, водные объекты Москвы разделены на три класса – сильно, средне и слабо загрязненные. Застройка же здесь в отличие от классификации Т. Ока не разделена по степени высотности и плотности, а делится на три класса в зависимости от процента озеленения.

Классификацию Т. Ока применили для условий Москвы в своей работе Т.Е. Самсонов и К.С. Тригуб [40]. Данная классификация имеет обоснованную метеорологическую базу, в которой заложены принципы теплового баланса поверхности и атмосферы. Разница в термическом режиме различных объектов подтверждается данными метеорологических наблюдений по всему миру. В данной работе по

космическим снимкам спутника Landsat 8 за 2014 год и данным OpenStreetMap производились поиск и кластеризация возможных ЛКЗ внутри города. Сначала отбирались эталонные участки каждого из существующих типов, а затем производилась автоматическая классификация с обучением. В результате на территории Москвы было выделено 15 из возможных 17 типов локальных климатических зон (10 типов застройки и 5 типов растительного покрова). Две ЛКЗ не проявились на территории города в достаточной мере, так как не занимают однородной площади, достаточной для обособления ЛКЗ. Из типов земельного покрова не выделились кустарники и открытые почвы/песок, которые не занимают сплошных однородных площадей необходимого для ЛКЗ размера.

Анализ полученных результатов показ, что в центре города сосредоточена плотная среднеэтажная застройка. Именно там сосредоточены большие площади открытых искусственных покрытий. Основная территория города занята средней и высотной застройкой открытого типа, что означает наличие растительного покрова между отдельно стоящими домами. Четко выделились все крупные парки столицы, а вот водные объекты проявились только на небольших площадях открытых водоемов, таких как Химкинское водохранилище (Москва река при этом не учитывается из-за своего малого размера). Также на территории Москвы велика доля крупногабаритной малоэтажной застройки, связанной с наличием складских территорий, а вот территории, занятые типом «Тяжелая промышленность», практически отсутствуют.

Однако, для целей нашей работы эта классификация является слишком объемной. Поэтому, проанализировав результаты описанных выше работ, автор предложил деление городской территории на более крупные типы поверхности с наибольшими различиями в их термическом режиме.

Было принято решение разделить город на 6 типов поверхностей, термическое влияние которых разительно отличается друг от друга:

1. Парковые и лесопарковые территории (данный тип включает в себя все территории с древесной растительностью вне зависимости от их высоты и сомкнутости крон);
2. Водные объекты (заливы, озера, пруды, водохранилища и Москва река, без деления по степени загрязненности);
3. Плотная городская застройка и промышленные зоны (любая по высоте и типу плотная застройка с преобладанием искусственных покрытий);
4. Песчаные поверхности (очень маленькие площади открытой песчаной поверхности наблюдаются в пойме реки Москвы и песчаный карьер);
5. Луговые территории (главным образом пойма Москвы-реки);
6. Оставшаяся часть территории города, включающая в себя озелененную застройку и пустырные территории.

Автор работы не прибегал к результатам автоматической классификации, а произвел оценку площадей каждого из типов вручную. Каждая из зон была выделена на основе тщательного визуального

анализа территории города по космическим снимкам высокого разрешения на сайте kosmosnimki.ru. Были созданы векторные слои некоторых типов поверхности и проведена оценка их температурного влияния на температурное поле в городе. Результаты анализа представлены в последующих главах. Итогом стала карта упрощенной классификации типов поверхности в Москве (рис. 3.1).



Рис. 3.1 Карта различных типов поверхности в Москве. Цветом показаны различные типы поверхности:

3.2 Локальные «острова холода» городских лесопарков Москвы. Исследование связей интенсивности «островов холода» с их площадью, вегетационным индексом (NDVI) и индексом листовой поверхности (LAI).

До недавнего времени люди уничтожали древесную растительность. Особенно пострадали городские территории, где борьба идет за каждый сантиметр свободной от застройки территории. В общей доле от площади крупных промышленных городов территории парков занимают всего от 1 до 10%. Однако в последние годы появилось обратное направление, ведущее за собой рост озеленения крупных городов. И это естественно: ведь зоны зеленых насаждений играют очень важную роль в экологическом благополучии городских территорий. Поверхность зелёных листьев, а также лесные почвы служат стоком загрязняющих веществ в городском воздухе – озона, двуокиси серы, взвешенных частиц и др. [4]. Помимо этого, леса и парки поглощают из городской атмосферы излишки углекислого газа и выделяют дополнительный (по сравнению с его фоновыми значениями в городе) кислород.

Очевидно, что количество лесов также влияет на интенсивность процесса глобального потепления вследствие усиления парникового эффекта. Существуют оценочные прогнозы изменения содержания углекислого газа в атмосфере при изменении площади лесов. Самые печальные из них говорят о том, что, если люди сведут все имеющиеся леса до 2050 года, при неизменном режиме природопользования, содержание CO_2 в атмосфере вырастет приблизительно в 3 раза [25]. В городах растительный покров предотвращает чрезмерный нагрев. За счет поглощения и отражения кронами деревьев солнечной радиации, а также затрат тепла на транспирацию растения уменьшают тепловое воздействие города и оказывают охлаждающий эффект. Всемирная Организация Здравоохранения, основываясь на всех полезных свойствах растительности в городах, представила проект, в котором прописана рекомендованная норма озеленения городов (это не только организация парковых территорий, но и в большей степени озеленение дворовых частей города), которая устанавливает норму в 40-50% от общей территории города [3].

На территории города Москва в настоящее время существует достаточно большое количество парковых и лесопарковых территорий различной площади, в том числе в черте города находится часть национального парка Лосинный остров. Москва считается одним из крупных городов с большой долей озеленения. По подсчетам автора, доля парковых зон с площадью не менее $0,5 \text{ км}^2$ в общей площади территории города составляет порядка 12,5%. Однако, согласно Постановлению Правительства Москвы от 13 ноября 2007 года № 996-ПП с изменениями на 26 ноября 2019 года «О Генеральной схеме озеленения города Москвы на период до 2020 года», доля лесопарковых территорий с линейным размером более 0,5 км в столице составляет 14,4 %, а доля общего озеленения с учетом междомовых территорий, аллей и скверов с различной плотностью древостоя составила 32% [1]. Важно оценить воздействие лесопарковых территорий на температурный режим города.

3.2.1. Влияние растительности на поле температуры внутри города.

Как говорилось ранее, зеленые насаждения оказывают колоссальное влияние на температуру окружающей среды. Оно проявляется в локальном понижении температуры как воздуха, так и поверхности. Наибольшее влияние на изменение температурного поля оказывает все же древесная растительность, в то время как луговые и кустарниковые ландшафты не приводят к сильным изменениям в температуре воздуха или поверхности вследствие малой площади листовых пластин и меньших затрат тепла на транспирацию [62]. Такое, более сильное, охлаждающее воздействие деревьев связано с тремя основными их особенностями:

Во-первых, уменьшение температуры воздуха и поверхности происходит в процессе энергетического обмена между различными составляющими природной среды. Листья в силу своих биохимических свойств, а именно наличия в клетках хлорофилла, поглощают максимум солнечной радиации в одной части электромагнитного спектра, а отражают совершенно в другой. Максимум

отражения приходится на зеленую и дальнюю инфракрасную части спектра, а наибольшее поглощение наблюдается именно в спектре теплового излучения в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Температура поверхности листьев оказывается гораздо меньше температуры поверхности окружающих городских покрытий (почвы, асфальта и бетона). Во-вторых, причина изменения температуры воздуха происходит из-за затрат тепла на транспирацию растениями влаги в тепловом балансе.

Наконец, третья причина изменения температурного режима, заключается в образовании обширных областей затенения. Именно препятствие проникновению прямых солнечных лучей к поверхности почвы препятствует нагреву приземного слоя воздуха. По разным оценкам температура воздуха под кронами деревьев на 1-2°C холоднее температуры воздуха за их пределами. Однако при удалении от озелененной территории этот эффект очень быстро сходит на нет. Явление затенения преимущественно оказывает влияние на термический комфорт населения, нежели на температуру воздуха, хотя температуру поверхности под кронами деревьев в тени значительно меньше, чем температура открытых поверхностей [52].

Но не все деревья оказывают одинаковое влияние на температуру окружающей среды. Степень проявления этого явления зависит от вида растений, площади и строения их кроны, площади поверхности листовых пластин, а также от степени угнетенности растения - например, накопления на листовой пластине плотного пылевого слоя, уменьшающего значение альбедо. В работе Rahman M. A., Armson D. и Ennos A. R [89], было показано, что наибольшее охлаждающее влияние оказывают деревья небольшой высоты (до 5 метров), у которых первые ветви начинаются не ниже чем с середины ствола. Кроме того, максимальное воздействие на температуру воздуха и поверхности под древесным пологом оказывают деревья с раскидистой кроной и высоким значением индекса листовой поверхности. К таким видам относятся все широколиственные породы деревьев, доля которых в озеленении Московского региона как раз наибольшая.

В работе этих же авторов были проведены анализ влияния пяти различных видов деревьев на тепловой баланс территории и оценка типа почвенного грунта, в которой высажены растения. Оказывается, деревья, высаженные в неуплотненный естественный грунт, обеспечивали транспирационное охлаждение в 5 раз выше, чем деревья, высаженные в уплотненные почвы или с корневой системой, закрытой тротуарным покрытием.

При анализе температурных характеристик древесной растительности необходимо помнить, что влияние растений на поле температуры в течение года неоднородно, особенно в наших умеренных широтах. В связи с наличием четко выраженной сезонности погодных условий растительность вынуждена подстраиваться под условия природы, снижая свою активность при наступлении холодов. Это проявляется в сбрасывании лиственного покрова и замедлении всех обменных процессов в теле растения. И, наоборот, при наступлении наиболее благоприятных условий растения активизируют все свои жизненно-важные процессы. Все это приводит к увеличению охлаждающего эффекта в летнее время и

его уменьшению в зимнее. Что касается хвойных видов деревьев, то доказано, что в зимний период времени эти растения могут создавать под своей кроной даже некоторый эффект увеличения температуры воздуха из-за ослабления воздухообмена и предотвращения выхолаживания поверхности.

В городской климатологии явление уменьшения температуры воздуха и поверхности в пределах зеленых насаждений получило название локальных «островов холода». В научной литературе по данной тематике представлено множество научных исследований. Впервые данное явление, видимо было обнаружено и описано В. Бёером в его книге «Техническая метеорология» [15]. Одна из глав его книги посвящена изучению «островов тепла» различных городов Европы. На одной из построенных карт распределения температуры воздуха в городе Веймаре (Германия) в обеденные часы 10 августа 1950 г. обнаруживается локальное понижение температуры воздуха в пределах городского парка, причем разница температур между центральной частью парка и окружающей городской застройкой составила целых 6 °С. Позднее в работе Т. Ока [36] также был приведен пример проявления охлаждающего эффекта парковой территории на территории города Монреаль (Канада).

В современной литературе эффекту «островов холода» в парках уделяют большое внимание и изучают их как отдельный феномен, а не как часть городского «острова тепла». Основной характеристикой «острова холода» как и «острова тепла», является его интенсивность (ΔT), то есть разница в температуре между парком и окружающей его городской местностью. В табл. 3.1 приведено несколько примеров расчетов этого параметра для парков в различных городах мира.

Табл. 3.1 Примеры анализа интенсивности «островов холода» в различных городах мира

Город, Страна (зеленая зона)	Интенсивность «острова холода», °С
Нагойя, Япония (92 парковые зоны)	В зависимости от размера парка среднее значение - от 0,5 до 4,2
Тайбэй, Тайвань (61 парковая зона)	В среднем от 0,16 зимней ночью до 0,81 летним днем
Аризона, США (кампус университета Аризоны)	3,6
Пекин, Китай (98 парковых зон)	на 1,2 °С выше, чем в пригороде
Дебрецен, Венгрия (парк Nagyerdő)	1,9
Мельбурн, Австралия (Carlton Garden)	до 4,3 °С на высоте 1,5 м; до 11,7 °С по данным о ТП

Рассмотрим некоторые результаты этих работ. Ярким примером «острова холода» может послужить парк Императорского дворца в Токио [81]. Для территории парка проводилось исследование температуры воздуха и скорости ветра за период с 27 июля по 29 сентября 2008 года по данным площадных измерений температуры по границам и в центре парка. За данный период разность температуры воздуха в парке и за его пределами составила в среднем 2 °С, а в ночное время она достигала 3-4 °С. Еще примеры расчета охлаждающего эффекта в парках с помощью наземных измерений

производились в Мельбурне и Аризоне [48,59]. Для университетского городка Темпе с высокой степенью озеленения в Аризоне по данным о температуре воздуха на высоте 2 метров, разность между озелененными территориями и зоной застройки составила 3,6 °С [48]. В Мельбурне же были произведены эпизодические измерения температуры воздуха на высоте 1,5 метра и у земли (5 см над подстилающей поверхностью) 27-28 апреля и 30-31 мая 2015 г., с 8 ч. утра и до 4 ч. утра следующего дня. Охлаждение от парка распространялось на 860 м от его границ и достигло максимального значения 4,3 °С в утренние часы 30 мая [59].

Применение спутниковых данных для определения интенсивности «островов холода» также хорошо освещено в литературе. Примеры использования такого рода данных представлены в работах [56,59], а в работе [58] - с использованием огромного количества инфракрасных датчиков, установленных на уровне 2 метров от поверхности земли. В данной работе оценивалось охлаждающее влияние парков различной площади на острове Тайвань и то, на какое расстояние от них проявляется эффект охлаждения. Как можно увидеть из табл. 3.1, выявленная интенсивность «островов холода» меняется в широких пределах от 0,16 зимней ночью до 0,81 °С летним днем. Была выявлена закономерная зависимость расстояния, на которое он оказывает охлаждающее влияние от площади парка. Так, парки площадью менее 0,5 га проявляются в температурном поле на расстоянии 10-20 м, в то время как парки площадью более 1 га - до расстояния от 60 до 300 м [58].

Иногда термин «остров холода» может применяться и для всей городской территории в целом. Например, в сухих тропиках, когда город является более влажным оазисом в окружающей его пустыне. В силу естественных физических законов на территории города большая часть тепла расходуется на испарение и транспирацию высаженными растениями, в то время как в окружающей его пустыне вся солнечная радиация уходит на нагрев открытой песчаной поверхности и, как следствие, воздуха. Именно поэтому город оказывается в среднем холоднее фоновой местности. Так, город Беэр-Шева (Израиль) вплоть до середины 1980-х годов был холоднее окружающей его пустыни Негев. Город Эрбил (Ирак) [90] тоже обычно холоднее окружающей местности в середине дня в течение сухого сезона (т.е. летом). Таким образом, этот город периодически представляет собой «остров холода», в зависимости от времени года и суток.

Часто крупные города даже в средних широтах становятся «островами холода» в утренние часы, когда поверхности городских бетонных стен и асфальтовых покрытий холоднее открытой почвы за городом вследствие их большей теплоёмкости и, как следствие, запаздывания во времени их температурных изменений в суточном ходе. Тем не менее, обычно «островами холода» считаются именно городские парки.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что охлаждающий эффект городских лесопарков зависит от пород деревьев, растущих в нем, времени года и площади парка. Посмотрим, подтвердятся ли

некоторые из этих закономерностей для парковых территорий города Москва по данным космических снимков, полученных с радиометра MODIS.

3.2.2. «Острова холода» в Московских лесопарках.

В данной работе был проведен анализ интенсивности локальных «островов холода» внутри городского «острова тепла», связанных с парковыми территориями внутри города.

За интенсивность «островов холода» по аналогии с «островом тепла» принимается следующая разность:

$$\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{г}}, \text{ где} \quad (8),$$

Где ΔT – интенсивность локального «острова холода»; $T_{\text{п}}$ – средняя температура поверхности внутри парков, то есть, по спутниковым данным, температура поверхности крон деревьев, а также лесного подростка, кустарникового яруса или травяного покрова в просветах между отдельными деревьями; $T_{\text{г}}$ – температура поверхности остальной части города, не имеющей зоны плотных зеленых насаждений.

Для расчета ΔT , необходимо было выявить все лесопарки на территории города, площадь которых превышает $0,5 \text{ км}^2$. Такой выбор площади связан с пространственным разрешением используемых снимков. Чтобы влияние парка проявилось в средней температуре пикселя необходимо, чтобы парк занимал как минимум половину его площади (1 км^2). Очевидно, что охлаждающее воздействие парков должно проявиться именно при таком отношении площади парка к окружающей его местности в пределах единичного пикселя. Границы парков определялись по данным мозаики космических снимков, с высоким пространственным разрешением, представленной на Веб-ГИС GeoMixer [104]. Точность в определении границ парков в созданном векторном слое составляет около $\pm 20 \text{ м}$. В границы входили только территории с плотными зелеными насаждениями. Все крупные поляны, просеки и отдельные здания тщательно вырезались. Примеры проведения границ представлены на рис. 3.2.

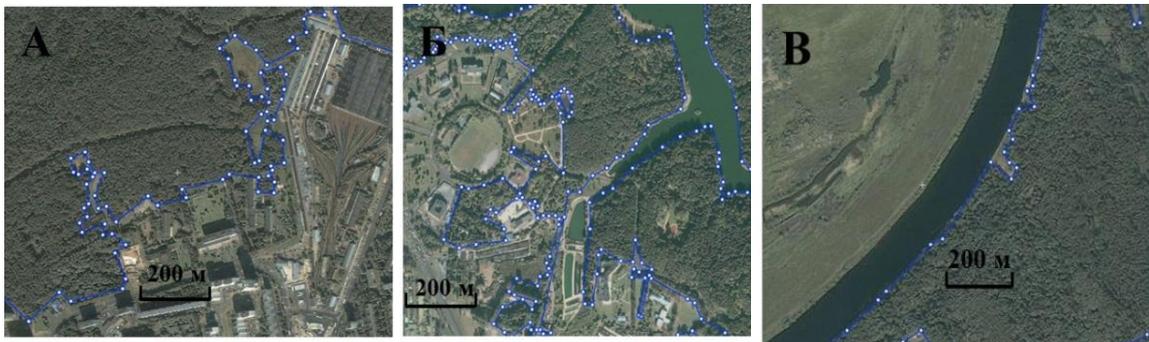


Рис. 3.2 Примеры проведения границ лесопарковых зон с точностью до 20 метров. А – Южная граница парка Алёшкинский лес; Б – западная граница парка Царицыно; В – Северная граница Филёвского парка на берегу р. Москвы

На рис 3.2А приведен пример южной границы парка Алёшкинский лес, на котором видно, что она проводилась четко по контуру древесной растительности с учетом отдельных полей и даже, отдельно стоящих в гуще парка, зданий. Граница между искусственными поверхностями и древесной растительностью приведена на рис. 3.2Б, где отображается часть западной границы на севере парка Царицыно. Граница между речной поверхностью и парком приведена на рис. 3.2В. В данном случае выделение границ происходило либо по контурам береговой линии или, как можно увидеть, по границам пойменных полей.

В результате на территории города было выделено 28 лесопарковых территорий (табл. 3.2), общей площадью около 124 км². Наибольшую площадь имеет национальный парк Лосиный остров, а именно его часть в пределах города, вместе с парком Сокольники (38,8 км²), а самой маленькой зеленой зоной оказалось Ваганьковское кладбище (0,51 км²).

Табл. 3.2 Лесопарки Москвы, принятые к анализу и их площадь

№п/п	Парк	Площадь, км ²	№п/п	Парк	Площадь, км ²
1	Ваганьковское кладбище	0,51	15	Парк Воробьёвы горы	2,54
2	Братцевский парк	0,54	16	Филёвский парк	2,60
3	Кузьминское кладбище	0,56	17	Парк Тропарёво	2,64
4	Лианозовский питомник	0,62	18	Востряковское кладбище	2,67
5	Нескучный сад	0,67	19	Парк сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева	2,68
6	Парк Лианозовский	0,75	20	Лесопарк Кусково	3,12
7	Лесопарк Черганово	0,82	21	Алёшкинский лес	3,39
8	Химкинский парк	0,83	22	Ботанический сад	4,35
9	Парк Восточное Измайлово	0,94	23	Парк Царицыно	4,56
10	Парк Обручëво	0,94	24	Парк Рублёвский	8,00
11	Парк Бутово	1,32	25	Парк Кузьминки	8,65
12	Лесопарк Покровское-Глебово	1,88	26	Битцевский парк	11,67
13	Серебряный бор	2,31	27	Парк Измайлово	13,12
14	Парк Тёплый стан	2,53	28	Национальный парк Лосиный остров+Парк Сокольники	38,80

Три самые маленькие зоны: Ваганьковское кладбище (располагается практически в центре города в пределах плотно застроенного Садового Кольца), Братцевский парк (на северо-западе Москвы на границе с МКАД) и Кузьминское кладбище (на юго-востоке столицы, находящиеся поблизости от жилого квартала с плотной высотной застройкой) могут вызвать некоторые сомнения в выборе их в качестве зеленых зон, особенно это касается кладбищ. Считается, что огромное количество надгробных плит и бетонных покрытий на территории кладбища могут привести к уменьшению охлаждающего эффекта

парка. Так ли это, мы обсудим ниже. Однако на космических снимках, представленных на портале [90], эти зеленые зоны выглядят как достаточно плотные древесные насаждения (рис. 3.3).

Все 28 парковые зоны Москвы с площадью не менее $0,5 \text{ км}^2$ представлен на рис. 3.4. Как можно увидеть, они распространены по городу неравномерно. Большая их часть сосредоточена на границах города вблизи МКАД. В центральной же части города находится всего 4 парка – Воробьёвы горы, Ваганьковское кладбище, Главный Ботанический сад и парк сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева. Также близко к центру располагается часть парка Сокольники.

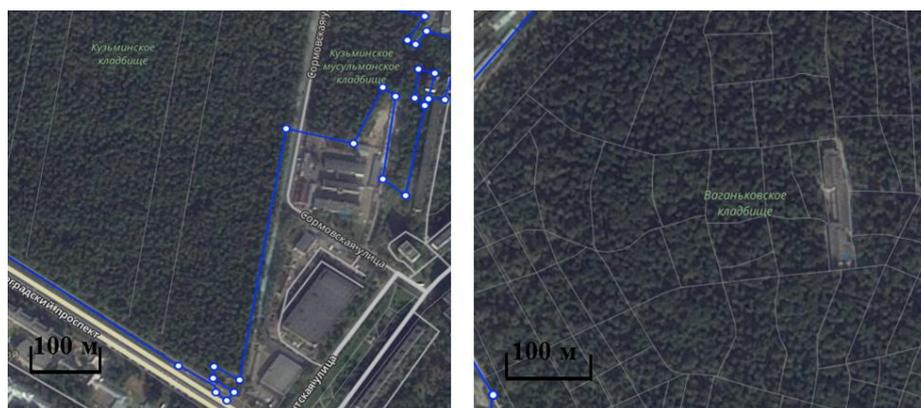


Рис. 3.3 Вид сверху на Кузьминское (слева) и Ваганьковское (справа) кладбища

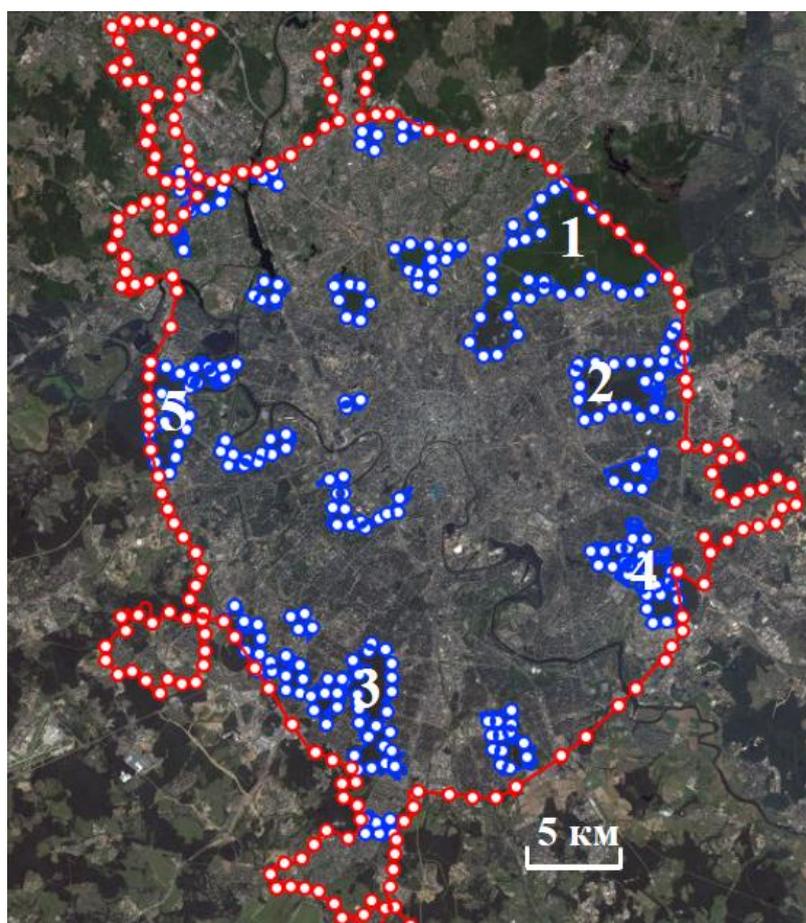


Рис. 3.4 Векторный слой всех лесопарков Москвы с площадью более $0,5 \text{ км}^2$. Красным цветом отображена традиционная до 2012 г. граница Москвы, синим – границы парков. Цифрами обозначены пять наибольших по площади парков: 1 – Лосиный остров + парк Сокольники; 2 – Измайловский лесопарк; 3 – Битцевский парк; 4 – Парк Кузьминки; 5 – Парк Рублёвский.

За значение T_g принималась средняя температура всей оставшейся части города. Это означает, что температура поверхности рассчитывалась в среднем по векторному слою города Москвы с вырезанными из него частями парковых зон. Примеры расчетных матриц температуры поверхности приведены на рис. 3.5. Такой метод был выбран с целью оценить общий охлаждающий эффект всех городских парков. В литературе существует несколько методов оценки. Например, расчет интенсивности локального «острова холода» по сравнению с опорной точкой вне парка [58]. Этот метод в основном используется при проведении наземных измерений температуры, а выбор опорной точки является спорным вопросом. Ведь зачастую рядом с парком могут находиться территории с плотной застройкой, или, наоборот, пойменные луга реки, которые будут не показательны в качестве фона. В других работах был выбран метод сравнения с ближайшим окружением парка, то есть с квадратом, где парк находится примерно посередине. Однако, этот метод оказался нам методически сложным. Во-первых, интенсивность поверхностного «острова холода», как и «острова тепла», - это характеристика, зависящая от выбора области сравнения, особенно в радиусе нескольких километров. Во-вторых, парки в Москве зачастую так близко располагаются друг к другу (например, на юге города), что выделить для них окружение достаточной площади без включения других парковых территорий становится практически невозможно. В результате авторы пришли к выводу, что сравнивать температуру внутри парков целесообразнее со всей остальной площадью города, включающей в себя различные типы поверхности.

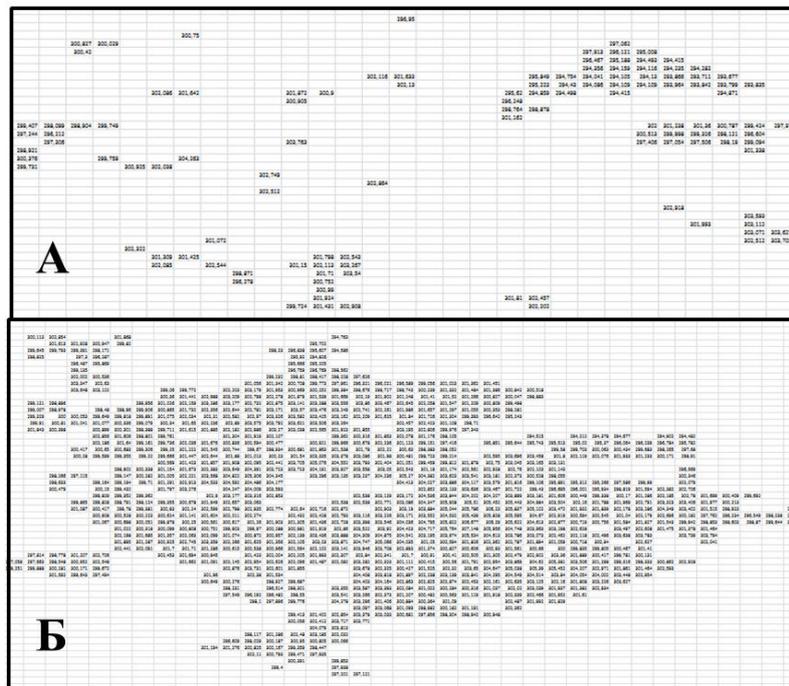


Рис. 3.5 Пример расчетной матрицы температуры поверхности для территории парков (А – T_p) и для остальной части города (Б – T_g)

С помощью автоматической классификации, проведенной на примере космического снимка спутника Landsat8 в программе Scanex Image Processor, мы попытались оценить, насколько точно мы

охватили имеющиеся на территории города зеленые зоны. Для этих целей были отобраны два набора эталонных участков, один из которых был создан только в глубине парковых зон с плотным древостоем (Лосиный остров, Битцевский парк, Измайлово и др.) а второй - в зонах с более разреженной растительностью преимущественно в центральной части города (Ваганьковское кладбище, Ботанический сад, Филёвский парк). Сама классификация проводилась на основе трех канального синтеза в ближнем ИК (0,845—0,885 мкм), ИК (0,630—0,680 мкм) и зеленом (0,525—0,600 мкм) диапазонах электромагнитного спектра, который наиболее четко позволяет выделить растительные сообщества. Пространственное разрешение снимков в этих каналах составляет 30 м. Результаты классификации представлены на рис. 3.6.

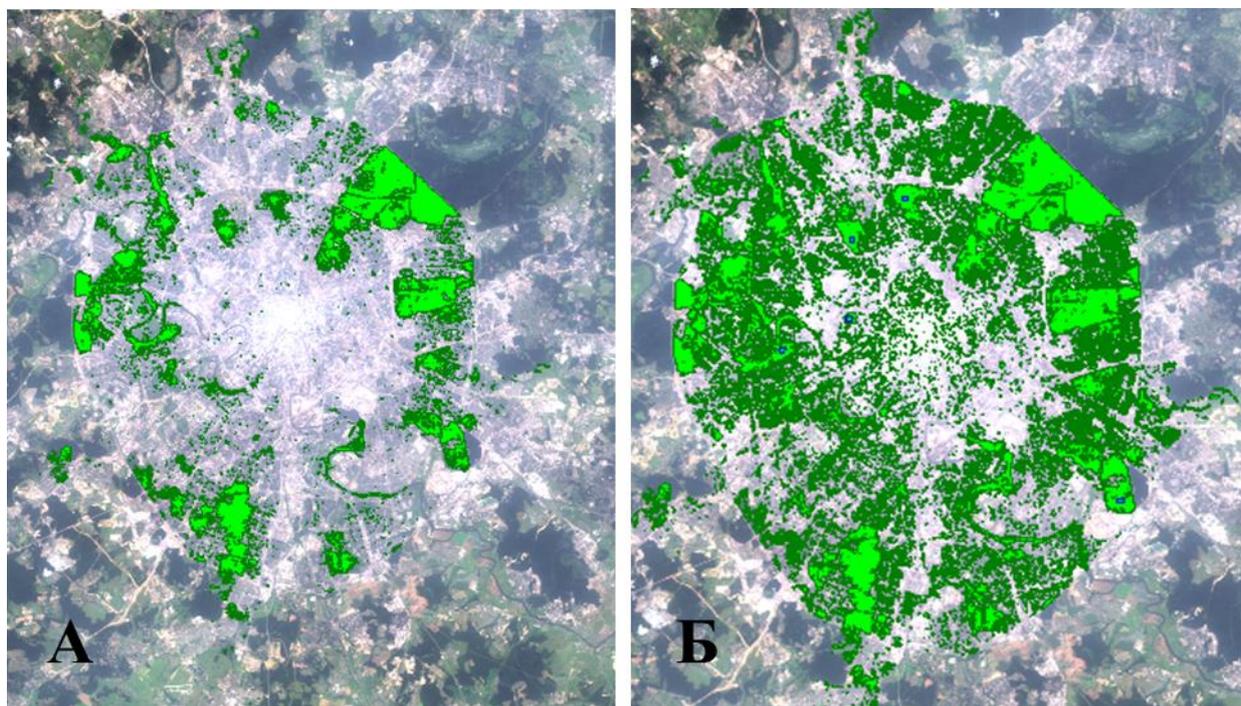


Рис. 3.6 Результаты автоматической классификации в программе SIP по данным спутника Landsat 8 на основе синтеза каналов 5, 4, 3, проведенной по эталонным участкам. *А – эталоны выбраны в глубине плотных древесных насаждений; Б – эталоны взяты в парках преимущественно в центре города с небольшой плотностью древостоя.*

При сравнении этих результатов с получившимся у нас векторным слоем (т. е. созданным вручную шаблоном границ), то очевидна высокая доля совпадений в случае классификации по первому набору эталонных участков. Второй же набор показал малую долю совпадений из-за появления огромного количества мелко-площадных объектов, соответствующих территориям города с озелененной застройкой, например, отдельные междомовые пространства с древесной растительностью. Следует отметить, что и первый вариант не показал достойных результатов, так как мы можем наблюдать присвоение крупным частям Москвы реки статуса растительность из-за цветения речной воды, а мелкие площадные объекты озеленения, проявившиеся, например, на восточной границе города вблизи лесопарка Измайлово, будут мешать анализу и, скорее всего, вносить ошибки при расчете интенсивности

«островов холода». Сделав выводы из всего вышесказанного, мы решили продолжать исследовать охлаждающий эффект лесопарков по составленному нами с высокой точностью и, как следствие, более достоверному векторному слою.

После составления и утверждения границ парковых зон, по данным каждого пригодного для анализа снимка за период с 2008 по 2018 гг., была рассчитана величина общей интенсивности локальных «островов холода» в Москве (ΔT). Подход к расчету этой величины, также, как и в случае с расчетом интенсивности поверхностного «острова тепла» (I), представленным в главе 2, был двоякий. Значение получалось сначала в среднем по всем имеющимся снимкам, а затем как среднее из «среднесуточных», то есть при наличии снимков с обоих спутников за один и тот же день рассчитывалось среднее из этих двух случаев. Однако, в отличие от случая расчета I , ΔT в обоих вариантах оказалась одинаковой и составила $-1,3$ °C при значении стандартного отклонения в первом случае $\pm 1,0$ °C, а во втором $\pm 0,9$ °C. Заметим, что в работе, проведенной ранее с расчетами по более короткому сроку с 2009-2013 гг., это значение составляло $-1,4$ °C $\pm 1,2$ [42]. Отрицательный знак этой величины говорит об охлаждающем, как правило, влиянии парков. Иначе говоря, городские леса и парки в среднем холоднее остальной территории города (865 км²).

Что касается минимальных и максимальных значений ΔT , полученных по результатам разных расчетов, то они несколько отличаются. Максимальный охлаждающий эффект парков по отдельным снимкам достигает $-4,4$ °C 28.05.2018 г., в то время как согласно «среднесуточным» значениям за 02.07.2010 г. оно на 0,1 меньше ($-4,3$ °C). Следует отметить, что случаи со значениями интенсивности менее -4 °C встречаются крайне редко. За весь одиннадцатилетний период их насчитывается всего 5 из 747 по данным отдельных снимков, а в среднем по данным обоих спутников такая ситуация отмечена всего единожды.

Интенсивность поверхностных локальных «островов холода» иногда может быть положительной, то есть в среднем температура поверхности всех парков может оказаться выше, чем температура окружающей их городской среды. Зафиксирован всего 21 случай положительного ΔT , минимальное значение охлаждающего эффекта при этом достигается 11.11.2008 г. и составляет $+0,5$ °C. Заметим, что именно в этот день интенсивность «острова холода» была положительной и по данным обоих спутников в среднем ($+0,3$ °C). Однако в 6 случаях интенсивность очень близка к нулю (то есть составляет от 0 до $+0,1$). В выборке «среднесуточных» значений положительная интенсивность «острова холода» встречается 12 раз с максимальным значением $+0,3$ °C, достигнутым помимо прочего еще и 19.12.2008 г. Следует отметить, что за ноябрь-декабрь 2008 года таких случаев наблюдается максимальное количество. Скорее всего, это связано с тем, что постоянный снежный покров на территории Москвы в этом году не устанавливался вплоть до 20-х чисел декабря.

Рассмотрим количество случаев положительного значения интенсивности «островов холода» по месяцам (табл. 3.3). Данные таблицы показывают, что положительные значения ΔT в среднем для всех

28 парков могут проявляться в холодное время года, что подтверждается литературными данными и было описано выше. Особенно этот эффект усиливается при отсутствии устойчивого снежного покрова на территории города поздней осенью или в начале зимы. При этом открытая городская поверхность в виде бетона и асфальта очень быстро выхолаживается, а кроны хвойных деревьев продолжают выделять некоторое количество тепла. В середине же зимы и начале весны все случаи за исключением 19.01.2011 г. были связаны с безоблачной погодой, малыми скоростями ветра и кратковременными оттепелями. Именно в дни с наблюдаемым положительным значением ΔT происходит переход температуры воздуха через 0°C . Судя по всему, такие условия ведут к прогреванию верхней границы кроны деревьев.

Табл. 3.3 Количество зафиксированных по данным отдельных снимков положительных значений интенсивности локальных «островов холода» за период 2008-2018 гг. по отдельным месяцам

Месяц	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Количество зафиксированных положительных значений ΔT	5	1	2	0	0	0	0	0	0	2	7	4

Помимо этого, зафиксировано 19 случаев, когда интенсивность «островов холода» была отрицательной, но очень близкой к 0, то есть находилась в диапазоне значений от $-0,1$ до 0°C . Все эти случаи характерны лишь для зимы и осени, а также ранней весны.

Не менее важной характеристикой «островов холода» являются среднесезонные значения интенсивности. Различия между ними явно отражают закономерности изменения параметра ΔT в течение года в зависимости от смены погодных условий. Результаты расчетов представлены в табл. 3.4.

Табл. 3.4 Среднесезонные значения интенсивности локальных «островов холода» в парках Москвы за 2008-2018 гг.

Сезон года	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Стандартное отклонение по выборке, $^\circ\text{C}$
зима	-0,5	0,4
весна	-1,5	0,8
лето	-2,3	0,7
осень	-0,7	0,6

Как и следовало ожидать, минимальный охлаждающий эффект проявляется в зимнее время при отсутствии вегетации у лиственных пород деревьев, а максимальное летом в период их наибольшей вегетационной активности. Заметим также, что разброс значений в зимнее время минимален (стандартное отклонение $\pm 0,4^\circ\text{C}$). Это объясняется в большей степени однородностью условий в это время года. Наибольшая величина стандартного отклонения наблюдается весной. Условия в начале весны (март)

наиболее близки к зимним, в то время как в конце (май) они наиболее приближены к летним. Однако среднеквадратичное отклонение значений ΔT в другие сезоны (лето и осень) меньше весеннего значения всего на 0,1 и 0,2 °С соответственно.

Не менее интересно рассмотреть годовой ход среднемесячных значений интенсивности. Для всего объема данных за период с 2008 по 2018 гг. эти значения рассчитывались как средние из выборки всех имеющихся за месяц значений ΔT для всей территории 28 лесопарковых зон.

Из табл. 3.5 видно, что максимальная разность в температуре поверхности внутри всех парков и остальной части города наблюдается в июне и составляет $-2,7 \pm 0,7$ °С. Наименьшее охлаждение парков наблюдается в ноябре, когда разница в температурных условиях между городской поверхностью и поверхностью парков минимальна (ΔT равно $-0,2 \pm 0,4$ °С), так как снежный покров еще отсутствует, а листвы уже давно нет. Как говорилось выше, именно в этом месяце чаще всего наблюдаются положительные значения интенсивности «островов холода». В целом в зимние месяцы значения ΔT практически одинаковы. От апреля к маю и от августа к сентябрю происходит резкий скачок значений на 0,8 °С в обоих случаях.

Табл. 3.5 Среднемесячные значения интенсивности локальных «островов холода» в лесах и парках Москвы по данным за 2008-2018 гг.

Месяц	ΔT , °С	Стандартное отклонение по выборке
январь	-0,5	0,3
февраль	-0,5	0,3
март	-0,8	0,5
апрель	-1,3	0,6
май	-2,1	0,6
июнь	-2,7	0,7
июль	-2,3	0,8
август	-2,1	0,6
Сентябрь	-1,3	0,4
октябрь	-0,5	0,3
ноябрь	-0,2	0,4
декабрь	-0,4	0,4

Хотелось бы отметить, что с наращиванием выборки некоторые среднемесячные значения сильно изменились. Так, по данным представленным в [42], за период 2009-2013 гг. максимальное охлаждение наблюдалось в июле, а не в июне, и составляло $-3,3$ °С, что на целый градус сильнее, чем представлено в табл. 3.5. Такая же ситуация сложилась со среднемесячным значением апреля, где охлаждающий эффект по сокращенной выборке был сильнее, нежели по имеющейся сейчас выборке с 2008 по 2018 гг. Это может быть связано с тем, что за короткий пятилетний период времени обеспеченность снимками в различные месяцы была гораздо меньше. Это могло привести к большему влиянию эпизодических

максимумов и минимумов в общей выборке. Однако объем выборки снимков уже достаточно велик и дальнейшее ее увеличение не должно приводить к серьезным смещениям оценок.

Анализ температурных матриц показал, что температура поверхности внутри крупных парков гораздо ниже, чем на границах парков с городской средой. На рис. 3.7 приведены примеры температурных разрезов, проведенных примерно посередине лесопарка Лосинный остров с севера на юг и с запада на восток. Построены эти разрезы по расчетной матрице температуры поверхности внутри парков и остальной части города 31.05.2016 г.

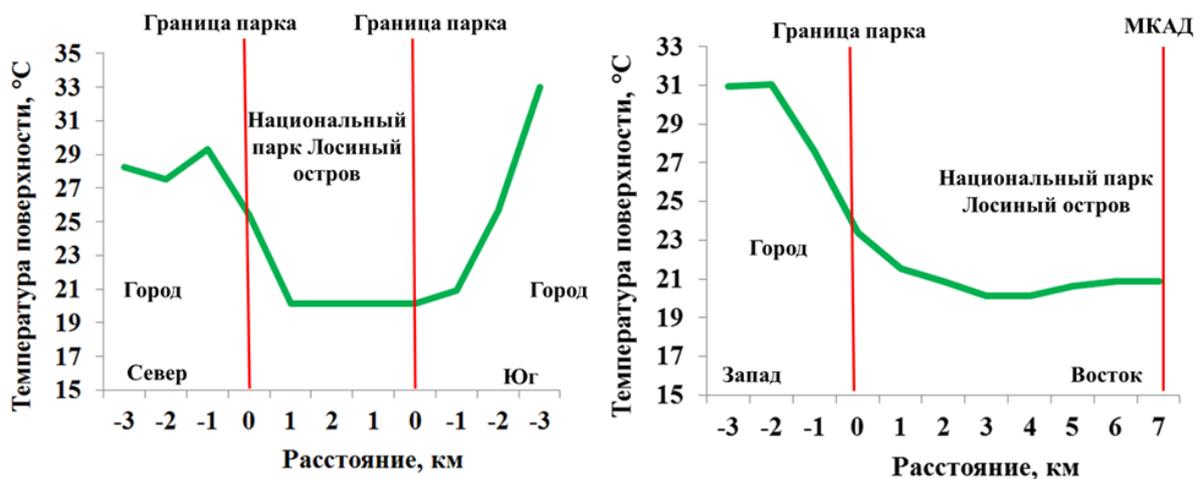


Рис. 3.7 Температурные разрезы через территорию парка Лосинный остров 31.05.2016 года с севера на юг (слева) и с запада на восток (справа). По оси X отмечено расстояние (номер пикселя) от точки отсчета, то есть границы лесопарка, которая показана красной вертикальной линией.

По оси X отложено расстояние в километрах. За ноль взяты границы парка, и отсчет расстояния ведется от них как в глубину парка, так и за его пределы. В случае разреза, проведенного с запада на восток, мы имеем только одну границу парка, так как на востоке вся огромная площадь Лосиногостовского острова, простирающаяся за пределы города, разделяется линией МКАД. В итоге мы можем увидеть резкий скачок температуры поверхности на границе город-парк с ее последующим уменьшением на расстоянии до 1 км в случае движения с севера на юг и до 3 км при движении с запада на восток.

Разницу в перепадах температуре на границе город-парк очевидно можно объяснить тем, что при пространственном разрешении снимков в 1 км на пограничных пикселях парковых территорий и городской застройки при осреднении температуры внутри них должны возникать краевые эффекты. Границы расчетных областей лесопарков включают в себя участки с разным типом поверхности. Программа определяет тот или иной квадрат (единичный пиксель) расчетной сетки как парковый, если доля площади реального парка в созданном нами векторном слое превышает 50 % от площади квадрата. Таким образом, существенная часть такого квадрата на поверку занята приграничными территориями вблизи границы парка, что приводит к проникающему влиянию города. В результате, температура поверхности на краевых пикселях границ парковых территорий смещена в сторону более высоких значений.

После обнаружения этого явления нам стало интересно, насколько возрастет интенсивность «островов холода» при учете только внутренних частей парков. Внутренние расчётные квадраты (пиксели), окружённые со всех сторон тоже лесопарковыми соседними пикселями, должны быть свободны от влияния краевого эффекта, и оценки температуры поверхности в них не являются смещенными. Иначе говоря, совокупность подобных внутренних пикселей представляет собой сравнительно «чистые» зеленые зоны. Было принято решение выделить из общей площади парков пиксели только внутренней их части. Данный эксперимент проводился на уменьшенной выборке снимков за период 2008-2014 гг. Из общего числа пикселей (130), относящихся к парковым территориям, было выделено 15 «внутренних» квадратов площадью 1 км², соответствующих одному пикселю на снимке: 11 – в Лосином острове, 3 – в Измайлово и 1 – в Битцевском парке. Все же остальные лесопарки столицы с шагом сетки в 1 км не имеют внутренних площадей без проявления краевых эффектов (рис. 3.8).

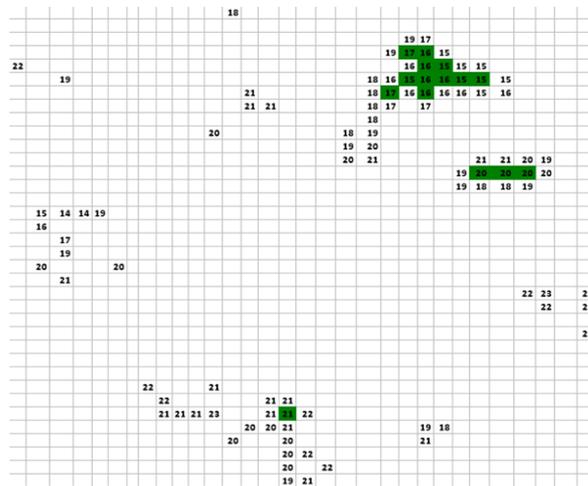


Рис. 3.8 Расчетная матрица температуры поверхности парковых территорий. Зеленым цветом отмечены «внутренние» квадраты.

Интенсивность «островов холода» в данном случае рассчитывалась как разность средней температуры поверхности внутри этих «зелёных» квадратов и всей остальной части города, не имеющей крупных по площади древесных насаждений, то есть

$$\Delta T_3 = T_3 - T_r, \text{ где } (9),$$

Где ΔT_3 - интенсивность «острова холода» создаваемая центральной частью крупных парков; T_3 – средняя температура поверхности центральных «зеленых» пикселей в расчетной сетке парков; T_r – тот же параметр, что и в формуле 8.

Итак, средняя за период с 2008 по 2014 гг. интенсивность «островов холода» внутренней части парков, как и следовало ожидать, оказалась по модулю на 1 °С выше средней для всех имеющихся парков. Её значение составило -2,4 °С при стандартном отклонении 1,8 °С. Это подтверждает, что внутренние части парков гораздо холоднее пограничных, на которых может проявиться проникающее воздействие

окружающей городской среды или, в дополнение, эффект смещения оценок температуры поверхности внутри пограничного пикселя из-за учета различных видов поверхности внутри него.

Наибольшее значение охлаждающего эффекта внутренней части парков по всей выборке снимков составило $-8,0$ °C 30 июня 2010 г. Нужно отметить, что интенсивность «островов холода» внутренней части крупных парков в 108 из 456 случаев имеет значение менее -4 °C, в то время как для территории всех парков это лишь несколько уникальных случаев максимального охлаждения. Кроме всего прочего, в 16 случаях было зафиксировано охлаждающее влияние внутренней части парков со знаком более 6 °C, а в двух случаях из 16 это значение превысило по абсолютной величине даже 7 °C в июне 2010 и 2011 годов.

С другой стороны, происходит не только усиление охлаждения на территории внутри парков, но и усиление их отепляющего эффекта. Так, внутрипарковые территории в холодный сезон года (с октября по март) по данным отдельных снимков оказались теплее окружающей городской среды вплоть до значения интенсивности $+1,2$ °C (11.11.2008 г.), что в 4 раза выше этого показателя для всей территории лесопарков Москвы. По данным трех снимков, включая этот случай, интенсивность «островов холода» была положительной и достигла значения выше 1 °C. Вообще, положительные значения интенсивности наблюдаются по данным 22 снимков за те же дни, что и в случае со всеми парковыми зонами, но с более сильным проявлением. Исходя из этого, можно сделать вывод, что отсутствие постоянного снежного покрова и наступление оттепелей приводят к увеличению температуры внутри парковых зон, причем чем глубже в лес, тем сильнее.

Интенсивность «островов холода» в городе имеет четко выраженный годовой ход как в случае со всеми парками столицы, так и по данным о температуре поверхности только внутренней части крупных лесопарковых зон (рис. 3.9).

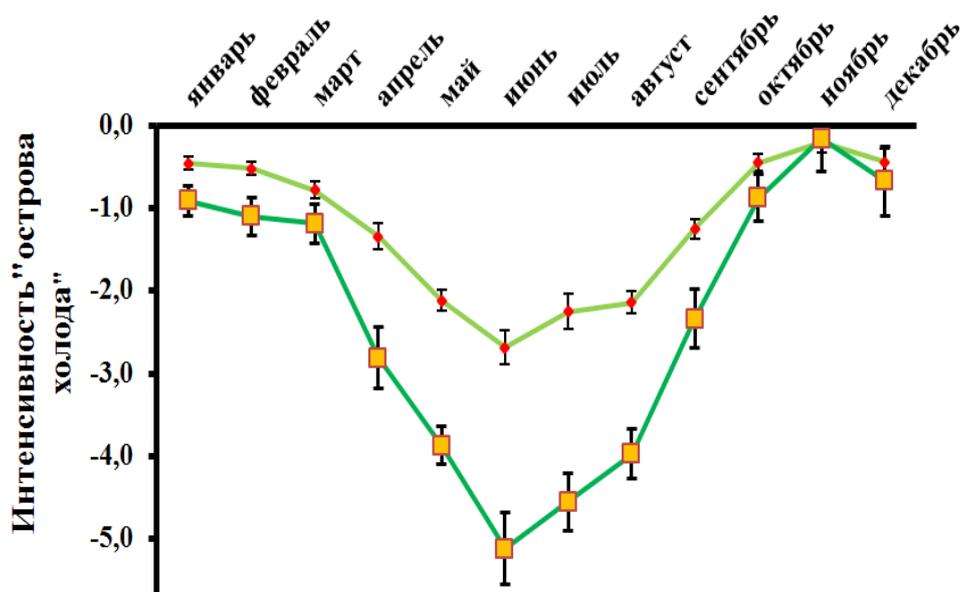


Рис. 3.9 Годовой ход интенсивности поверхностных «островов холода» в московских лесах и парках. Темно-зеленая линия с желтыми квадратами отображает условия внутренней части парков, светло-зеленая с красными кружочками — средние условия для всех 28 парков Москвы, площадью не менее $0,5$ км². Доверительные интервалы построены с учетом уровня значимости $0,05$.

Для каждого из месяцев было рассчитано среднее значение интенсивности – как для общей площади всех парков (светло-зеленая линия с красными кружочками), так и только для внутривпарковых территорий с исключением пограничных зон крупных лесопарков (темно-зеленая линия с желтыми квадратами). На графике видно, что, как и ожидалось, охлаждающий эффект (т.е. отрицательные значения интенсивности «островов холода») внутренних территорий лесопарков практически во все месяцы года больше (за исключением ноября, где значения интенсивности в обоих случаях одинаковы и составляют $-0,2$ °C), нежели у всей территории парков.

Исходя из данных, представленных на рис. 3.9, можно сделать вывод, что различия интенсивности «островов холода» между теплым и холодным временами года в обоих случаях значимы с доверительной вероятностью 0,95. С другой стороны, среднемесячные значения в июне-июле и с октября по март близки. По данным космических снимков интенсивность «островов холода» имеет наибольшие абсолютные значения в основном в теплый период года (с апреля по сентябрь). В среднем для этого полугодического периода она составляет $-2,0$ °C для всех парков и $-3,8$ °C для внутренней их части. В обоих случаях максимальное по модулю среднемесячное значение интенсивности достигается в июне и составляет $-2,7$ и $-5,1$ °C, соответственно. Следует отметить, что практически во все месяцы охлаждающий эффект во внутренней части крупных парков практически в два раза сильнее, чем с учетом всей площади парков ($124,5$ км²).

Наименьшее охлаждение от парков наблюдается в холодный сезон года с октября по март. Минимальное же значение интенсивности (а именно близкое к нулю), в обоих случаях наблюдается в ноябре. Заметим, что в более ранних работах [42] по данным космических снимков за более короткий период 2009-2014 ноябрьское значение интенсивности для условий всей территории парков в среднем было даже слабо положительным ($+0,3$ °C). Однако, скорее всего, это объяснялось очень маленькой выборкой снимков, пригодных для анализа за этот месяц в укороченном ряду данных. Все же остальные месяцы холодного сезона года имеют очень близкие друг другу значения от $-0,4$ °C в декабре до $-0,8$ °C в марте для условий всех парков в целом, и от $-0,7$ до $-1,2$ °C в те же месяцы для внутренней части парков.

Такие изменения в годовом ходе интенсивности локальных «островов холода» были вполне ожидаемы и легко объяснимы. Главной причиной, судя по всему, является наличие эффекта транспирации влаги с поверхности листьев древесной растительности и различиями в объемах активной биомассы от месяца к месяцу. Быстрый рост ΔT и ΔT_z , наблюдаемый с марта по май связан со сходом устойчивого снежного покрова и появлением первой растительности. Усиление охлаждения от мая к июню также резкое и, скорее всего, связано с ростом поверхности отдельных листьев широколиственных пород, которые в большей степени распространены в парках Москвы. Достигнув в этом месяце максимума продуктивности, древесные породы постепенно начинают увядать, уменьшая фотосинтетическую активность, что и приводит к плавному уменьшению интенсивности в последующие летние месяцы. Далее мы наблюдаем резкое уменьшение охлаждающего эффекта в сентябре, что связано

с началом листопадного периода. Зимой же различия между городской и парковой средами минимальны. Как уже говорилось выше, наличие устойчивого снежного покрова при отсутствии листвы и вегетационной активности у растительных сообществ приводит к минимизации различий в тепловом балансе парковых зон и остальной части города, сводя их на нет, вследствие чего интенсивность «островов холода» становится близкой к нулю.

3.2.3 Интенсивность «островов холода» отдельных лесопарков Москвы.

На предыдущих этапах работы из общей матрицы температуры поверхности внутри парков нам удалось выделить только 8 четко локализованных и отдельно отстоящих друг от друга парков. К ним относятся: Лосиный остров вместе с парком Сокольники, Измайловский, Битцевский, Кузьминки, Рублёвский и Царицыно, а также лесопарк Алёшкинский лес и самая маленькая зона зеленых насаждений – Ваганьковское кладбище. Для них было рассчитано среднее значение интенсивности «острова холода», построен годовой ход и оценены различия между отдельными парками [42].

В процессе работы были получены данные о температуре поверхности внутри каждого отдельного парка за последние три года (2016-2018 гг.). Это позволяет нам оценить различия, вызванные размером парка, его положением по отношению к застроенным частям города, породным составом и плотностью древостоя.

За период 2016-2018 гг. количество пригодных снимков для территории Москвы составило 185 с достаточной обеспеченностью в разные сезоны и даже в отдельные месяцы. Однако, снимки с абсолютно безоблачными условиями и отсутствием дымки в центральной части города достаточно редки. От снимка к снимку может быть закрыта облаками то одна, то другая часть города. Это привело к различной обеспеченности данными для каждого из 28 парков. Так, например, максимальное из всех число снимков, на которых проявился тот или иной парк, было получено для Битцевского парка и составило 179 из 185 возможных, а минимальное - для Братцевского парка, расположенного на северо-западе города, и составляет всего 54 снимка. В связи с частым наличием дымки в центральной части города зеленая зона Ваганьковское кладбище также проявилось в очень малом количестве снимков (всего 59). Именно по этой причине построить годовой ход интенсивности локальных «островов холода» некоторых отдельных парков невозможно при данном объеме выборки. Однако, даже такого количества данных достаточно для оценки средних значений и выявления зависимостей различного характера.

Было рассчитано среднее значение интенсивности индивидуальных локальных «островов холода». Этот показатель рассчитывался как разность средних температур поверхности внутри отдельного парка и всей остальной части города, не имеющей крупных по площади и размерам зеленых зон. Значения средней по всей выборке интенсивности локальных «островов холода» для отдельных парков приведены в табл. 3.6. Как можно увидеть, наибольший эффект охлаждения создает парк Лосиный остров – наибольший по площади и представляющий собой нетронутый девственный лес с преобладанием

хвойных пород. Значение этого параметра здесь составило $-2,2$ °С. Минимальное охлаждение и даже положительные значения ΔT оказались у трех парков – Кузьминского кладбища, Нескучного сада и Ваганьковского кладбища, последнее из которых является самой маленькой по своей площади из рассмотренных зеленых зон. Основная часть парков имеет интенсивность «острова холода» в диапазоне от $-1,5$ до $-0,5$ °С. Заметим, что за эти три года интенсивность, рассчитанная для всей территории парков, составила $-1,3$ °С.

Табл. 3.6 Интенсивность локальных «островов холода» в отдельных парках по данным космических снимков за период 2016-2018 гг.

Парк	ΔT , °С	Парк	ΔT , °С
Лосиный остров	-2,2	Парк сельскохозяйственной академии им. Тимирязева	-0,6
Серебряный бор	-1,9	Парк Кузьминки	-0,6
Парк Тёплый стан	-1,5	Востряковское кладбище	-0,6
Рублёвский парк	-1,5	Ботанический сад	-0,5
Битцевский парк	-1,4	Алешкинский лес	-0,5
Измайлово	-1,4	Парк Чертаново	-0,4
Лианозовский питомник	-1,2	Филёвский парк	-0,3
Парк Восточное Измайлово	-1,1	Химкинский лесопарк	-0,3
Парк Царицыно	-1,1	Парк Кусково	-0,2
Лесопарк Тропарево	-0,9	Парк Лианозово	-0,1
Братцевский парк	-0,8	Парк Воробьевы горы	-0,1
Парк Покровское-Глебово	-0,7	Кузьминское кладбище	0,4
.Обручёво	-0,7	Нескучный сад	0,4
Бутовский лесопарк	-0,6	Ваганьковское кладбище	0,9

Разброс значений интенсивности внутри парков очень разнообразен и меняется в широких пределах. Так, например, самое высокое по модулю значение интенсивности индивидуального «острова холода» наблюдается у парка Серебряный бор. Это беспрецедентное значение охлаждения показало разность между городом и парковой территорией в $9,2$ °С отмеченную 30 апреля 2017 года. В этот день парк Серебряный бор оказался холоднее всех других парковых территорий почти на 7 °С. Второе по величине значение интенсивности «острова холода» было достигнуто в Бутовском лесопарке 09.05.2018 г. и составило $-8,2$ °С. Для этих же парков наблюдается самая большая разность между максимальным и минимальным эффектом охлаждения. Самое маленькое максимальное охлаждение характерно для Ваганьковского кладбища. В то время как во всех остальных парках максимум охлаждения приходится на значения выше $-2,4$ °С, то для такой специфической зеленой зоны как Ваганьковское кладбище максимум охлаждения составил всего $-0,9$ °С.

Удивительно, что некоторые парки по данным отдельных снимков оказываются гораздо теплее остальной части города. Например, парк Серебряный бор, второй в ряду самых холодных, 30 апреля 2017 года и 29 ноября 2018 года показал самое высокое положительное значение интенсивности, достигшее

+4,5 °С. Этот парк был теплее окружающего его города по данным 28 снимков из 154, на которых проявился этот парк. Минимальное из самых высоких положительных значений наблюдается в природном лесу Лосиный остров и составляет всего +0,4 °С.

Для каждого из парков была произведена попытка проанализировать годовой ход среднемесячных значений интенсивности локальных «островов холода». Для 9 парков (Лианозовский, Братцевский и Чертановский парки, парк Восточное Измайлово и Обручево, а также Лианозовский питомник, Химкинский лес и Нескучный сад) не удалось построить достоверный годовой ход, так как в отдельные месяцы пригодных для анализа снимков территории парка было недостаточно или они отсутствовали вовсе.

Каждый из парков, для которых набор данных был достаточно полным, отличается своими особенностями годового хода охлаждающего эффекта. Особенно различия проявляются в момент, когда интенсивность «острова холода» достигает своего максимума, то есть в июне (для некоторых парков в июле). На рис. 3.10 приведены примеры графиков годового хода ΔT для трех различных по величине парков (Лосиный остров – самая большая зеленая зона столицы, которая вместе с парком Сокольники в границах МКАД имеет площадь 36,6 км², Измайлово – второй по величине парк Москвы 13,1 км² и парк Царицыно, имеющий средние размеры площадью 4,6 км²).

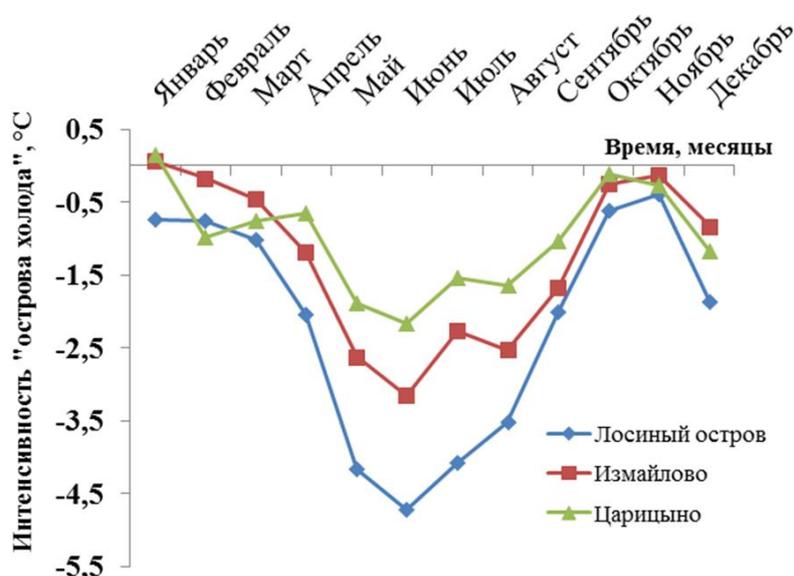


Рис. 3.10 Годовой ход среднемесячных значений интенсивности «острова холода» в трех, различных по размеру парках Москвы (Лосиный остров – синяя линия; Измайлово – красная и парк Царицыно – зеленая)

Как мы можем увидеть, парк Лосиный остров в течение всего года имеет более высокие значения интенсивности, чем два других представленных на графике парка, и не имеет положительных или близких к нулю значений интенсивности. Этот парк проявился на 174 из 185 возможных снимков с достаточной обеспеченность в каждый отдельный месяц года. Благодаря этому годовой ход плавный без резких скачков и в целом повторяет годовой ход среднего значения интенсивности для всех парковых

зон. А вот про парки Измайлово и Царицыно такого сказать нельзя. Несмотря на то, что они проявились на достаточно большом количестве снимков, годовой ход все же неровный. Минимальные значения охлаждения трех парков наблюдаются в октябре и ноябре, а также с января по март. Максимум охлаждающего влияния для этих парков наблюдается в июне со средними значениями $-4,7$, $-3,2$ и $-2,2$ °С соответственно для Лосиног острова, Измайлово и Царицыно.

Удивляет резкое усиление охлаждающего эффекта этих трех парков в декабре, что отличается от графика на рис. 3.9. Это может быть вызвано малым размером выборки данных: ведь за три года в декабре оказались пригодными к анализу всего 7 снимков, причем за декабрь 2017 года не было вообще ни одного. Также на двух последовательных снимках, полученных со спутников Terra и Aqua 16.12.2016 г., значение интенсивности «острова холода» для этих трех парков было очень велико и в случае с парком Лосиный остров доходило до значения весенних месяцев.

Все из рассмотренных парков большую часть года оказались холоднее городской территории за исключением двух зеленых зон. Это Ваганьковское кладбище и Нескучный сад. Эти две зеленые зоны оказались теплее окружающей городской территории практически в течение всего года, за исключением января и октября в случае с Ваганьковским кладбищем ($-0,1$ °С) и апреля, сентября и октября в случае с Нескучным садом ($-2,5$; $-0,2$ и $-0,5$ °С соответственно). Правда, значение ΔT в апреле для парка Нескучный сад не показательно, так как оно получено по данным всего одного снимка. То же самое касается месяцев, когда интенсивность «острова холода» Ваганьковского кладбища достигает максимального положительного значения (июнь и июль). В целом он имеет вид схожий с годовым ходом «острова тепла», а не «острова холода».

Это можно увидеть на рис. 3.11, где представлен график годового хода ΔT для данной зеленой зоны и среднего значения для всех парков Москвы.

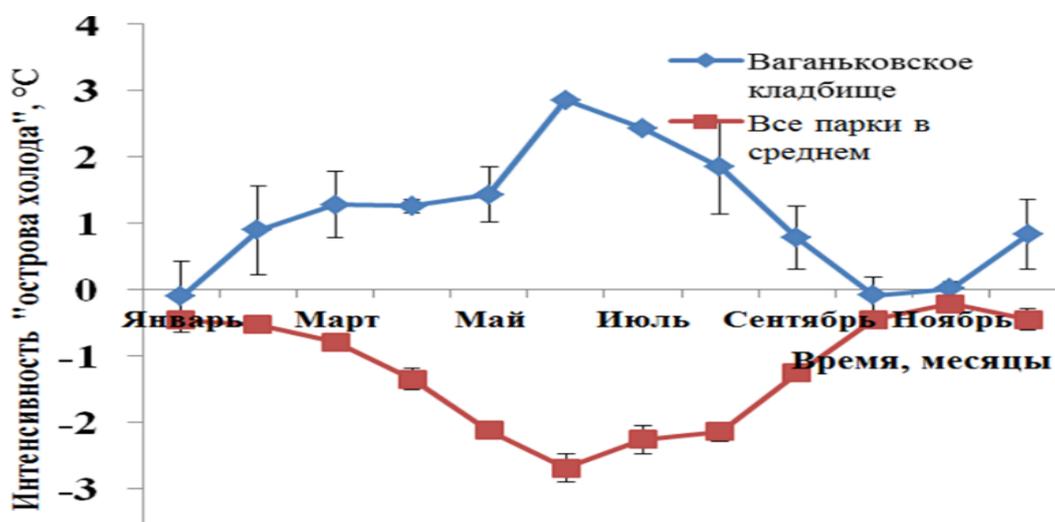


Рис. 3.11 Годовой ход значений интенсивности поверхностного локального «острова холода» в парке Ваганьковское кладбище (синяя линия) и в целом для всех парков (красная). Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 0,95

Эти два графика имеют разнонаправленный ход. Получается, что Ваганьковское кладбище является даже некоторым «островом тепла» по сравнению с основной частью города, не имеющей крупных зеленых насаждений. Как показывают доверительные интервалы, построенные с уровнем значимости 0,05, данная зеленая зона во все месяцы, кроме января, октября и ноября, теплее городской среды. Это может быть вызвано несколькими причинами.

Во-первых, Ваганьковское кладбище располагается в пределах Садового кольца в центре города с высокой степенью застройки территории. Температура городской поверхности здесь наибольшая в городе, что и проявляется как проникающее воздействие на территорию этого маленького по площади парка. Во-вторых, площадь данной парковой зоны 0,5 км², что составляет всего половину площади пикселя. В результате за температуру в парке автоматическая программа принимает среднее между температурой поверхности самого парка и городской застройки вблизи него. Это, естественно приводит к завышению значений, так как такой маленький парк не может при осреднении перевесить мощное температурное воздействие своего окружения. Третья же причина может заключаться в специфике самого парка. Это своего рода мемориал, где среди деревьев и под их кронами преобладают бетонные и гранитные поверхности памятников. Они сильнее нагреваются в точности так же, как и любая другая городская поверхность, превосходя эффект затенения и охлаждения от древесной растительности. В общем, такое поведение температуры поверхности внутри данного парка вызывает сомнения в выборе его в качестве одной из зеленых зон Москвы. Однако, на данном этапе мы не можем оценить вклад названных причин в общее повышение значений температуры поверхности в этой зеленой зоне. Остается неясным, в какой степени они связаны с проникающим воздействием окружающих теплых районов города, то есть отражают реальный физический процесс, а в какой степени являются следствием неоднородности расчетных ячеек, включающих в себя это кладбище.

Полученная картина годового хода различных парков подтверждает, что интенсивность поверхностных «островов холода» может зависеть от нескольких параметров, таких как площадь парка, его древесный состав и продуктивность, а также плотность древостоя и степень сомкнутости крон. Рассмотрим далее взаимосвязи параметра ΔT с площадью парка, вегетационным индексом (NDVI) и средней площадью листовой поверхности (LAI).

3.2.4 Площадь парка и интенсивность поверхностного локального «острова холода».

На данном этапе работы рассмотрена взаимосвязь интенсивности «острова холода», создаваемого парком и его площади. При обсуждении годового хода параметра ΔT для парков разных размеров (большого, среднего и маленького), приведенного на рис. 3.10, мы заметили, что их охлаждающее влияние, особенно в летний период времени, значительно отличается друг от друга (при сравнении максимального охлаждения от лесопарка Лосиный остров и парка Царицыно оказалось, что первый имеет интенсивность «острова холода» практически в 2-3 раза выше последнего).

Для всех 28 парков была построена кривая зависимости значений интенсивности «острова холода» от его площади. На рис. 3.12 представлены результаты расчетов.

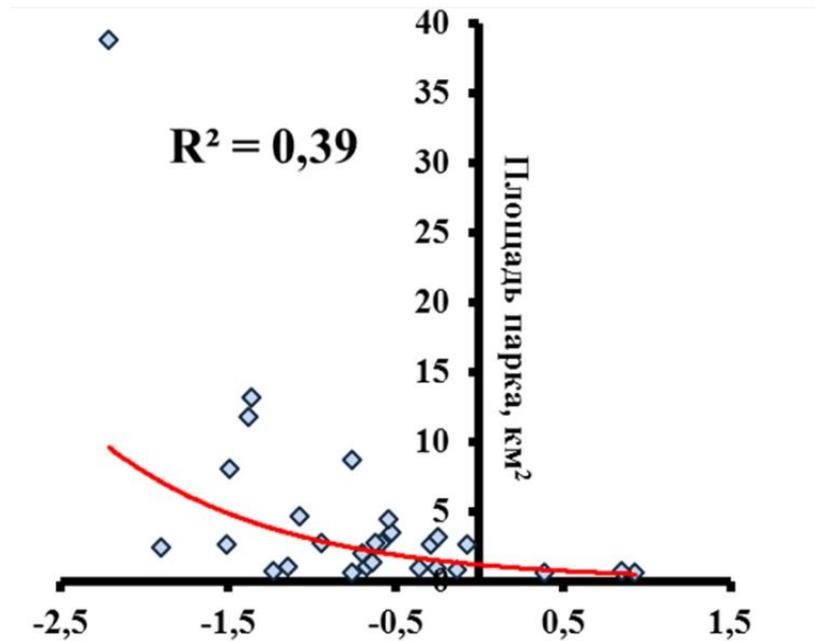


Рис. 3.12 Зависимость интенсивности локальных «островов холода» от площади парка

Как можно увидеть, была выявлена очевидная взаимосвязь между этими параметрами: чем больше площадь парка, тем более сильное охлаждающее влияние он оказывает. Однако, скорее всего, площадь - это в большей степени косвенный показатель, указывающий на то, что крупные парки имеют большую плотность зеленых насаждений, высокую степень сомкнутости крон и, как правило, большую продуктивность и биомассу растительного сообщества. Это подтверждается, например, тем, что 4 парка с различной площадью имеют приблизительно одинаковое значение интенсивности «острова холода» в районе $-1,5^{\circ}\text{C}$. С другой стороны, в наиболее малых по размеру парках древесная растительность обычно разрежена. Точных количественных оценок плотности зеленых насаждений в распоряжении авторов нет, но ниже будут приведены оценки зависимости интенсивности «острова тепла» от вегетационного индекса NDVI, который косвенно связан с количеством биомассы в сообществе.

Однако и сама по себе площадь также имеет значение: очевидно, что проникающее извне тепловое влияние окружающего города сильнее сказывается на маленьких парках, нежели на больших. Заметим, что данная связь, описанная обратной экспонентой, статистически достоверна, поскольку стандартный показатель достоверности R^2 , равный квадрату коэффициента корреляции, составляет 0,39. Как известно, статистическая зависимость обычно считается достоверной и устойчивой, если $R^2 > 0,3$. Сам же коэффициент корреляции, точнее корреляционное отношение для случая нелинейной связи, равен 0,62. Стоит отметить, что при учете только восьми парков в работе [42] связь была близка к линейной, а при

добавлении остальных склонилась к логарифмической. Это еще раз подтверждает косвенность параметра площади.

Как уже отмечено, самое большое среднее значение ΔT имеет природный лес Лосиный остров, в то время как самое маленькое, даже в среднем положительное, свойственно трем малым зеленым зонам (Ваганьковскому кладбищу, Кузьминскому кладбищу и Нескучному саду), площадь которых не превышает 0,7 км².

Наиболее тесные связи, скорее всего, будут выявлены при сравнении интенсивности «острова холода» и значения вегетационного индекса, а также для площади листовой поверхности, полученными также по данным дистанционного зондирования Земли спутниками Terra и Aqua. Подобная зависимость подтверждается не только для парков Москвы, но и для других территорий мира, например, для парковых зон города Нагойя, Япония. Авторы работы [50] проводили анализ охлаждающего влияния парков различной конфигурации и площади на территории города на примере отдельных снимков со спутников ASTER и IKONOS в разные сезоны года. На территории города были выделены 92 парковые зоны различной площади от 0,1 га до значений более 10 га (всего 3 парковые зоны). Самый большой парк имел площадь 41,9 га. Интенсивность «островов холода» при этом для каждого парка рассчитывалась как разность между средней температурой поверхности в 500-метровой буферной зоне городской застройки вокруг парка и средней температуры внутри парковой зоны. При этом максимальных значений данный параметр достигал, как и в нашем, случае летом (+1,3 °С в среднем для всех парков), а минимальных осенью (+0,4 °С). Примечательно, что, по данным отдельных осенних снимков, большинство парков площадью вплоть до 2 га также оказались теплее окружающей их городской среды, а парки размером от 1 до 2 га даже в среднем по всем осенним снимкам. Что касается взаимосвязи интенсивности «островов холода» с площадью парка, то наилучшим образом она проявилась для летнего сезона, в то время как осенью связь очень слабая. Авторами данной работы сделан аналогичный нам вывод, что чем больше площадь парка, тем более сильный охлаждающий эффект он оказывает.

3.2.5 Вегетационный индекс NDVI и интенсивность поверхностных «островов холода».

В настоящее время, при развитии дистанционных методов зондирования земной поверхности, их начали применять в совершенно разных областях науки. Появилось понятие вегетационных индексов, позволяющих оценивать состояние растительных сообществ на территории всего Земного шара.

Как говорилось выше, растительный покров отличается высокой степенью отражения и поглощения в различных частях электромагнитного спектра, что позволяет оценивать его состояние по данным различных каналов съемки спутниковых систем.

Вегетационный индекс (ВИ) – это показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных дистанционного зондирования и имеющий отношение к

параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность ВИ определяется особенностями отражения; эти индексы выведены, главным образом, эмпирически.

В настоящее время экспериментально предложено около 160 различных вегетационных индексов [63]. Расчет большинства из них основан на использовании двух узких участков спектра: красной (0,62 - 0,75 мкм) и ближней инфракрасной зон (0,75 - 1,30 мкм). Математические операции с этими двумя участками позволяют получить наиболее достоверную и не зависящую от сторонних факторов информацию о состоянии растительности. Это возможно благодаря особенностям физико-химических процессов, происходящих в растительных клетках. Хлорофилл, содержащийся в них, в процессе фотосинтеза имеет высокую поглотительную способность в красной части спектра. С другой стороны, внутренние части листовой пластины имеют очень высокое альbedo по отношению к ближнему инфракрасному диапазону длин волн. Именно отношение поглощения и отражения света в этих частях спектра позволяет четко выделить растительность на космических снимках.

Все многообразие существующих вегетационных индексов разделено на несколько групп по свойству растительности, которое они характеризуют. Вот некоторые из них:

- *Broadband Greenness* (5 индексов): индексы «зелености», рассчитываемые по данным в широких спектральных диапазонах;

- *Narrowband Greenness* (7 индексов): индексы «зелености», рассчитываемые по данным в узких спектральных диапазонах;

- *Light Use Efficiency* (3 индекса): индексы эффективности использования света;

- *Canopy Nitrogen* (1 индекс): индекс содержания азота в растительности;

- *Dry or Senescent Carbon* (3 индекса): индексы содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы;

- *Leaf Pigments* (4 индекса): индексы содержания пигментов – каротиноиды и антоцианины;

- *Canopy Water Content* (4 индекса): индексы для оценки содержания влаги в растительном покрове.

Каждая из перечисленных групп предназначена для оценки определенного свойства растительного покрова. Каждый отдельный индекс имеет свои достоинства и недостатки в описании этого свойства, и поэтому достижение достоверных результатов может быть осуществлено только за счет комбинации этих индексов и сравнения их с полевыми данными.

В настоящей работе для анализа растительного покрова на территории Москвы и изучения охлаждающего эффекта зеленых зон города использовался вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), впервые описанный Rouse B.J. в 1973 г. как простой количественный показатель объема фитомассы [45]. Далее этот параметр начал широко использоваться. Например, в работах С. О. Loss [77] и Р. J. Sellers [93] в 1994 году были получены первые данные о распределении параметра NDVI по всему земному шару. В настоящее же время он широко используется для выделения биологических сообществ внутри ограниченной территории, вычисления различных характеристик растительного покрова и оценки их вариаций во времени (от сезона к сезону или от года к году).

Наибольшую достоверность и интерпретируемость данный индекс получил для предсказания продуктивности сельскохозяйственных угодий [65]. Однако в некоторых работах его используют для выявления корреляций поведения растительного сообщества и климатических показателей (например, изменений температуры воздуха в последние десятилетия) [63].

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) - нормализованный относительный индекс растительности - простой количественный показатель объема фотосинтетически-активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом).

Достоинством этого вегетационного индекса по сравнению со всеми другими является устойчивость к внешним факторам, таким как затенение от облачности и сезонная изменчивость температуры воздуха. Благодаря этому он широко используется для оценки межгодовых изменений в состоянии растительного покрова.

Вычисляется NDVI по следующей формуле:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}), \text{ где} \quad (9)$$

NIR - отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED - отражение в красной области видимой части спектра [63].

Исходя из этого можно сказать, что чем больше разница между отражением в этих двух частях спектра, тем больше хлорофилла содержится в растительности данной территории, и, как следствие, больше биомасса.

Недостатком же данного показателя является внутренняя нелинейность, которая приводит к так называемой асимпатической насыщенности NDVI, что означает деградацию параметра в условиях высокой спектральной яркости купола растительности, то есть при высоком объеме активной биомассы. В основном это проявляется внутри растительных сообществ в экваториальной зоне, где, как известно, сосредоточена основная масса фотосинтезирующей растительности.

Значение индекса - это безразмерная относительная величина, имеющая диапазон значений от -1 до +1. Также измерения могут производиться в процентах или с использованием, так называемой, масштабированной шкалы в диапазоне от 0 до 255 (используется для отображения в некоторых пакетах обработки ДЗЗ, соответствует количеству градаций серого цвета), или в диапазоне 0..200 (-100..100), что более удобно, так как каждая единица соответствует 1% изменению показателя [47].

Значение индекса NDVI достаточно сильно отличается для различных типов поверхностей, но для объектов одного и того же типа оно имеет фиксированные значения, что позволяет проводить независимую классификацию. В табл. 3.7 приведены данные о средних значениях отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра, а также показатели параметра NDVI для различных типов поверхности. Так, например, для растительности NDVI всегда принимает положительные значения со значением более 0,3 в летний период (максимум вегетации), что позволяет достоверно отделить ее от искусственных покрытий. Отрицательные значения характерны для водных объектов снега и льда, а

также для различных видов искусственного покрытия. Открытая почва и облака имеют нейтральные значения, близкие к нулю.

На значения индекса оказывает влияние сомкнутость крон, состояние растительного сообщества, видовой состав, угол наклона поверхности, тип почвы и ее цвет под кронами разреженной растительности (густота менее 30%). Естественно, что значения индекса для различных типов объектов в зимнее время также отличается (рис. 3.13).

Таблица 3.7 Осредненное значение NDVI для различных типов поверхности [100]

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в ближней инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0.1	0.5	0.7
Разреженная растительность	0.1	0.3	0.5
Открытая почва	0.25	0.3	0.09
Облака	0.25	0.25	0
Снег и лед	0.375	0.35	-0.03
Вода	0.02	0.01	-0.33
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0.3	0.1	-0.5



Рис. 3.13 Значение NDVI для различных типов поверхности зимой и летом [45]

По данным зимних снимков в умеренных широтах очень хорошо определяется типология лесов. Так как лиственные леса в осеннее время сбрасывают листву, на зимних снимках по значению NDVI они не отличаются от окружающей их местности и принимают близкие к нулю, а иногда (при наличии устойчивого снежного покрова в пространстве между деревьями и на ветках) даже слабо отрицательные значения. Хвойные же леса даже в зимнее время остаются «зелеными», то есть клетки хлорофилла в них не отмирают. Это приводит к тому, что плотные хвойные насаждения даже зимой могут приобретать значения индекса вплоть до 0,9.

Существует значительная взаимосвязь и корреляция значений индекса с продуктивностью различных биологических сообществ. За счет широкого пространственного охвата некоторых съемочных систем становится возможным создание новых подробных карт природных зон всего мира.

Главное из достоинств вегетационных индексов заключается в простоте их получения и широком спектре решаемых задач, и NDVI - не исключение. Этот индекс часто используется для вычисления более сложных параметров, таких как продуктивность, биомасса, влажность и минеральная (органическая) насыщенность почвы, суммарное испарение (эвапотранспирация) и объем осадков, а также мощность снежного покрова. Зависимости между этими параметрами и NDVI, как правило, не прямые и связаны с особенностями исследуемой территории, ее климатическими и экологическими характеристиками. Кроме этого, часто приходится учитывать временную изменчивость параметра и ответной реакции NDVI.

Но следует отметить, что у использования индекса NDVI существуют свои недостатки.

Во-первых, для его вычисления нельзя использовать данные, не прошедшие радиометрическую коррекцию. Во-вторых, при определенных погодных условиях (сильная облачность, дымка) в измерениях могут появиться погрешности. Чтобы их избежать, необходимо использовать более точные коэффициенты и серии снимков за несколько дней, недель или месяцев. В-третьих, при сравнении результатов измерения индекса с результатами, полученными на тестовых площадках, необходимо учитывать огромное количество параметров измерений (например, погодные условия - как в день съемки, так и в день снятия показаний с тестовых площадок). И еще одним недостатком является ограниченность использования индекса в период слабой вегетации или ее отсутствия [100].

В настоящее время большое количество спутников позволяет получить расчеты индекса NDVI, так как они имеют каналы съемки в необходимых диапазонах. Однако наш выбор остановился, на наиболее подходящих для целей и задач работы данных, полученные радиометром MODIS, установленном на спутниках Terra и Aqua. Эти данные будут сопоставимы с данными о температуре поверхности - как по пространственному разрешению, так и по характеристикам съемочной аппаратуры.

Данные радиометра MODIS просты в использовании и имеют подтвержденную наземными измерениями достоверность. Достоинством расчета индекса по данным этого радиометра по сравнению с другими является учет в каналах съемки узких диапазонов длин волн, что позволяет избежать появления погрешностей, связанных с ошибочными расчетами отражательной способности в ближнем инфракрасном диапазоне из-за учета воздействия поглотительной способности водяного пара в этой части спектра.

Среди продуктов MODIS, расчет индекса NDVI относится к группе тематических, то есть предназначенных для научных исследований. Эта группа данных получила идентификационное имя MOD13. В нее включены как данные о ежедневных измерениях данного параметра, так и осредненные за

8 или 16 дней. Данные о значении индекса могут быть представлены в трех пространственных разрешениях: 250, 500 и 1000 метров на пиксель в зависимости от периода осреднения [100].

Для анализа охлаждающего эффекта парковых зон нами использовались ежедневные измерения вегетационного индекса с пространственным разрешением 1 км за период с 2008 по 2018 гг. То есть выборка, как и в случае расчета температуры поверхности, составила 747 отдельных снимков с обоих спутников.

Было рассчитано среднегодовое значение NDVI для всех 28 парков Москвы за период 2008-2018 гг. Оно составило 0,32. От случая к случаю значение вегетационного индекса меняется в широких пределах от 0,04 до 0,68. Среднегодовое значение не описывает особенностей растительного сообщества Москвы, так как данный параметр имеет значительные сезонные. Рассмотрим далее эти изменения.

В табл. 3.8 представлены средние сезонные значения вегетационного индекса. Минимальное значение (0,11) наблюдается в зимний период. Его величина, согласно рис. 3.13, подтверждает, что в большинстве парков столицы преобладают широколиственные породы деревьев. Максимум наблюдается летом (0,56), что соответствует средней степени развития зеленой биомассы в Московских лесопарках. Осеннее и весеннее значения очень близки друг другу, что объясняется периодами начала и окончания основных фаз растительного сообщества в умеренных широтах в переходные сезоны.

Табл. 3.8 Среднесезонные значения вегетационного индекса NDVI по данным радиометра MODIS за 2008-2018 гг. в среднем по территории 28 парков

Сезон года	NDVI
Зима	0,11
Весна	0,28
Лето	0,56
Осень	0,31

Было выдвинуто предположение, что интенсивность «островов холода» в пределах городских парков должна коррелировать со значениями NDVI в них. Для анализа внутригодовой изменчивости индекса в пределах московских парков были рассчитаны среднемесячные значения и показатель стандартного отклонения индекса (табл. 3.9).

Табл. 3.9 Среднемесячные значения и стандартные отклонения индекса NDVI, рассчитанные по данным космических снимков за 2008-2018 гг.

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднемесячные значения	0,11	0,11	0,12	0,20	0,50	0,59	0,56	0,53	0,46	0,30	0,16	0,10
Стандартное отклонение	0,02	0,02	0,03	0,07	0,11	0,04	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,03

Максимального значения индекс NDVI достигает в июне (0,59), в то время как минимальное значение наблюдается в декабре (0,10), хотя отличие от других месяцев холодного сезона года (до марта включительно) незначительно. Исходя из данных о стандартном отклонении значений индекса в течение отдельных месяцев можно сказать, что они стабильны. Наибольшее стандартное отклонение наблюдается в мае, что, скорее всего, связано с различным состоянием растительности в начале и конце этого месяца.

Теперь давайте более подробно рассмотрим годовой ход значений NDVI и сопоставим его с годовым ходом среднемесячных значений общей интенсивности «островов холода» в Москве, которые представлены на рис. 3.14. Годовой ход этих параметров имеет разнонаправленный ход. Это подтверждает тот факт, что охлаждающий эффект парков усиливается по мере развития растительных сообществ. Максимум развития растительность московских парков достигает в июне, и именно в это время интенсивность «островов холода» максимальна. В процессе роста растений NDVI постепенно увеличивается, что объясняет резкий скачок значений от апреля к маю, достигает максимума в июне, а затем плавно уменьшается в период с июля по сентябрь. После отмирания растительности значение параметра NDVI резко снижается и достигает минимума в зимние месяцы. Минимум по абсолютной величине наблюдается и в годовом ходе интенсивности локальных поверхностных «островов холода».

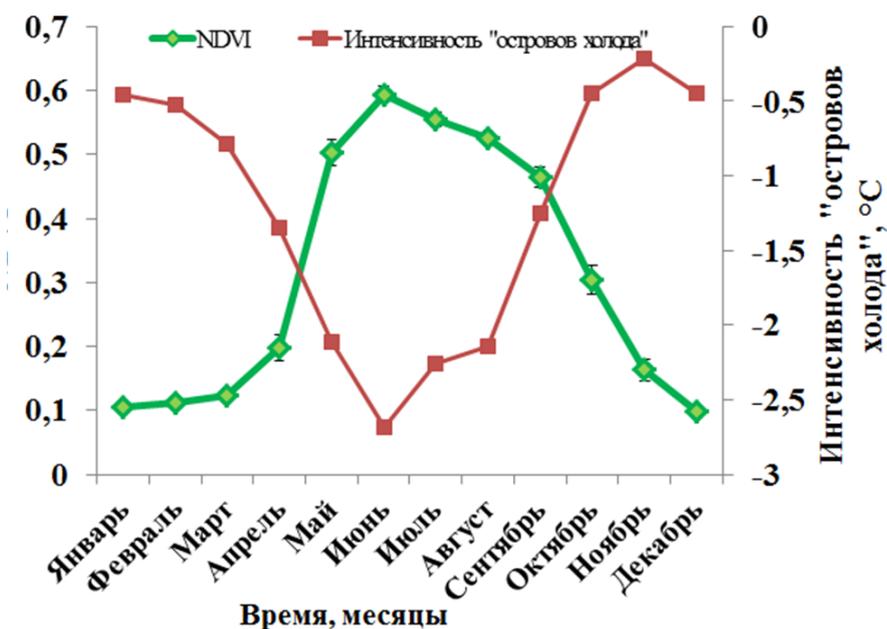


Рис. 3.14 Годовой ход средних значений вегетационного индекса и интенсивности локальных «островов холода» в московских парках площадью более 0,5 км²

Все вышеперечисленное говорит о том, что значение охлаждающего эффекта отдельных парков зависит именно от NDVI. Для подтверждения этой гипотезы нами были рассчитаны значения NDVI для каждого отдельного парка в среднем по данным всех пригодных для анализа космических снимков за период с 2016 по 2018 гг. Результаты представлены в табл. 3.10. Итак, можно заметить, что максимальное значение вегетационного индекса, как и следовало ожидать, оказалось у природного леса Лосиный

остров. С некоторым отставанием второе место по значению NDVI имеет Битцевский парк - один из самых плотных по древостою парков Москвы. Минимальное, не свойственное для древесной растительности значение (менее 0,3) имеют пять из 28 парков (Ваганьковское кладбище, Нескучных сад, парк Воробьевы горы, Кузьминское кладбище и Химкинский лесопарк). Однако NDVI зависит от сезона года, а обеспеченность снимками для отдельных парков различна. Это может значительно повлиять на среднее значения NDVI. Так, например, Братцевский парк не отличается своими размерами и высокой плотностью древостоя, но занимает с третьего по пятое место по значению NDVI. Это может быть следствием того, что данный парк за период 2016-2018 гг. в большинстве своем проявился на снимках теплого сезона, когда значения NDVI наиболее высоки.

Табл. 3.10. Среднее по всей выборке снимков значение NDVI в 28 парках Москвы площадью не менее 0,5 км²

Парк	NDVI	Парк	NDVI
Лосиный остров	0,40	Бутовский лесопарк	0,32
Битцевский парк	0,37	Ботанический сад	0,31
Братцевский парк	0,36	Серебряный бор	0,31
Лесопарк Измайлово	0,36	Востряковское кладбище	0,31
Парк Тёплый стан	0,36	Парк Лианозово	0,30
Лианозовский питомник	0,35	Филёвский парк	0,30
Парк Царицыно	0,35	Парк Обручëво	0,30
Парк Кузьминки	0,35	Алëшкинский лес	0,30
Рублёвский парк	0,35	Парк Покровское-Глебово	0,30
Парк Чертаново	0,33	Химкинский лесопарк	0,27
Парк сельскохозяйственной академии им. Тимирязева	0,33	Кузьминское кладбище	0,25
Парк Восточное Измайлово	0,32	Парк Воробьевы горы	0,23
Лесопарк Тропарево	0,32	Нескучный сад	0,19
Парк Кусково	0,32	Ваганьковское кладбище	0,19

Были исследованы зависимости значения NDVI и таких параметров как площадь парка и интенсивность локального «острова холода», создаваемая данным парком (рис. 3.15).

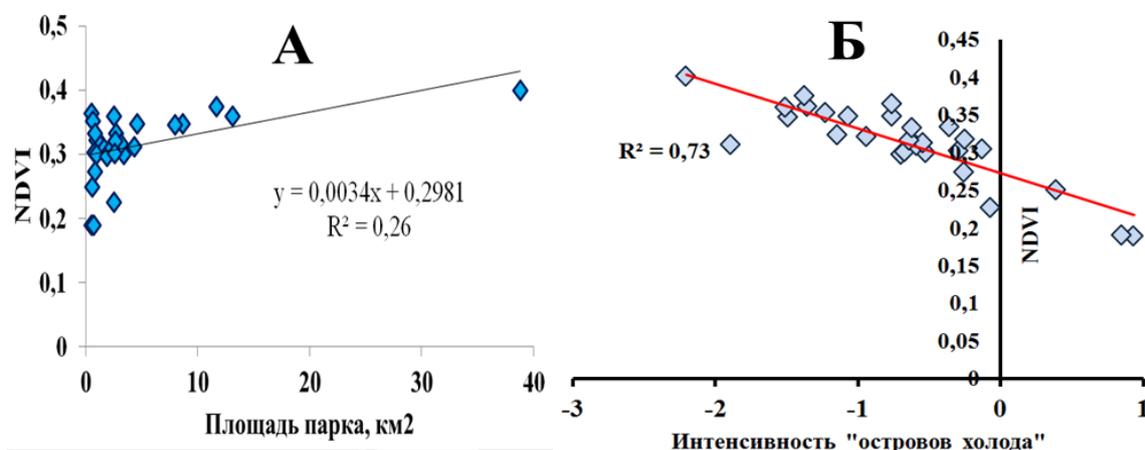


Рис. 3.15 Зависимости значения NDVI и А) Площади парка; Б) Интенсивности «острова холода» Московских лесопарков в 2016-2018 гг.

Мы можем увидеть, что между значением вегетационного индекса и площадью парка связь статистически значимая (коэффициент корреляции $R = 0,51$), но не слишком тесная. На рис. 3.15Б представлена связь NDVI и интенсивности «острова холода» парков. Она является весьма тесной и достоверной с коэффициентом корреляции 0,92.

Значит, чем больше значение NDVI, тем более сильное охлаждение оказывает парк на окружающую его городскую среду. С другой стороны, чем больше площадь парка, тем больше в среднем значение NDVI.

3.2.6 Индекс листовой поверхности (LAI) и интенсивность «островов холода».

Еще одной причиной различий в охлаждающем влиянии парков служит плотность и сомкнутость крон, которую можно косвенно оценить с помощью индекса листовой поверхности.

Индекс листовой поверхности – это отношение общей площади листовой поверхности растений к площади, на которой они растут; в случае измерения LAI хвойных пород деревьев за основу берется общая площадь хвоинок. Впервые этот индекс был определен Уотсоном в 1947 [55]. Это безразмерная величина, правда, иногда в литературе встречаются ее обозначения m^2/m^2 или га/га. Значения изменяются в пределах от 0 (голая почва) до 7-8 (тропические леса). При использовании космических данных шкала продлевается до 100 (в случае с данными MODIS, умножается на 10). Этот параметр является одним из наиболее трудно поддающихся правильной количественной оценке из-за слишком большой пространственной изменчивости.

Данный показатель используется для следующих целей:

- Определение биомассы сообщества;
- Анализ плотности растительного покрова;
- Мониторинг роста и гибели отдельных насаждений;
- Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных территорий;
- Расчет суммарного испарения влаги.

Существует несколько способов измерения индекса LAI: наземные (прямые и косвенные) и космические.

Наземные прямые методы основываются на непосредственном измерении площади листьев или сухой массы листьев. Осуществляется сбор листьев на определенном участке и измеряется их площадь, затем производят отношение к площади участка. Эти методы достаточно точные, но приводят к нарушению растительного покрова. Также к недостаткам прямых измерений относится их большая трудозатратность и появление ошибок, связанных с учетом всех листьев, в том числе и слепшихся.

Наземные косвенные методы основываются на пропускании света через крону растений с использованием теории переноса излучения. Такие методы достаточно точные, не требующие много

денежных и трудовых затрат. Кроме прочего возникают проблемы с измерением индекса в условиях облачности, а также у высоких растений из-за необходимости измерить количество света над кроной и под ней [55].

Еще один косвенный метод - это измерение LAI путем создания изображения по типу «рыбий глаз». Производится фотосъемка специальной камерой, а затем сравнивают площади областей тени и света. Этот метод достаточно прост, но приводит к некоторым ошибкам при неправильном использовании камеры и наличии солнца в объективе.

Космические методы основаны на измерении оптической глубины по вертикали путем учета обратной модели переноса излучения. Возможность определения существует для ряда съемочных систем, но в данной работе используются измерения радиометра MODIS. В случае с космическими снимками, LAI обозначает количество слоев листьев в одном пикселе изображения.

В отличие от традиционно применяемого вегетационного индекса NDVI, для расчёта LAI/FPAR (Fractional Photosynthetically Active Radiation) используется большее количество спектральных зон съёмки (прошедших атмосферную коррекцию), учитывается карта типов покрова поверхности Земли и дополнительная наземная информация. Алгоритм вычисления индекса листовой поверхности по данным MODIS состоит из нескольких процедур, использующих данные отражения в семи спектральных диапазонах. Если основной алгоритм по той или иной причине не может действовать правильно, включается запасной алгоритм резервного копирования, основанный на вычислении вегетационных индексов. Алгоритм требует классификации растительного покрова и, поэтому, связан с отражательной способностью поверхности, представленной в продуктах (MODAGAGG) и MODIS Land Cover (MOD12Q1) [119].

В настоящее время существует огромное количество карт индекса листовой поверхности в глобальном масштабе, созданных международным космическим агентством NASA. Эти карты имеют различное пространственное разрешение (250, 500 и 1000 метров) и широкий временной охват (начиная с января 2000).

В данной работе использовались 8-суточные карты значений листового индекса (LAI) с пространственным разрешением 500 метров по данным радиометра MODIS за период с 2008 по 2015 гг. Использование таких осредненных карт предоставляет возможность избежать ошибок, связанных с влиянием облачного покрова, и оценить значение листового индекса в течение всего года без выделения снимков, пригодных для анализа. Это, в свою очередь, позволяет избежать смещения оценок среднегодовых и среднемесячных значений из-за пропусков данных.

Листовой индекс по данным радиометра MODIS рассчитывается по уже заложенной в программу классификации типов поверхности. Внутри города, при недостаточном пространственном разрешении, сложно выделить растительные сообщества. Это недостатки автоматической классификации. Они привели к тому, что мы не смогли получить значение LAI для нескольких парков (Нескучный сад,

Обручево, Ваганьковское кладбище, Лианозовский питомник, Парк Восточное-Измайлово, Кузьминское кладбище, Братцевский и Лианозовский парки), так как в заложенной при расчете индекса классификации они были ошибочно отнесены к типу «городская застройка». В результате среднее для 20 оставшихся парков значение за восьмилетний период составило 10,9. Однако, как и в случае с вегетационным индексом, среднее значение мало что объясняет. Рассмотрим годовой ход значений этого параметра, построенный в среднем за 2008-2015 гг. на примере двух зеленых зон по всем отдельным восьмидневным срокам (рис. 3.16).

В зимние месяцы значение листового индекса приближается к нулю. Это вызвано образованием устойчивого снежного покрова, в том числе и на кронах хвойных пород. Затем, с конца марта, мы можем наблюдать постепенный рост вплоть до середины апреля, который вызван таянием снега и проявлением в расчетах хвойных пород деревьев. Далее рост значений резко ускоряется (приблизительно с конца апреля до начала июня). Он вызван началом активного распускания листовых пластин у лиственных пород деревьев, которых, напомним, преобладающее большинство в лесопарках Москвы. После достижения пика и вплоть до конца лета LAI постепенно уменьшается, особенно хорошо это заметно для лесопарка Лосиный остров. Остается непонятным вторичный максимум значений листового индекса для обоих представленных на графике лесопарков, происходящий в начале ноября. Скорее всего, это может быть связано с особенностями погодных условий в эти недели: появлением и последующим сходом первого снежного покрова в отдельные годы, влиянием сплошной облачности и т. д.

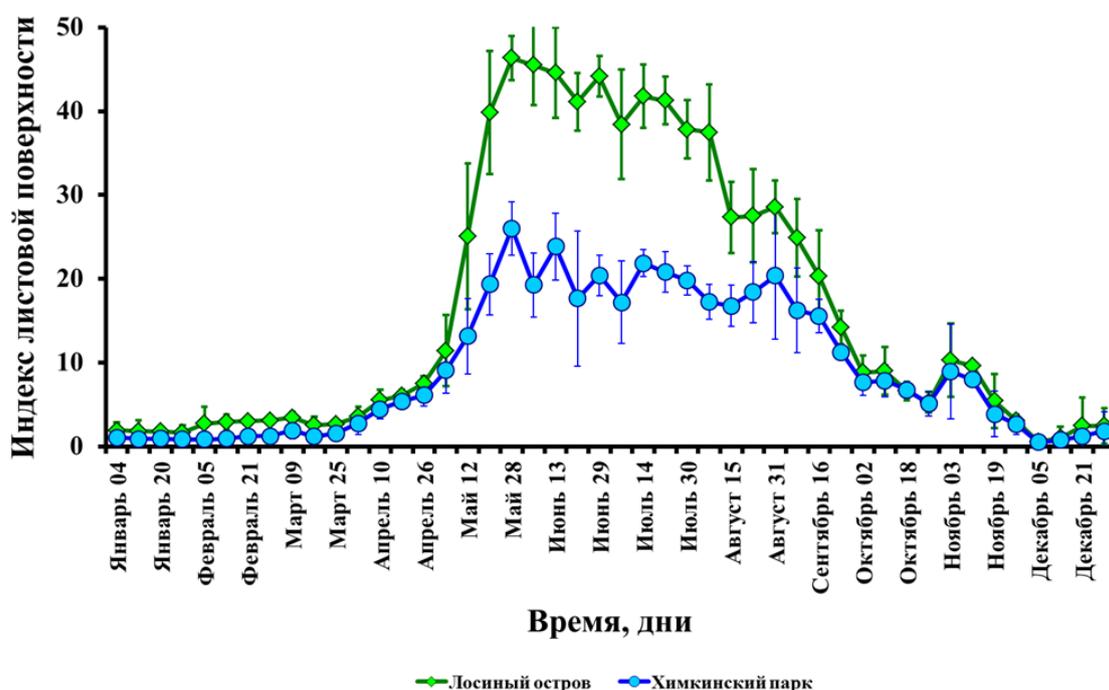


Рис. 3.16 Годовой ход значений листового индекса (LAI), построенный для двух лесопарков Москвы по данным радиометра MODIS за период 2008-2015 гг.: Лосиный остров (зеленая линия) и Химкинский парк (синяя линия). Доверительные интервалы рассчитаны с доверительной вероятностью 0,95

Очевидным является то, что индекс листовой поверхности влияет на значение интенсивности «островов холода» внутри отдельных парков и должен быть связан со значением NDVI, так как имеет сходную природу. Рассмотрим далее эти зависимости, представленные на рис. 3.17.

Для построения зависимостей были рассчитаны средние значения LAI для каждого парка в среднем за весь анализируемый период времени. От парка к парку значение LAI меняется в широких пределах от 1,7 у парка Лосиный остров (следует отметить, что столь же высокое значение LAI имеет еще один парк – Битцевский) до 0,99 у Химкинского лесопарка. Значения LAI сравнивались со средними значениями NDVI для этих парков, и средними значениями охлаждающего эффекта отдельных парков по данным за 2016-2018 гг. Сравнение данных за различный временной период допустимо, так как параметры не подвержены значительным межгодовым вариациям.

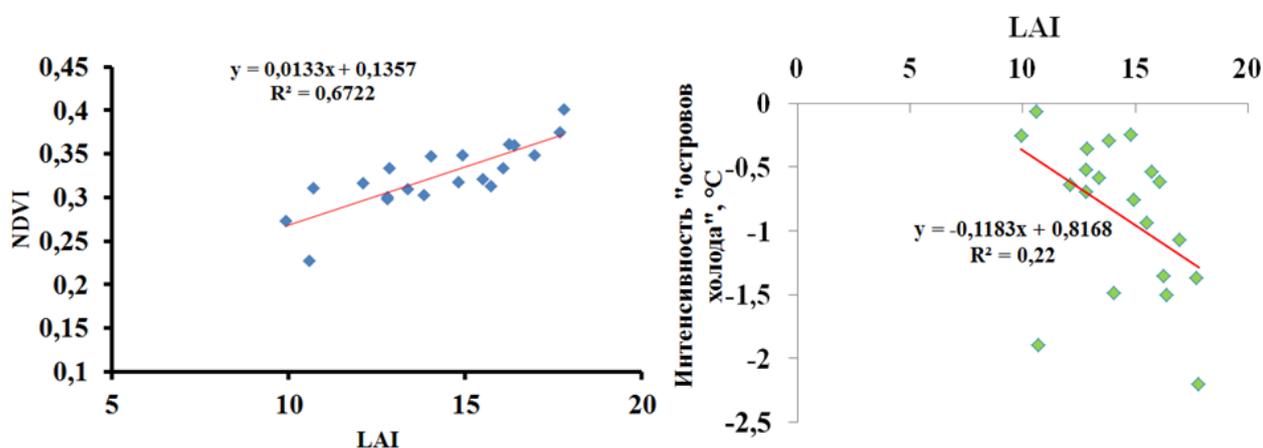


Рис. 3.17 Зависимости индекса листовой поверхности (LAI) в 2008-2015 гг. от вегетационного индекса NDVI в 2008-2018 гг. (слева) и интенсивности локальных «островов холода» в 2016-2018 гг. (справа)

На рис. 3.17 слева представлен график зависимости значений листового и вегетационного индексов. Как и следовало ожидать, эта зависимость очень тесная с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,67$. Это имеет логичное объяснение: чем больше слоев листьев, тем больше биомасса, отражающаяся в значении вегетационного индекса. А вот зависимость между LAI и интенсивностью охлаждающего эффекта не однозначна. Коэффициент корреляции ниже 0,5, что говорит о сравнительно слабой связи. Однако, если из ряда данных убрать значение парка Серебряный бор (на графике это точка, стоящая особняком от всех остальных), который при низком значении LAI имеет достаточно сильный охлаждающий эффект, то коэффициент корреляции резко возрастает до значения 0,71, что говорит о наличии не просто статистически значимой, но и тесной связи. Очевидно, что сравнение данных за разные периоды времени может приводить к общему ослаблению статистической связи между ними.

3.3 Термический режим поверхности открытой воды, лугов и песчаных поверхностей на территории Москвы.

3.3.1. Открытая вода.

Водная поверхность – это уникальный объект с точки зрения ее температуры и термического воздействия на окружающую территорию. На основе космических снимков был составлен векторный слой водных объектов на территории города Москвы (рис. 3.18). Основным и наибольшим по площади водным объектом в столице является Москва река, которая в пределах города имеет площадь 18,8 км². В данном случае, вне зависимости от разрешения космического снимка, нами учитывались даже самые маленькие водные объекты с площадью менее 0,1 км², если таких объектов на 1 км² приходилось не менее трех. В итоге к анализу было принято 26 водных объектов, площадь которых в сумме составила 29,0 км².



Рис. 3.18 Векторный слой водных объектов на территории города Москва

Разумеется, основной водный объект – это русло р. Москвы. В созданном векторном слое оно состоит из двух отдельных частей: северной части канала имени Москвы площадью 3,00 км² с границей в 400 м севернее шлюза № 7 и русла реки ниже по течению в пределах традиционных границ города

вплоть до пересечения с МКАД на юго-востоке площадью 17,94 км². Многочисленные мосты очерчивались с узкими перемычками шириной от 3 до 5 м для сохранения целостности русла реки как единого объекта (рис.3.20 г). Остальные оконтуренные водные объекты значительно меньше: площадь общего каскада Нижнего и Верхнего Царицынских прудов составляет 0,65 км²; расположенный рядом Борисовский пруд занимает 0,56 км²; Гребной канал в Крылатском – 0,45 км². С учётом близости этих трёх прудов друг к другу, а Гребного канала к Москве-реке, соответствующие им ячейки в расчётной сетке могут оказаться более чем наполовину заполненными водой и, таким образом, характеризующими созданный общий векторный слой водной поверхности. Все прочие объекты – мелкие озёра и пруды (пример – Мазилковский пруд на рис.3.20 (д) площадью 0,02 км²) – значительно меньше по площади и не могут заполнить более половины расчётной ячейки на снимках спутников системы MODIS. При расчете температуры поверхности по космическим снимкам матрица значений содержит максимально 27 ячеек, ведь не все маленькие объекты, даже если они находятся вблизи друг от друга, занимают более 50% пикселя (рис. 3.19).

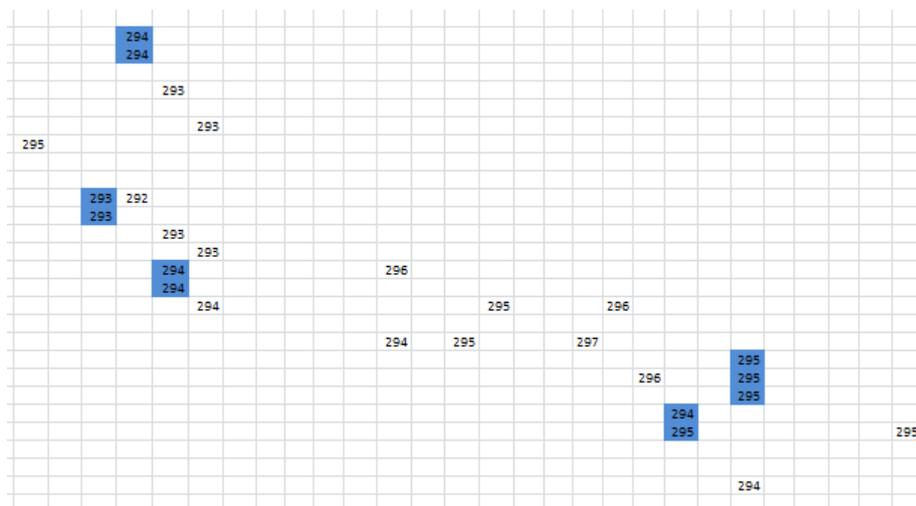


Рис. 3.19 Пример расчётной матрицы температуры поверхности водных объектов на территории города в °К. Синим цветом обозначены смежные, наиболее показательные пиксели значений.

Русло Москвы-реки узкое (в черте города – от 100 до 200 м) и проявляется в расчётной матрице пунктирно, с разрывами. Ещё одним следствием узости реки и малости прочих водных объектов служит неполное заполнение ячеек водной поверхностью. Как видно на рисунке 3.19, в отличие от городских лесопарков на рис.3.8, в расчётной матрице водных объектов нет ни одной внутренней ячейки, полностью заполненной водой и со всех сторон окружённой ячейками с преобладанием водной поверхности. Из 27 ячеек имеются лишь пять их скоплений – водных ареалов, состоящих из двух или трёх смежных ячеек. При этом лишь одна ячейка граничит с такой же водной поверхностью как с севера, так и с юга. Частичное заполнение «водных» ячеек суши означает возможные смещения в средних оценках температуры поверхности воды по данным спутников MODIS – особенно весной и осенью, когда температурный

контраст воды и прибрежной суши значителен. Более точные оценки $T_{\text{п}}$ воды возможны по данным спутников с более высоким разрешением.

Границы векторного слоя были построены в [104] с точностью до ± 10 метров. На северо-западе города река Москва имеет высокую степень изрезанности берегов, в центре же, наоборот, берег забетонирован. В ходе создания векторного слоя учитывались все неровности береговой линии, вырезались мосты, выступающие участки набережной и даже отдельные пристани (рис. 3.20)

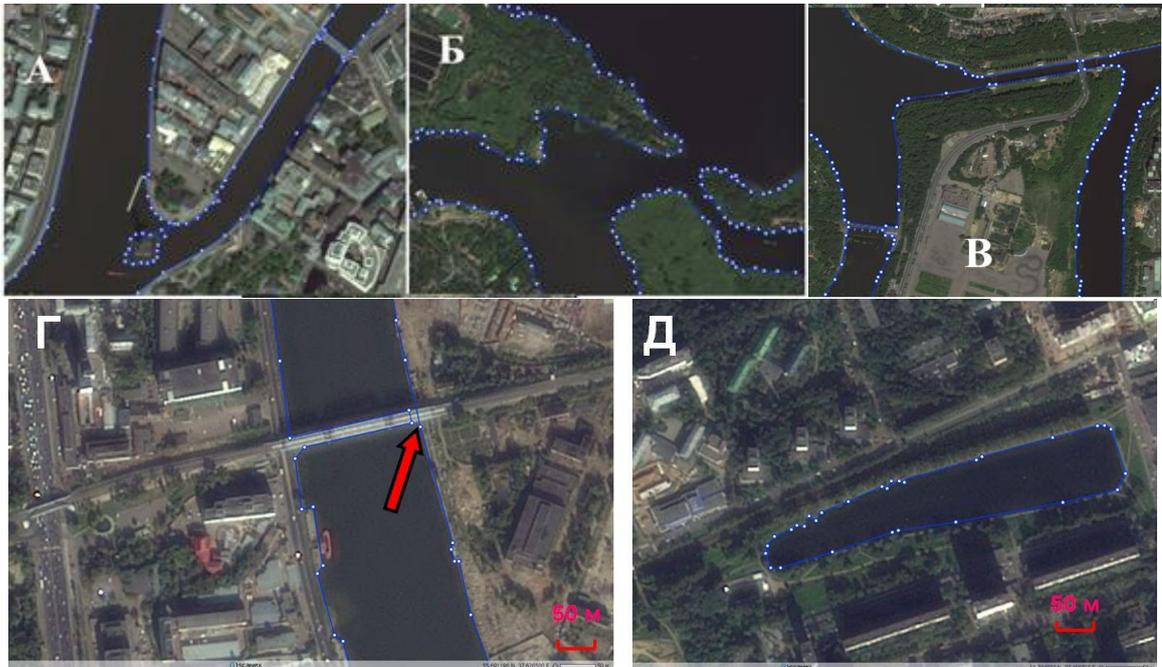


Рис. 3.20 Примеры проведения границ водных объектов: А) Центральная часть города. Памятник Петру I; Б) Серебряный бор; В) Строгино; Г) Нагатинская набережная; Д) Мазилковский пруд. Границы – синие линии с белыми кружками. Стрелкой показана перемычка при оконтуривании моста.

Был проведен анализ влияния водных объектов на поле температуры внутри города. Значения температуры поверхности водных объектов были сопоставлены со значениями температуры поверхности всей остальной части города. Температурным влиянием считалась разность температуры поверхности водных объектов и остального города. За период наблюдений с 2009 по 2013 годы по данным 99 космических снимков оказалось, что поверхность воды по температуре в среднем за весь год близка к температуре поверхности городской суши. Однако это само по себе не говорит об отсутствии термических особенностей водной поверхности. Следует учесть маятниковый характер температурных различий поверхности водоемов и суши в годовом ходе. В силу существенно большей теплоемкости и, как следствие, тепловой инерции вода медленнее остывает в конце лета и осенью и медленнее нагревается весной и в начале лета, так что разность температуры воды и суши имеет разный знак в разные сезоны года.

Были рассмотрены среднесезонные значения температурного влияния водных объектов. В таблице 3.11 представлены результаты расчета этих значений по данным 99 космических снимков за период с

2009 по 2013 гг. Можно заметить, что в холодный период (с октября по февраль) водные объекты при отсутствии ледостава (то есть при открытой водной поверхности) оказывают обогревающее воздействие на окружающую их территорию, в то время как в теплый (с мая по июль) водные объекты в среднем холоднее всей остальной части города. Так, всем известно, что осенью вода остывает медленнее суши и температура ее несколько выше. В зимний же период знак разности может быть различным в зависимости от покрытия реки льдом. Если река полностью замерзла, то различия в температуре поверхности между сушей и льдом будут незначительны, а если река длительный период остается незамерзшей, то она будет гораздо теплее суши. Заметим, что, помимо инерции остывания, более высокой температуре воды осенью и зимой способствуют также теплые промышленные и коммунально-бытовые стоки в Москву реку.

Таблица 3.11 Сезонные различия в температурном влиянии водных объектов по данным 99 космических снимков за период с 2009 по 2013 гг.

Сезон года	Среднее значение температурного влияния – разность T воды и суши °С	Размер выборки
Холодный сезон (октябрь-март)	0,26	53
Теплый сезон (апрель-сентябрь)	-0,22	46

Так как водные объекты на территории города имеют небольшую площадь, а русло реки Москвы узкое, то при расчете температуры поверхности воды, как и в случае с парковыми территориями, очевидно сильное влияние краевых эффектов, но, в отличие от парков, полностью исключить это влияние не удалось. Как уже отмечено выше, в расчетной матрице водных объектов нет ни одной «чисто водной» ячейки, со всех сторон окруженной водной поверхностью. Чтобы хотя бы свести влияние краевых эффектов к минимуму, был произведен отдельный анализ температурного влияния нескольких смежных ячеек из матрицы водной поверхности. Таких ячеек оказалось 11 из 27 (рис.3.19), две из которых оказались на месте Строгинского залива, две на севере в районе канала им. Москвы, а остальные ячейки распределены по широким участкам русла реки Москвы. Для этих 11 квадратов, в дополнение к общей выборке всех 27 ячеек, была также отдельно рассчитана средняя температура поверхности.

Предполагалось, что построенный годовой ход температурного влияния водных объектов Москвы должен иметь маятниковый ход со сменой знака с положительного на отрицательный и обратно весной и осенью.

По данным о среднемесячных значениях температурного влияния водных объектов как по всей их площади, так и только для смежных 11 квадратов был построен график годового хода (рис. 3.21). Пропуски в нём связаны с отсутствием данных в течение двух месяцев – в августе и ноябре. Для проверки достоверности полученных результатов на графике также построены доверительные интервалы для значения температурного влияния всей площади водной поверхности. Из рис. 3.21 видно, что, по данным выборки космических снимков, различия в среднемесячных значениях статистически достоверны лишь при сравнении мая и июня с октябрём и зимними месяцами. По имеющимся данным видно, что с октября

по февраль водные объекты с доверительной вероятностью 0,95 теплее, а в мае и июне, наоборот, холоднее окружающей их суши. Температурное влияние в марте, апреле, июле и сентябре неочевидно с учетом доверительных интервалов, и о нём пока нельзя сделать достоверных выводов.

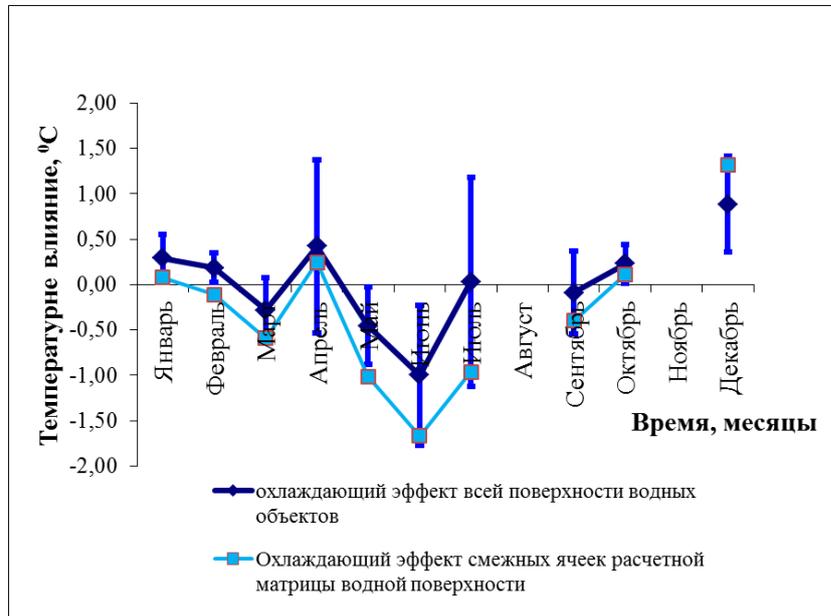


Рис. 3.21 График годового хода температурного влияния водных объектов.
Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 0,95

Если же сравнивать между собой годовой ход температурного влияния всей площади водных объектов и только отдельных смежных квадратов, то можно сказать, что в целом этот ход качественно сходный, но амплитуда его больше для смежных ячеек: в июне они заметно холоднее, а в декабре – теплее по сравнению со всеми ячейками. Иначе говоря, температурное влияние с его маятниковым характером отдельно взятых смежных «водных» ячеек ожидаемо более сильное. Однако с учётом доверительных интервалов различия между обеими выборками незначимы.

В итоге, результаты в целом подтвердили маятниковый характер температурного влияния водных объектов в годовом ходе, несмотря на их малость в черте города. При пространственном разрешении снимков 1 км выборка пикселей очень мала. Более подробные данные о термическом режиме водных объектов были получены с использованием космических снимков с высоким пространственным разрешением.

Были отобраны 6 снимков спутника Landsat 8 с разрешением 100 м в разные месяцы 2018 года: 27 февраля, 9 апреля, 11 мая, 27 мая, 7 сентября и 18 октября. Обработка этих снимков дала следующие результаты (табл. 3.12). Расчет охлаждающего эффекта водной поверхности показал, что на всех снимках, кроме зимнего, вода холоднее городской поверхности (в среднем по всем 6 разносезонным снимкам – на 3,6 °C). Однако данная оценка не отражает среднегодовые условия, поскольку в летние месяцы и с ноября по январь не оказалось ни одного пригодного для анализа снимка этого спутника (он пролетает над

регионом лишь один раз в 16 дней). Как уже показано выше, по данным спутников Terra и Aqua водная поверхность в среднем за год близка по температуре к остальной городской поверхности.

Табл. 3.12 Значение температуры водной поверхности и Москвы по данным спутника Landsat 8 за 2018 год

	27.02	09.04	11.05	27.05	07.09	18.10
Водная поверхность	-19,2	4,5	14,3	10,9	17,8	9,3
Москва	-19,6	11,9	19,2	16,1	20,6	10,8
Охлаждающий эффект	0,4	-7,4	-4,9	-5,2	-2,8	-1,6

Как показывает таблица 3.12 в зимний период водная поверхность на 0,4 °С теплее городской. Как описывалось выше, это объясняется большей инерцией воды и сбросом нагретых коммунальных и технических вод в водные объекты Москвы. От зимы к лету охлаждающий эффект водной поверхности растет, а к осени уменьшается. Исключением оказался снимок 09.04, который показал наибольшую разницу между водной и городской поверхностью. Возможно, это связано с погодными условиями, сложившимися в этот день. По данным Метеорологической обсерватории МГУ, температура воздуха в 12 ч 9-го апреля 2018 года достигла 14,8 °С, что привело к быстрому нагреву городской поверхности ко времени пролета спутника (полдень), но вода в силу большей теплоемкости прогреться еще не успела.

3.3.2. Луговые поверхности.

Рассмотрим температурное влияние самых маленьких по площади, но очень специфических типов городской поверхности – луговых и песчаных поверхностей. На территории города были выделены почти все луга общей площадью приблизительно 8 км² (рис. 3.1). Отдельный векторный слой лугов показан на рис.3.22.

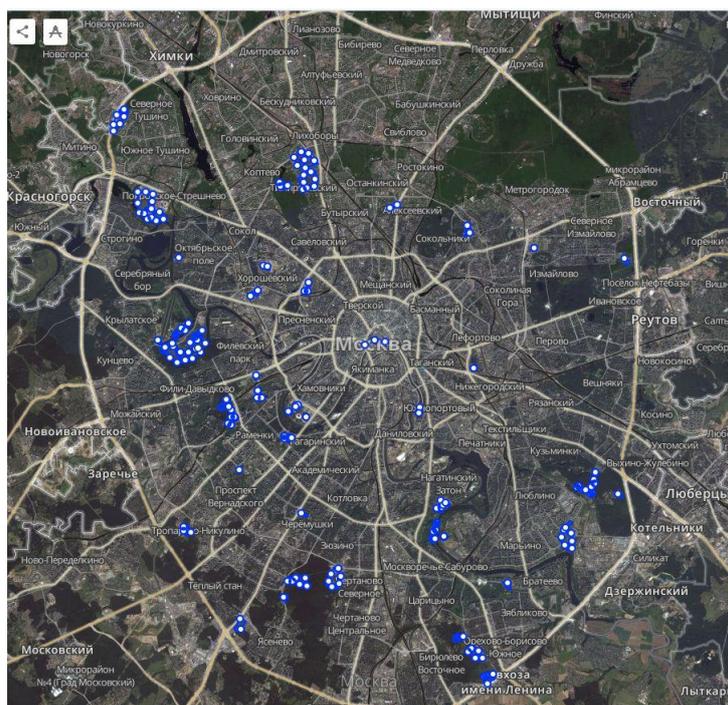


Рис. 3.22. Векторный слой луговых поверхностей на территории города Москва

Он составлен из 57 отдельных объектов. Поскольку изначально было ясно, что подобные объекты крайне малы и что для их анализа потребуются снимки с высоким разрешением иных спутниковых систем, при их оконтуривании не делалось ограничения по площади.

В основном к луговым поверхностям относятся пойменные территории реки Москвы, просеки внутри парков и отдельные луговые площади внутри городских кварталов. Помимо этого, к данному типу принадлежат также опытные поля Тимирязевской сельскохозяйственной академии, Тушинский аэродром на Ходынском поле, ипподром, конноспортивный комплекс в Битце и пр. (рис. 3.23). К самым маленьким поверхностям лугового типа отнесены футбольные поля и иные спортивные площадки. Как видно из рисунка 3.23, структура поверхности этого типа различна. Если поверхность пойменных лугов в речной долине вполне однородна, то на ипподроме и в конноспортивном комплексе посреди травяного покрова находятся небольшие служебные строения, а опытные поля ТСХА отмечены типичным для сельскохозяйственных угодий видом шахматной доски с чередованием прямоугольных участков разного цвета (очевидно, это свежевспаханные поля, зарастающие посевы и пар).

При всём функциональном многообразии объектов данного типа их, очевидно, объединяет открытый характер поверхности, занятой травяным покровом при отсутствии деревьев и кустарников. Из числа распознанных и оконтуренных луговых объектов самыми большими по площади оказались аэродром на Ходынском поле (1,01 км²), луга на Филёвской пойме (0,60 км²), опытные поля ТСХА (0,58 и 0,51 км²), а также конноспортивный комплекс в Битце (0,48 км²). Таким образом, на снимках спутников системы MODIS могут проявиться только первые четыре объекта в зависимости от их положения в каждом отдельном случае в ближайшем пикселе расчётной сетки. Очевидно, что во всех четырёх этих ячейках, даже если программа распознает их по векторным слоям в качестве луговых, результаты измерений температуры поверхности будут неизбежно искажены влиянием краевых эффектов – заполнением части ячеек поверхностью иных типов. Поэтому единственным надёжным источником о температуре луговых поверхностей могут быть лишь спутники систем с высоким разрешением.

Самыми маленькими объектами оказались футбольное поле на Советской улице (0,007 км²), спортивные площадки в Лужниках рядом с ареной (0,007 и 0,006 км²) и луг вокруг памятника Св. Владимиру на Боровицкой площади (0,004 км²). Очевидно, что выявить и оконтурить в пределах столицы абсолютно все столь маленькие объекты, как футбольные поля площадью менее 1 га, практически невозможно. Однако подобная задача перед нами и не стояла: для получения надёжных оценок T_p лугов вполне достаточно созданного общего векторного слоя лугов, содержащего 57 объектов. Неучтённые в нём крайне малые участки луговой поверхности по умолчанию отнесены к шестому типу, служащему остаточным членом в нашей классификации.

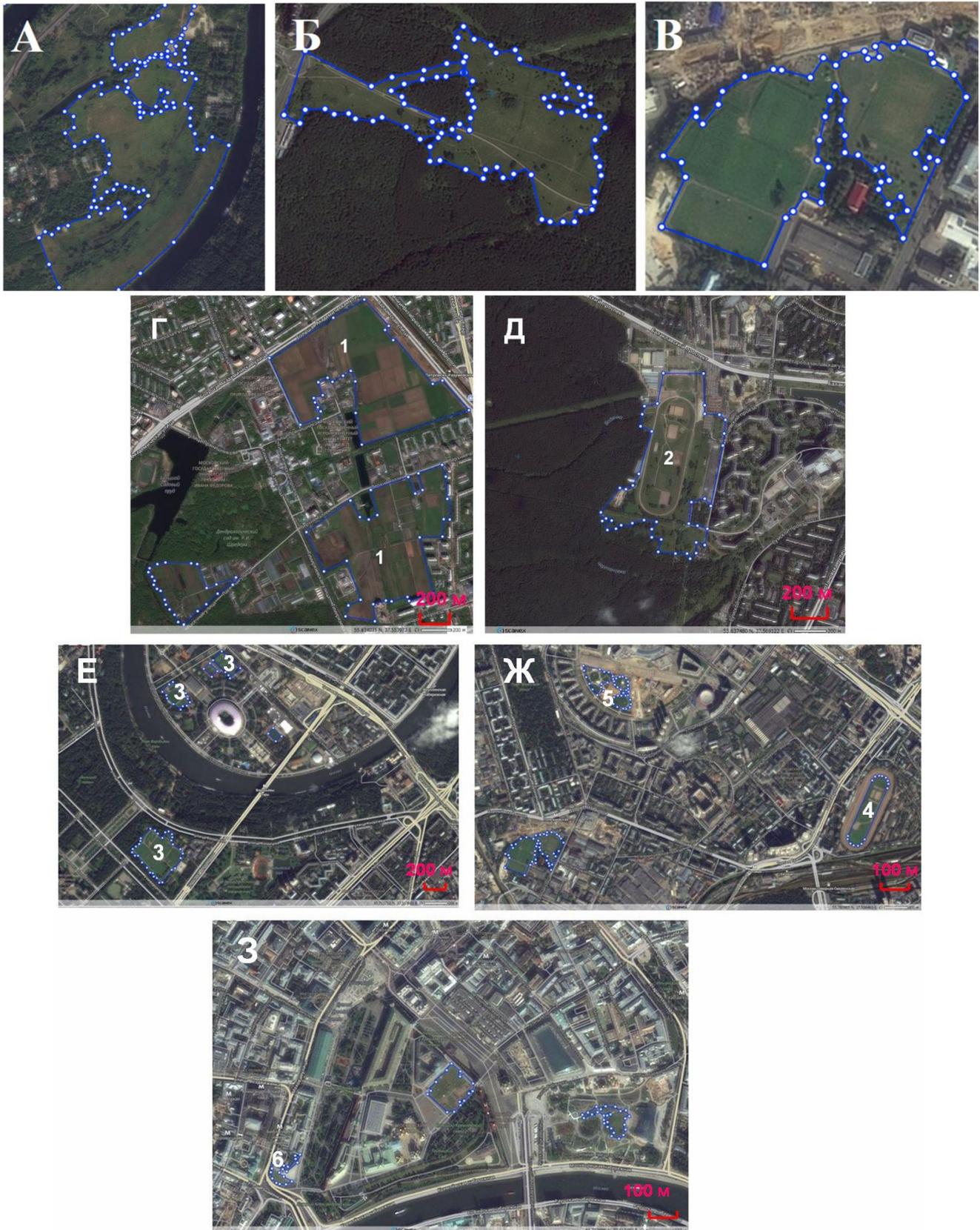


Рис. 3.23. Примеры луговых территорий города Москва: А) Пойма Москвы реки рядом с Филевским парком; Б) Лысая гора внутри Битцевского парка; В) Луговая поверхность вблизи станции метро Хорошевская (она же – на фрагменте Ж); Г) Опытные поля ТСХА (1); Д) Конно-спортивный комплекс в Битце (2); Е) Спортивные площадки рядом со стадионом в Лужниках и футбольное поле на Ленинских горах (3); Ж) Ипподром (4) и луга на Ходынском поле (5); 3) Лужайки в Кремле и луг вокруг памятника Св. Владимиру (6).

Как видно из таблицы 3.13, температура поверхности лугов по данным шести снимков Landsat в разные сезоны 2018 года близка к средней температуре всей городской поверхности: она оказалась меньше лишь на 0,1 °С.

3.3.3. Песчаные поверхности.

Песчаные поверхности и открытый грунт внутри города – большая редкость, однако резкие отличия свойств и термического режима этих мест от остальной площади города, прежде всего их высокое альbedo, требуют рассмотрения песков и открытого грунта в качестве отдельного типа. Как известно, альbedo светлого песка составляет 35-40 %, что значительно выше значений для травяного покрова (20-25 %). Оголённый характер песчаных поверхностей, малые затраты тепла на испарение вследствие повышенной их сухости и отсутствие здесь затрат тепла на транспирацию растениями приводит к особенно сильному нагреву песков в тёплое время года. Применительно к Москве, к этому типу поверхности относятся незалесенная песчаная коса вдоль берега реки Москвы, песчаный карьер в Люблино, пляжи на берегах р. Москвы и отдельных прудов, поверхность мотодрома в Крылатском, а также небольшие котлованы в местах строек. На рис.3.24 приведён созданный векторный слой песчаных поверхностей, включающий в себя 22 отдельных объекта. В силу их малости, как и при оконтуривании луговых поверхностей, в расчёт брались все объекты без ограничения их площади. Общая площадь всех таких выявленных нами поверхностей составила всего лишь 0,8 км².

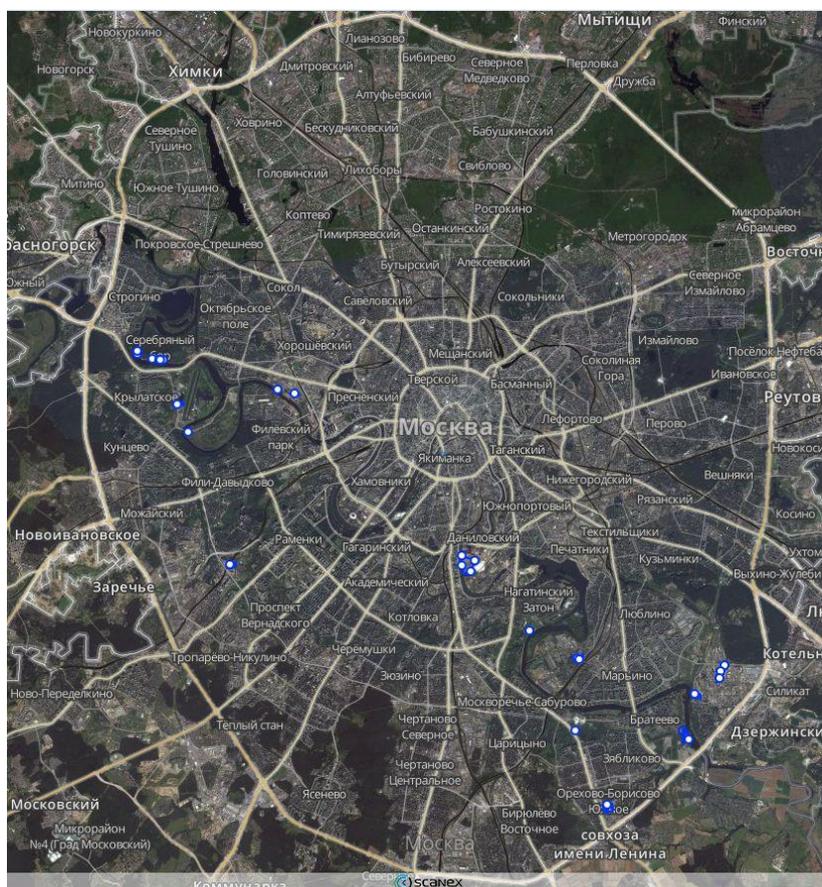


Рис. 3.24. Векторный слой песчаных поверхностей на территории Москвы.

Обратим внимание на важный вопрос, связанный с анализом этого типа. Вполне возможно, что границы столь малых объектов, как и сами эти объекты, могут быть неустойчивыми во времени. Векторный слой всех песчаных площадей был создан нами в 2020 г., но на рисунке 3.25 различные их примеры представлены на фоне обновлённого в программе ScanEx Web Geomixer [104] спутникового снимка 2024 года. Тем не менее, видимые границы объектов с песчаной поверхностью полностью соответствуют их границам (синим линиям с белыми кружками), установленным 4 года тому назад. Это подтверждает высокую степень достоверности проведённого анализа.

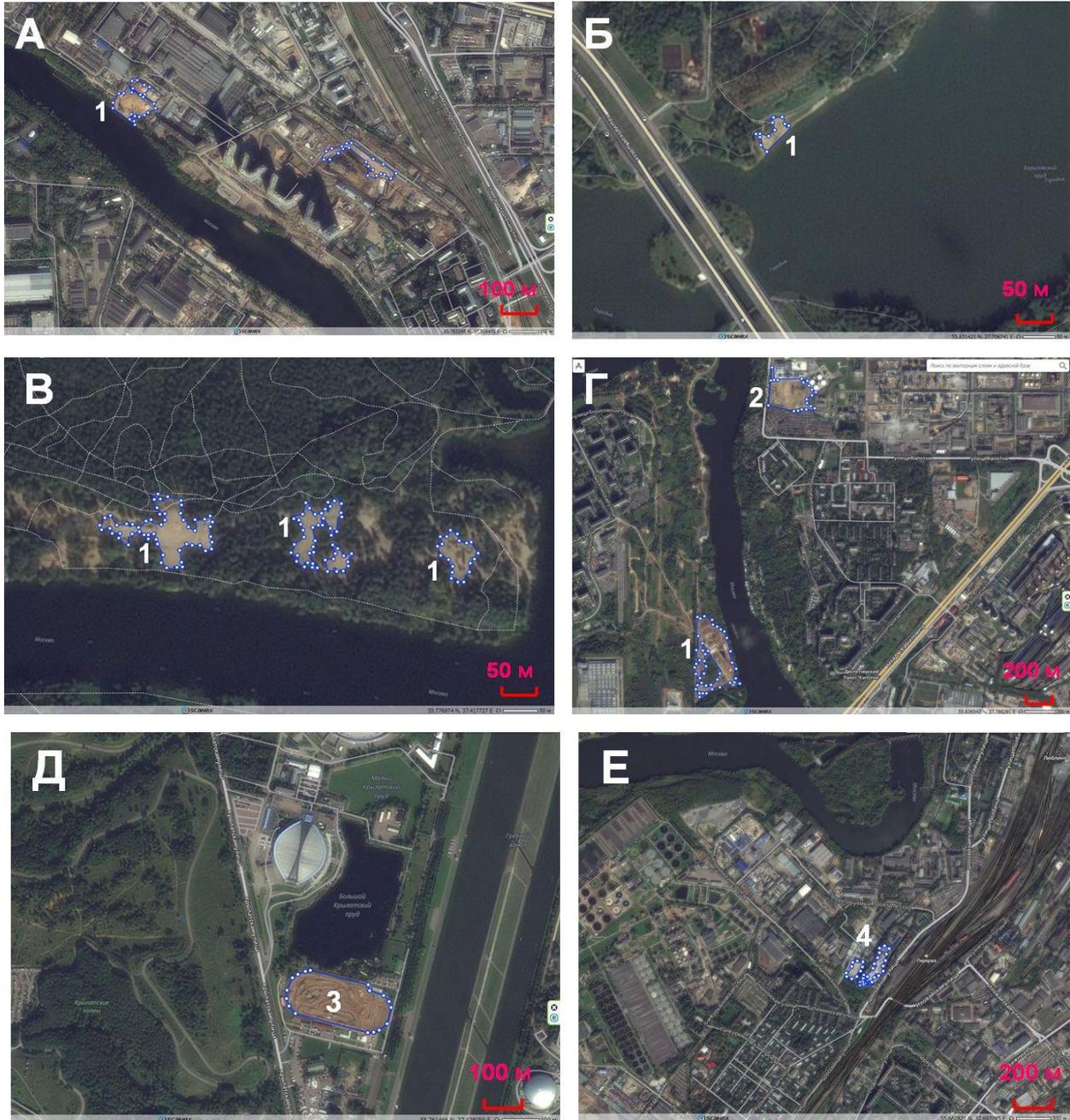


Рис. 3.25. Примеры песчаных территорий города Москва: А) Пляж (1) на Филёвской пойме; Б) Пляж на Борисовском пруду (1); В) Пляжи в Серебряном Бору (1); Г) Пляж у р. Москвы (1) и открытый грунт (2) на территории МНПЗ в Капотне; Д) Мотодром в Крылатском (3); Е) Песчаный карьер в Люблино (4).

Привлечение снимков спутника Landsat позволило провести анализ температурного поля этих типов поверхности. Выбраны 6 снимков за 2018 год, которые ранее использовались для анализа температурного влияния водных объектов. Результаты представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13 Температура луговой и песчаной поверхности по данным снимков спутника Landsat 8.

Дата	Температура луговой поверхности, °С	Температура песчаной поверхности, °С	Температура поверхности города Москва, °С
27.02.2018	-21,5	-19,4	-19,5
09.04.2018	12,1	11,8	11,7
11.05.2018	19,3	21,7	19,1
27.05.2018	16,3	16,5	16,0
07.09.2018	20,7	21,8	20,6
18.10.2018	11,1	10,9	10,8
Средняя	9,7	10,6	9,8

Интенсивность температурного влияния луговой и песчаной поверхности рассчитывалось по тому же принципу, что и температурное влияние парковых и водных поверхностей:

$$I_{\text{л}} = T_{\text{л}} - T_{\text{м}} \quad (10),$$

$$I_{\text{песка}} = T_{\text{песка}} - T_{\text{м}} \quad (11) \text{ где}$$

$I_{\text{л}}$ – температурное влияние луговой поверхности, $I_{\text{песка}}$ – температурное влияние песчаной поверхности, $T_{\text{л}}$ – температура луговой поверхности, $T_{\text{песка}}$ – температура песчаной поверхности, $T_{\text{м}}$ – температура поверхности города Москва.

В среднем по данным шести разносезонных снимков интенсивность температурного влияния луговой поверхности оказалась слабоотрицательной и составила $-0,1$ °С. Среднее значение $I_{\text{песка}}$, наоборот, положительно и достигает $0,8$ °С.



Рис. 3.26 Интенсивность температурного влияния луговой и песчаной поверхности по данным спутника Landsat 8.

Построен график интенсивности температурного влияния луговой и песчаной поверхностей (рис. 3.26). Как показывает рисунок 3.26 и таблица 3.13, температурное влияние луговых поверхностей в течение всего года близко к нулю, за исключением лишь одного зимнего снимка (27 февраля 2018 г.), где оно было отрицательным: $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, открытая поверхность лугов зимой промерзает сильнее, чем парковые территории или зона городской застройки. Весной же и осенью, видимо, транспирация с поверхности травы не столь велика, чтобы обеспечить достаточное охлаждение.

Песчаная же поверхность теплее всей территории Москвы в течение всего года. Максимальное значение $I_{\text{песка}}$ отмечается в теплый период (максимум 11 мая 2018 г. составил $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$), когда открытая, сухая и лишённая растительности песчаная поверхность, как и открытый грунт иного гранулометрического состава (супесь, суглинок и пр.), прогревается сильнее остальной городской территории.

3.4. Методические проблемы определения границ зоны плотной городской застройки и ее термический режим.

В городе создаются особые условия. Естественные покрытия заменяются искусственными, такими как бетон и асфальт. Такие покрытия обладают большей теплоемкостью по сравнению с открытыми почвами и почвой, покрытой растительностью. В результате городские поверхности имеют большую температуру поверхности в определенное время суток, а именно поздним вечером и в начале ночи, гораздо теплее поверхности за городом.

В ходе работы было проведено исследование термического режима плотной городской застройки, содержащей искусственные покрытия. При создании векторного слоя встал вопрос о том, что считать плотной городской застройкой. Для решения этой задачи мы попробовали прибегнуть к методу автоматической классификации. На территории города Москва было отобрано два набора эталонных участков для определения плотной городской застройки (рис. 3.27).



Рис. 3.27 Границы эталонных участков для проведения автоматической классификации: *А* – первый набор эталонов плотной городской застройки с полным отсутствием растительности; *Б* – второй набор с присутствием разреженной растительности внутри плотной городской застройки.

Первый набор эталонов включал территории города, внутри которых растительный покров отсутствует полностью. Второй же набор эталонов включал участки плотной городской растительности с разреженной растительностью между зданиями.

По наборам эталонов проводилась автоматическая бинарная классификация в программе Scanex Image Processor на основе снимка со спутника Landsat 8 в комбинации каналов 4, 3, 2, пригодной для анализа антропогенных объектов. Результаты классификации представлены на рис. 3.28. Мы заметили значительные различия между результатами автоматической классификации при использовании разных эталонов, точно также как это было изложено выше в разделе, посвященном температурному влиянию парков. Стоит отметить, что проблема использования результатов автоматической классификации для расчета температуры поверхности заключается не только в пространственных различиях результатов, но и также в количестве и площади выделенных объектов. Векторный слой застройки содержал порядка 1500 отдельных регионов, которые при загрузке и попытке обработки тормозили работу программы расчета температуры поверхности. Главная же проблема связана с сильной зависимостью результатов автоматической классификации от выбора эталонных участков. Иначе говоря, попытки объективного анализа сводятся к субъективному выбору таких участков. Именно по этой причине мы отказались от использования результатов автоматической классификации. Однако мы заметили общую тенденцию в распределении территории застройки по результатам двух классификаций.

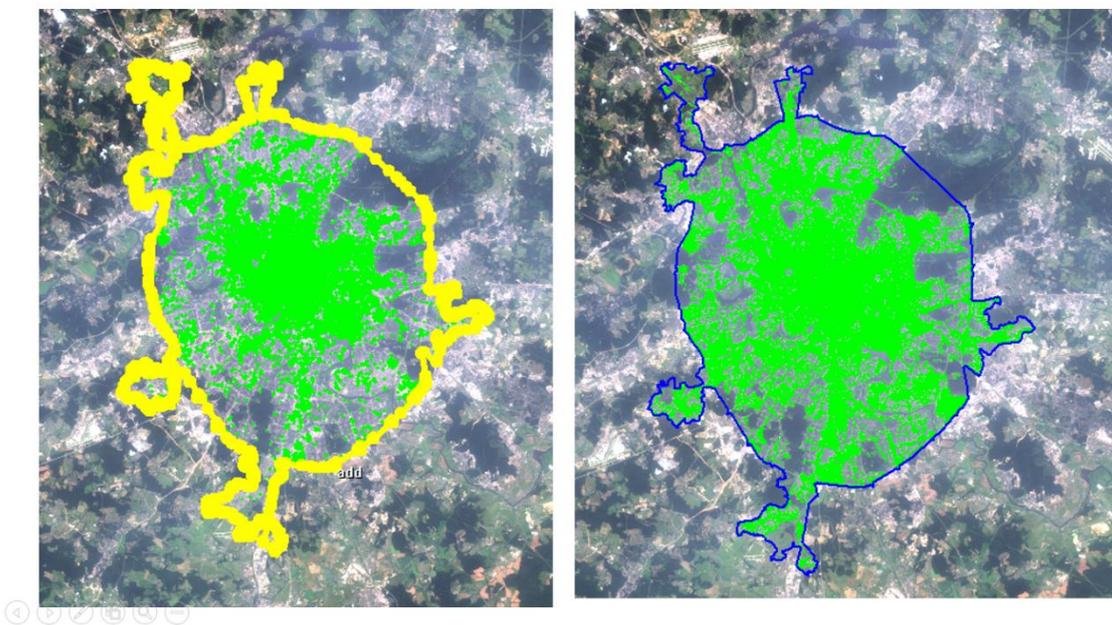


Рис. 3.28 Результаты автоматической классификации по двум наборам эталонов: слева – набор эталонов А, справа – набор эталонов Б

В результате был поставлен эксперимент, который заключался в независимом визуальном анализе городской поверхности, проведенном мною и моим научным руководителем - Локощенко М.А. Итогом данного эксперимента стали два векторных слоя плотной застройки (рис. 3.29).

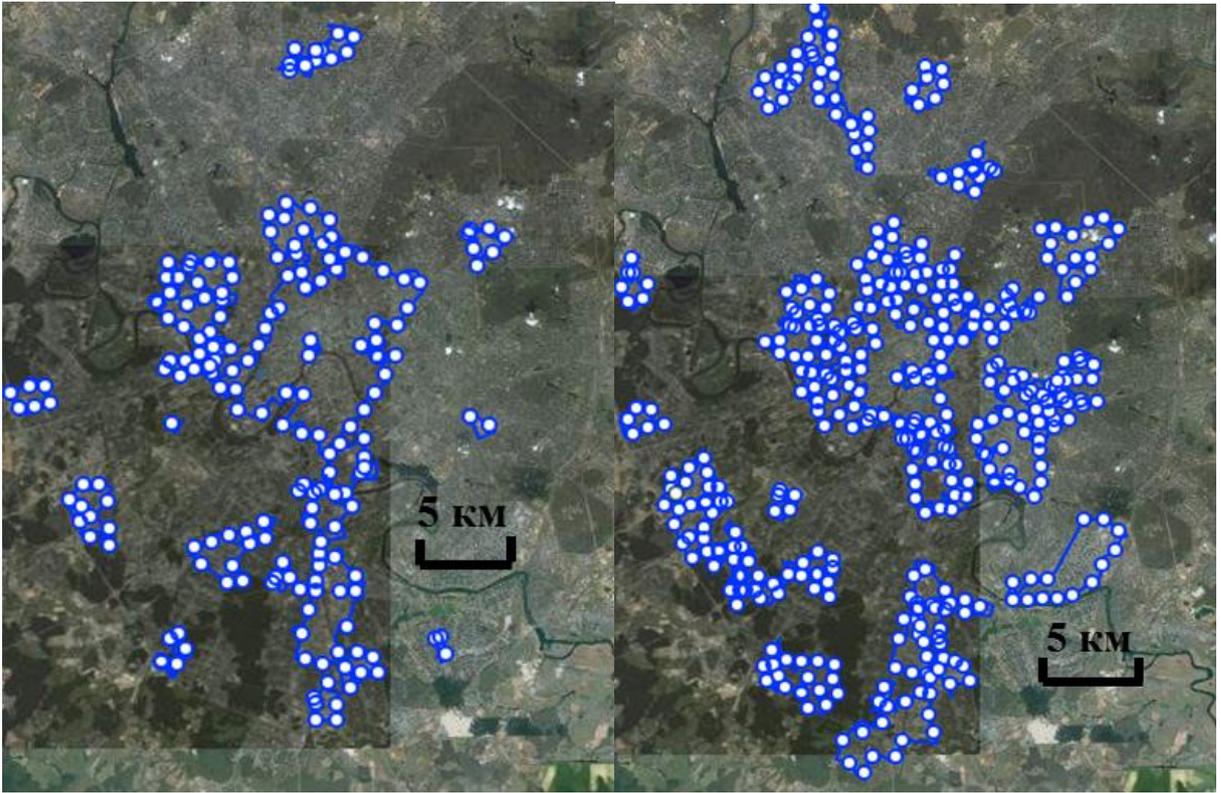


Рис. 3.29 Векторный слой плотной городской застройки и искусственных покрытий в Москве: *слева составленный Локощенко М. А.; справа составленный Енуковой Е. А.*

Они достаточно сильно отличались друг от друга, хотя некоторые участки однозначно были выделены в обоих случаях (рис. 3.30). Площадь городской застройки с низкой степенью озеленения в моем варианте границ составила 153,6 км², а в варианте М. А. Локощенко несколько меньше и равна 106,2 км². Можно сделать вывод, что в определении границ плотной городской застройки с низкой степенью озеленения большую роль играет субъективных фактор.

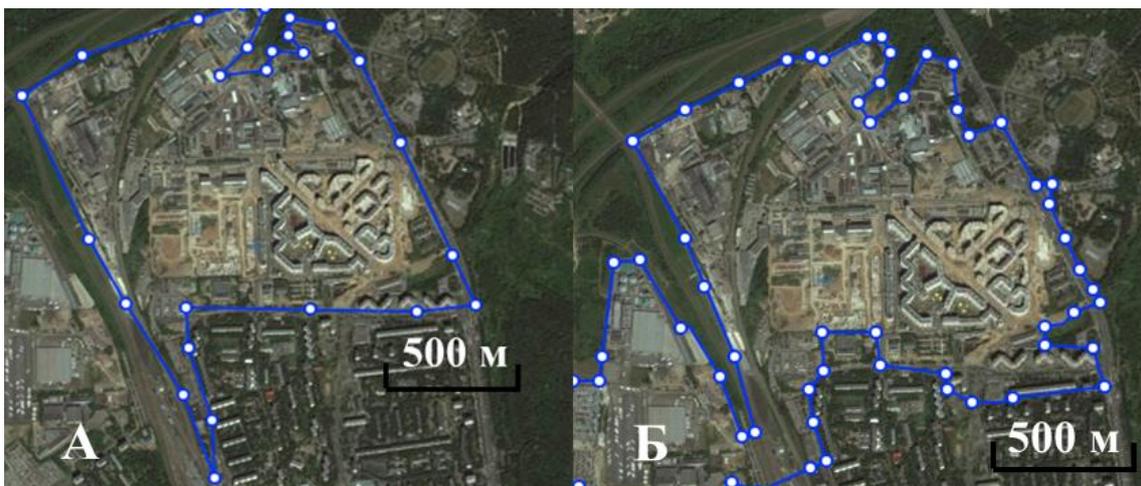


Рис. 3.30 Пример совпадения границ векторного слоя застройки сделанных: *А – Енуковой Е. А.; Б – Локощенко М. А. юго-восточная часть города*

Чтобы все-таки провести анализ влияния городской застройки на температурное поле города, было принято решение объединить два варианта векторных слоев. Общая площадь городской застройки составила 183 км² (рис. 3.31). При сравнении с результатами автоматической классификации, которая отображается на рисунке справа, был сделан вывод, что наш созданный векторный слой совпадает со слоем автоматической классификации приблизительно на 70%.

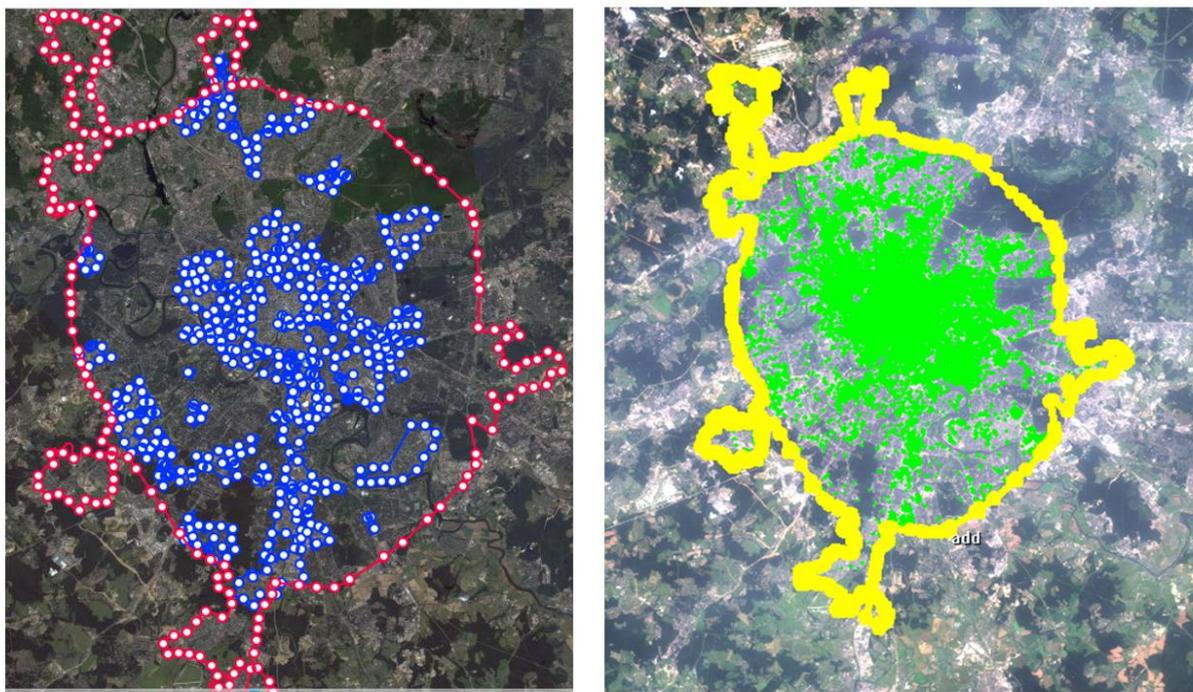


Рис. 3.31 Результат объединения двух вариантов ручного отбора территории плотной городской застройки (слева) и результаты автоматической классификации (справа)

При анализе городской поверхности были обнаружены большие площади искусственных поверхностей, которые не связаны с жилой городской застройкой. К ним относятся полотна железнодорожных развязок, территории складских помещений и гаражей (рис. 3.32). Они представляют собой полностью модифицированные поверхности, которые в температурном поле должны оказывать такое же влияние, как и городская застройка. Они были включены в векторный слой городской застройки.

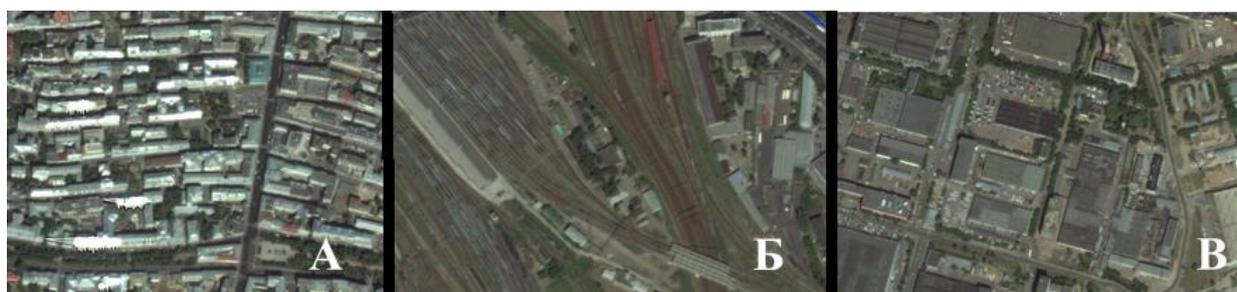


Рис. 3.32 Примеры искусственных покрытий в городе, входящих в векторный слой границ застройки: *А* – плотная жилая застройка, центр города; *Б* – железнодорожная развязка, Ленинградский вокзал; *В* – промышленная зона со складскими помещениями, восточная часть города

В работе был проведен анализ влияния поверхности городской застройки на температурное поле города. Территория города была разделена на две части: плотную городскую застройку площадью 183 км² и всю остальную часть города, включающую в себя остальные типы поверхностей, а именно лесопарки, водную поверхность, луга, пляжи и застройку с высокой степенью озеленения (808 км²). Для каждой из частей было рассчитано среднее значение температуры поверхности. Температурное влияние застройки определялось как разность между значением средней температуры поверхности внутри границ застройки и во всей остальной части города (формула 12).

$$\Delta T = T_1 - T_2, \text{ где} \quad (12)$$

ΔT – температурное влияние городской застройки; T_1 – температура поверхности внутри границ городской застройки, то есть по данным космических снимков, температура преимущественно поверхности крыш и асфальтовых покрытий; T_2 – температура поверхности всей остальной части города.

В результате среднее значение температурного влияния городской застройки на температурное поле внутри города за период с 2009 по 2013 гг. по данным 99 космических снимков составило 0,88 °С. Его значения варьировались от 2,98 до -0,21°С. При этом даты появления отрицательного температурного влияния совпадают с датами, когда «остров тепла» в Москве в целом имел отрицательную интенсивность.

По данным 99 космических снимков за период с 2009 по 2013 гг. были рассчитаны среднемесячные значения температурного влияния городской застройки. Как показывает таблица 3.14, городская застройка в среднем за каждый месяц года теплее, чем вся остальная часть города, а ее температурное влияние имеет некий годовой ход. Минимальное значение наблюдается в январе и составляет 0,43°С. Затем происходит постепенный рост значений с максимумом в июне. Невысокие близкие друг к другу значения зимой, скорее всего, связаны с небольшим количеством поступающей солнечной радиации, а также с наличием снежного покрова. Он уравнивает между собой температурное влияние всех типов поверхности в городе. Затем весной происходит постепенное увеличение количества солнечной радиации. С началом схода снега большая часть солнечной радиации идет на нагрев поверхности и, как следствие, наблюдается увеличение температурных различий между городской застройкой и всей остальной частью города. После достижения своего пика в июне, приход солнечной радиации снова начинает постепенно уменьшаться, что приводит к уменьшению прогрева зоны застройки по сравнению с остальной территорией города.

Таблица 3.14. Среднемесячные значения температурного влияния городской застройки на поле температуры внутри города по данным космических снимков MODIS за период с 2009 по 2013 гг.

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Температурное влияние городской застройки, °С	0,43	0,48	0,52	0,70	1,32	1,94	1,76	-	0,80	0,26	-	0,52

Следующий этап данной работы - расчет интенсивности «острова тепла» только лишь для плотно застроенной территории города с отсутствием или небольшим озеленением (Iз). Данный показатель рассчитывался как разность между средней температурой поверхности внутри границ плотной городской застройки с водной стороны и Московской области с другой.

Среднее значение Iз за 2009-2013 гг. составило 3,6 °С, в то время как рассчитанное значение для всей территории города по тем же данным на 0,8°С меньше (2,8°С). От случая к случаю значение интенсивности «острова тепла» для застроенной территории города изменялось от -0,13 до 8,98°С. Необходимо отметить, что минимально значение Iз наблюдается в тот же день 24.10.2010, что и общая интенсивность «острова тепла», а их значения практически совпадают (-0,13 и -0,14 С° соответственно). Что касается максимального значения Iз, то оно отличается от максимального I в тот же день более чем на один градус.

В ходе работы было проведено сравнение среднемесячных значений интенсивности «острова тепла» для всей территории города и только для городской застройки (таблица 3.15). Можно заметить, что в течение всего года Iз больше, нежели интенсивность «острова тепла» для всей территории города. Данный результат ожидаем, так как средняя температура поверхности внутри всего города занижена из-за наличия больших площадей лесопарковых зон (см. главу 3.2).

Максимальное среднемесячное значение наблюдается в июле в обоих случаях, в то время как минимальное в октябре. Также можно с уверенностью сказать о том, что в теплый сезон года значение «острова тепла» выше, нежели чем в холодный.

Таблица 3.15. Среднемесячные значения интенсивности «острова тепла» для всей территории города и только для зоны городской застройки по данным 99 космических снимков за период с 2009 по 2013 гг.

Месяц	Интенсивность «острова тепла» для городской застройки (Iз), °С	Интенсивность «острова тепла» для всей территории города (I), °С
Январь	3,20	2,93
Февраль	3,08	2,72
Март	2,89	2,49
Апрель	4,83	4,18
Май	3,90	2,61
Июнь	5,79	4,11
Июль	6,48	4,94
Август	-	
Сентябрь	2,06	1,39
Октябрь	0,68	0,45
Ноябрь	-	
Декабрь	2,34	1,96

По данным, представленным в табл. 3.15, отмечено изменение разности Iз и I от месяца к месяцу. В начале года она составляет ~0,3 °С, затем постепенно повышается и в июне достигает своего максимума

($\sim 1,7^{\circ}\text{C}$), а к концу года снова идет на убыль. Это также связано с учетом температуры парковых территорий при расчете интенсивности поверхностного «острова тепла» для всей территории города. С ростом охлаждающего влияния парков с апреля по июль, разность между значениями интенсивности «острова тепла застройки» и всего города увеличивается. Исходя из этого, можно еще раз с уверенностью сказать о том, что, если бы на территории города Москва не было такого количества крупных по площади парков, эффект городского «острова тепла» был бы гораздо сильнее.

3.5. Обобщение данных о температуре разных типов городской поверхности и анализ значимости различий между ними.

Результаты анализа температуры поверхности г. Москвы, приведённые выше для отдельных её типов, обобщены в таблице 3.16. В силу малости луговых и песчаных территорий он проведён двояко: по данным, как спутников Terra и Aqua с разрешением 1 км, так и спутника Landsat 8 с разрешением 100 метров. Анализ снимков Terra и Aqua возможен применительно лишь к трём наибольшим по площади типам – зоне плотной застройки, лесопаркам и водной поверхности, а также к площади Москвы в целом. Для разных типов поверхности отдельный расчёт их температурного влияния был осуществлён за разные периоды (например, для лесов и парков – за 11 лет с 2008 по 2018 гг. в § 3.2). В сводной таблице 3.16 использован общий четырехлетний период анализа для сравнимости всех данных: с 2009 по 2012 гг.

Табл. 3.16. Значения температуры поверхности и интенсивности температурного влияния по многолетним данным MODIS и снимкам спутника Landsat 8 за 2018 г.

По многолетним данным радиометра MODIS (2009-2012 гг.)						
	Москва в целом	Парки	Водные объекты	Городская застройка	Песчаные поверхности	Луга
Температура поверхности, $^{\circ}\text{C}$	9,4	8,2	9,4	10,1	—	—
Температурное влияние, $^{\circ}\text{C}$	—	-1,2	-0,0	0,7	—	—
По данным спутника Landsat 8 за 2018 год (6 снимков)						
Температура поверхности, $^{\circ}\text{C}$	9,8	6,9	6,3	11,9	10,6	9,7
Температурное влияние, $^{\circ}\text{C}$	—	-2,9	-3,5	2,1	0,8	-0,1

Как видим, из трёх типов лишь городская застройка по многолетним данным теплее остального города (она теплее и во все сезоны, и во все месяцы); в среднем за год – на $0,7^{\circ}\text{C}$. Самым холодным типом поверхности ожидаемо оказались леса и парки: они в среднем за 4 года холоднее остальной площади города на $1,2^{\circ}\text{C}$. Напомним для сравнения, что в среднем за 11 лет с 2008 по 2018 гг. значение этой разности очень близкое: $1,3^{\circ}\text{C}$. Влияние водных объектов на температуру поверхности города имеет маятниковый характер: летом они на $0,2^{\circ}\text{C}$ холоднее, а зимой на $0,3^{\circ}\text{C}$ теплее городской суши. В среднем за год значения температуры водной поверхности и остальной части города почти точно равны: разность их составляет всего лишь $-0,03^{\circ}\text{C}$.

Для включения в анализ луговых и песчаных поверхностей, площади которых в городе крайне малы, расчёт температуры всех типов был сделан отдельно по данным шести снимков спутника Landsat 8 на примере 2018 года. Как видно из таблицы, T_{Π} пойменных лугов близка к среднему значению для всего города, тогда как пляжи, песчаный карьер и другие мелкие объекты с песком или открытым грунтом иного гранулометрического состава в среднем теплее остального города на $0,8^{\circ}\text{C}$ – главным образом, за счёт их сильного нагрева в тёплом сезоне. Из таблицы 3.16 также видно, что по данным спутника с высоким разрешением отепляющий эффект городской застройки и охлаждающее влияние зелёных зон и воды проявились сильнее вследствие исключения краевых эффектов (частичного заполнения расчётных ячеек другими типами поверхности). Различия в средней температуре поверхности всей Москвы в 2009-2013 гг. и в 2018 г. могут объясняться как погодными особенностями 2018 года, так и ограниченной выборкой доступных для анализа снимков спутника Landsat 8.

Для подтверждения неслучайности полученных результатов и достоверности сделанных выводов был проведен анализ статистической значимости различий температуры трёх типов поверхности: лесопарковых зон, воды и плотной городской застройки. Для проверки значимости был использован классический критерий Стьюдента (z-тест):

$$Z = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{\sigma^2(X)}{n} + \frac{\sigma^2(Y)}{m}}} \quad (13),$$

где X и Y – математические ожидания обеих выборок, $\sigma^2(X)$ и $\sigma^2(Y)$ – их дисперсии; n и m – их размеры. Анализ проведён по данным 84 снимков спутников Terra и Aqua за 4 года: с 2009 по 2012 гг. Очевидно, что годовой ход температуры поверхности сам по себе создаёт огромный разброс значений, так что анализ достоверности в целом за год непоказателен (фактические значения Z сильно занижены). Очевидно также, что различия между температурой лесопарковых зон и поверхности воды незначимы, поскольку обоим этим типам присуще охлаждающее влияние. Поэтому анализ проведён отдельно для четырёх сезонов и только в части сравнений плотной застройки как с лесопарками, так и с водными объектами. Результаты расчётов приведены в Таблицах 3.17 и 3.18.

Как видим из Таблицы 3.18, в большинстве случаев нулевая гипотеза о случайности различий подтверждается этим критерием. Лишь летом различия между температурой разных типов городской поверхности оказались неслучайны: при сравнении зон плотной застройки с водной поверхностью они статистически значимы с доверительной вероятностью $p = 0,95$, а с лесами и парками – даже с $p = 0,999$ (т.е. с уровнем значимости $0,1\%$). Весной и осенью до начала вегетации и после опада листьев, а также зимой при наличии на всей территории города снежного покрова различия между типами поверхности выражены слабее. Следует, конечно, учесть также очень сильную дисперсию D значений всех трёх выборок весной и осенью вследствие нестационарности процессов: значения D отражают не столько

естественный разброс значений в отдельные дни, сколько быстрые изменения температуры поверхности в годовом ходе. Поэтому для переходных сезонов, особенно для весны, как и для года в целом, реальная значимость выборочных различий может быть маскирована большой амплитудой годового хода $T_{\text{п}}$.

Таблица 3.17. Статистические характеристики температуры разных типов поверхности Москвы в разные сезоны по данным спутников MODIS, 2009-2012 гг.

	Плотная застройка	Водная поверхность	Леса и парки
Зима.			
Среднее значение, °С	-12,767*	-12,771*	-13,08
Дисперсия, °С	20,40	19,01	29,01
Размер выборки	29	29	29
Весна.			
Среднее значение, °С	14,29	13,78	12,61
Дисперсия, °С	170,86	140,91	131,72
Размер выборки	32	32	32
Лето.			
Среднее значение, °С	32,56	30,20	28,48
Дисперсия, °С	6,53	7,84	6,52
Размер выборки	14	14	14
Осень.			
Среднее значение, °С	14,26	13,92	13,04
Дисперсия, °С	48,50	42,69	37,35
Размер выборки	9	9	9

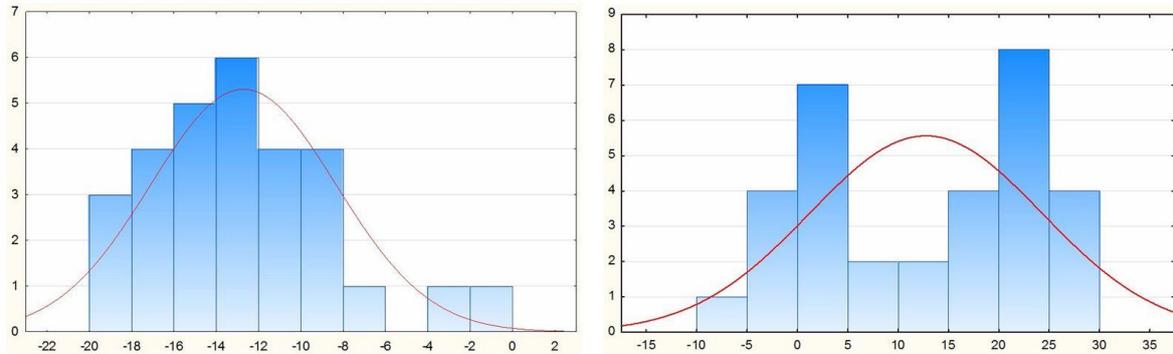
**Разумеется, тысячные доли градуса статистически незначимы, они приведены здесь для иллюстрации близости температуры зоны застройки и поверхности воды.*

Таблица 3.18. Значения Z критерия Стьюдента при сравнении температуры разных типов поверхности Москвы по данным спутников MODIS, 2009-2012 гг.

Зима.	
Сравнение зон плотной застройки и лесопарков	0,24
Сравнение зон плотной застройки и водных объектов	0,004
Весна.	
Сравнение зон плотной застройки и лесопарков	0,55
Сравнение зон плотной застройки и водных объектов	0,16
Лето.	
Сравнение зон плотной застройки и лесопарков	4,23
Сравнение зон плотной застройки и водных объектов	2,33
Осень.	
Сравнение зон плотной застройки и лесопарков	0,39
Сравнение зон плотной застройки и водных объектов	0,10

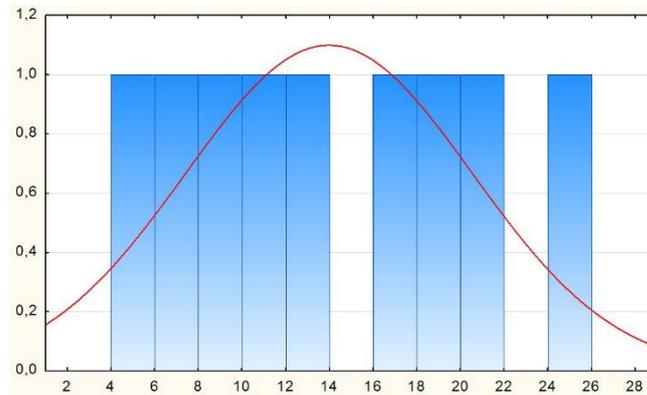
Критерий Стьюдента широко известен и часто используется в различных задачах. Однако нужно учесть, что он параметрический и предполагает близость выборочных распределений к нормальному

закону. Между тем, далеко не все функции распределений рассмотренных нами выборок соответствуют этому закону. Три примера их приведены на рисунке 3.33. Если распределение температуры воды зимой можно считать качественно близким к нормальному, хотя бы приблизительно, то в остальных двух случаях это не так.



а) Температура водных объектов зимой;

б) Температура лесопарков весной;



в) Температура водных объектов осенью.

Рис.3.33. Функции распределения разных типов поверхности в разные сезоны, 2009-2012 гг. По горизонтали – температура поверхности, °С; по вертикали – число случаев.

Распределение температуры лесов и парков весной бимодальное, что отражает наличие зимней и летней мод и быстрый переход между ними (быстрый рост температуры в апреле). Что касается температуры поверхности воды осенью, то её постепенное и непрерывное остывание приводит к равномерному распределению, когда число случаев почти во всех градациях гистограммы одинаковое.

При отличиях функций распределения от нормального закона критерий Стьюдента можно использовать лишь приближённо для качественных оценок, границы доверительных вероятностей могут быть смещены. Поскольку многие из функций распределений в нашем случае существенно отличаются от Гауссова, требуется дополнительная проверка статистической значимости различий с использованием одного из непараметрических критериев. Поэтому, в дополнение к (14), проверим также значимость различий в температуре разных типов поверхности по критерию Вилкоксона, который не требует исходной гипотезы о виде распределения. Этот критерий основан на ранжировании случайных величин обеих выборок и суммировании сдвигов значений в обе стороны и фактически сводится к подсчёту числа

инверсий (обратных сдвигов по сравнению с обычной разностью) при проверке нулевой гипотезы о случайном характере различий. Для отвержения нулевой гипотезы, то есть при значимых различиях между математическими ожиданиями, число инверсий должно быть существенно меньше значения $(m \cdot n / 2)$, характеризующего число равновероятных сдвигов в обе стороны.

При сравнении T_{Π} плотной застройки и лесопарковых территорий для лета ($m \cdot n / 2 = 98$) инверсий, то есть бóльших значений T_{Π} в лесопарках, чем в зоне застройки, оказалось 26, а при сравнении плотной застройки с водной поверхностью – 52. При $n = m = 14$ критическое число инверсий с уровнем значимости 1 % составляет 42. Таким образом, различия в температуре поверхности между плотной застройкой и зелёными зонами являются статистически значимыми с доверительной вероятностью $p = 0,99$, а между застройкой и водной поверхностью – нет. Для остальных сезонов число инверсий при сравнении температуры зон плотной застройки с температурой обоих других типов поверхности оказалось значительно выше пороговых значений, что подтверждает нулевую гипотезу об отсутствии статистически значимых различий между этими типами. Так, осенью при $n = m = 9$ при сравнении T_{Π} плотной застройки с лесопарковыми территориями число инверсий достигло 34, а с водной поверхностью – 40 (критическое число инверсий с уровнями значимости 5 и 1 % при $n = 9$ составляет соответственно 17 и 11). Зимой при сравнении температуры поверхности зон застройки с лесопарками и с водными объектами число инверсий составило соответственно 375 и 421. Весной при сравнении T_{Π} зон застройки с лесопарками число инверсий составило 431. Таким образом, лишь для летних условий статистическая достоверность различий между температурой плотной застройки и городских лесопарков (T крон деревьев и поверхности в просветах между ними) подтверждается обоими критериями. Это вполне ожидаемо, так как леса и парки в годовом ходе проявляют сильный охлаждающий эффект именно летом, в остальные сезоны он слабее.

Выводы к главе.

1. На традиционной территории «старой» Москвы находятся 28 лесопарков площадью не менее $0,5 \text{ км}^2$, общая площадь которых составляет 124 км^2 (от самого большого природного леса Лосинный остров площадью в пределах МКАД вместе с парком Сокольники $38,8 \text{ км}^2$ до самой маленькой зеленой зоны Ваганьковского кладбища площадью $0,51 \text{ км}^2$). Средняя интенсивность «островов холода» на территории Москвы по данным о температуре поверхности всех 28 парковых зон составляет $-1,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и от случая к случаю меняется в широких пределах от $-4,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Все слабopоложительные значения параметра ΔT_{Π} применительно к лесопаркам наблюдались в зимние и осенние дни при отсутствии снежного покрова или во время оттепелей.
2. Годовой ход интенсивности «островов холода» отмечен максимумом по абсолютной величине в июне ($-2,7 \pm 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и минимумом в ноябре ($-0,2 \pm 0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

3. Внутренние части крупных лесов и парков вдали от их границ, не подвергающиеся встречному обогревающему воздействию города, существенно холоднее, чем вся их территория. Интенсивность «островов холода», которую создают эти внутренние части лесопарков, составила в среднем $-2,4$ °С.
4. Для отдельных лесопарков интенсивность создаваемых ими локальных «островов холода» существенно различна. Это вызвано различиями в их характеристиках, таких как размер, породный состав, объем биомассы и плотность древостоя и сомкнутости крон.
5. Выявлена статистически значимая экспоненциальная связь между значением охлаждающего эффекта и площадью парка с корреляционным отношением $\eta = 0,63$. В целом, чем больше площадь парка, тем более сильное охлаждающее влияние он оказывает.
6. Выявлена достоверная тесная линейная зависимость между значениями вегетационного индекса NDVI и интенсивностью локальных «островов холода» на территории нашей столицы с коэффициентом корреляции $R = 0,85$. Эту связь можно объяснить следующим образом: чем больше значение NDVI и, как следствие, больше активной фотосинтезирующей биомассы, тем сильнее проявляется локальный «остров холода» в поле температуры поверхности.
7. Связь интенсивности «островов холода» с индексом листовой поверхности в 20 лесопарках Москвы также оказалась статистически значимой и близкой к линейной с коэффициентом корреляции $R = 0,47$.
8. Температурное влияние водных объектов носит маятниковый характер в годовом ходе: в теплом сезоне они на $\sim 0,2$ °С холоднее, а в холодном на $\sim 0,3$ °С теплее остальной площади города.
9. Песчаные поверхности теплее остальной части города в среднем на $0,8$ °С. Температура луговых поверхностей близка к средним значениям $T_{\text{п}}$ для всего города.
10. Зоны плотной городской застройки теплее остальной поверхности города в среднем на $0,6$ °С. Превышение температуры их поверхности по сравнению с остальным городом наибольшее в июне и июле ($\sim 1,8 \div 2,0$ °С) и наименьшее в холодный период года ($\sim 0,3 \div 0,5$ °С).
11. Поверхность плотной городской застройки (крыши зданий, дорожное покрытие и открытая земля между зданиями) теплее поверхности фоновой местности Московского региона в среднем на $3,6$ °С.

Различия между выборочными математическими ожиданиями температуры плотной городской застройки и лесопарковых территорий статистически достоверны только летом с доверительной вероятностью, по меньшей мере, $0,99$ %, а при сравнении плотной застройки с водными объектами – с доверительной вероятностью $0,95$ %.

Глава 4. Температура поверхности и «острова тепла» малых городов Московского региона.

Большой интерес представляет именно пространственное распределение температуры поверхности в регионе, закономерности ее изменения внутри города и в области в целом, ведь только космические данные о температуре поверхности позволяют в целом и общем определить, насколько заметны изменения и подчиняются ли они географической зональности. Интересным результатом работы стали карты температурного поля Московского региона, построенные с различным временным интервалом.

4.1 Исследование поля температуры поверхности Московского региона, его географической зональности и многолетних изменений по данным спутников Terra и Aqua.

Для построения карт использовалось программное обеспечение Surfer 10.1. Эта программа предназначена для создания, редактирования и модификации различных типов карт. Основное свое применение она нашла в построении 3D моделей поверхности, однако также хорошо применяется и для построения плоскостных карт распределения различных компонентов. Метод, на котором основан данный продукт - это расчет значений параметра в узлах регулярной сетки по исходным данным в исходных точках области. Расчет значений в узлах сетки производится путем различных методов интерполяции, которых в программе заложено более 20. В данной работе использовался метод построения карт, считающийся универсальным, под названием Kriging, основанный на построении модели распределения функции с присвоением весовых характеристик точкам сети.

В основу карт была заложена расчетная матрица температуры поверхности по данным космических снимков внутри области сравнения в виде описанного вокруг Московского региона прямоугольника. Однако проблемой стало большое количество значений в расчетной матрице температуры. Напомним, что количество ячеек в данном случае приближается к ста тысячам. Для интерполяции такого объема данных требуются чрезвычайно большие вычислительные ресурсы. Поэтому пришлось искусственно уменьшать пространственное разрешение данных для анализа распространения температуры поверхности в Московском регионе.

На первом этапе проводился подбор пространственного разрешения. Это необходимо для того, чтобы найти такую сетку, при которой будет хорошо виден «остров тепла» Москвы, и при этом не проявятся различные пространственные дефекты интерполяции и неравномерного распределения данных внутри отдельных ячеек в течение года. Уменьшение пространственного разрешения данных производилось путем осреднения температуры поверхности по квадратам различного размера. В результате у нас получились карты с размером сетки 1×1 км (только для территории г. Москва), 15×15 км и 30×30 км по данным одного и того же космического снимка 25.01.2012 г. (рис. 4.1). Как видим, поле T_p на карте с разрешением 15×15 км на (рис. 4.1 б) крайне неоднородно со множеством локальных максимумов и минимумов, отражающих влияние мезомасштабных и локальных факторов (особенностей

рельефа, наличия лесных массивов, водоёмов с полыньями, населённых пунктов с отоплением зданий и др.). На карте с разрешением 30×30 км (рис. 4.1 в) изотермы вследствие генерализации сильно сглажены, и из нескольких десятков экстремумов остаются лишь семь. Главные из них – это максимум в Москве, соединённый перемычкой с областью повышенных значений южнее Солнечногорска, а также минимумы под Наро-Фоминском и на крайнем востоке региона. Действительно, пониженные значения температуры воздуха на станции Наро-Фоминск хорошо известны метеорологам вследствие неполной показательности этой станции из-за понижения там в рельефе. Заметим, что генерализация приводит к некоторому смещению минимума под Наро-Фоминском, а также к занижению интенсивности и этого минимума, и поверхностного «острова тепла» Москвы. В первом случае последней замкнутой изотермой на рис. 4.1 б) является -24 °С, а на рис. 4.1 в) -23 °С. В Москве же с уменьшением разрешения до 30×30 км исчезают сразу две изотермы: на рис. 4.1 б) последней замкнутой изотермой является: -15 °С, а на рис. 4.1 в) – лишь -17 °С, тогда как на карте с разрешением 1×1 км (рис. 4.1 а) вся северная часть города окружена изотермой -14 °С, а в районе Химок выклинивается даже изотерма -13 °С. Таким образом, в данном примере генерализация приводит к занижению $\Delta T_{\text{П}}$ на ~ 3 °С.

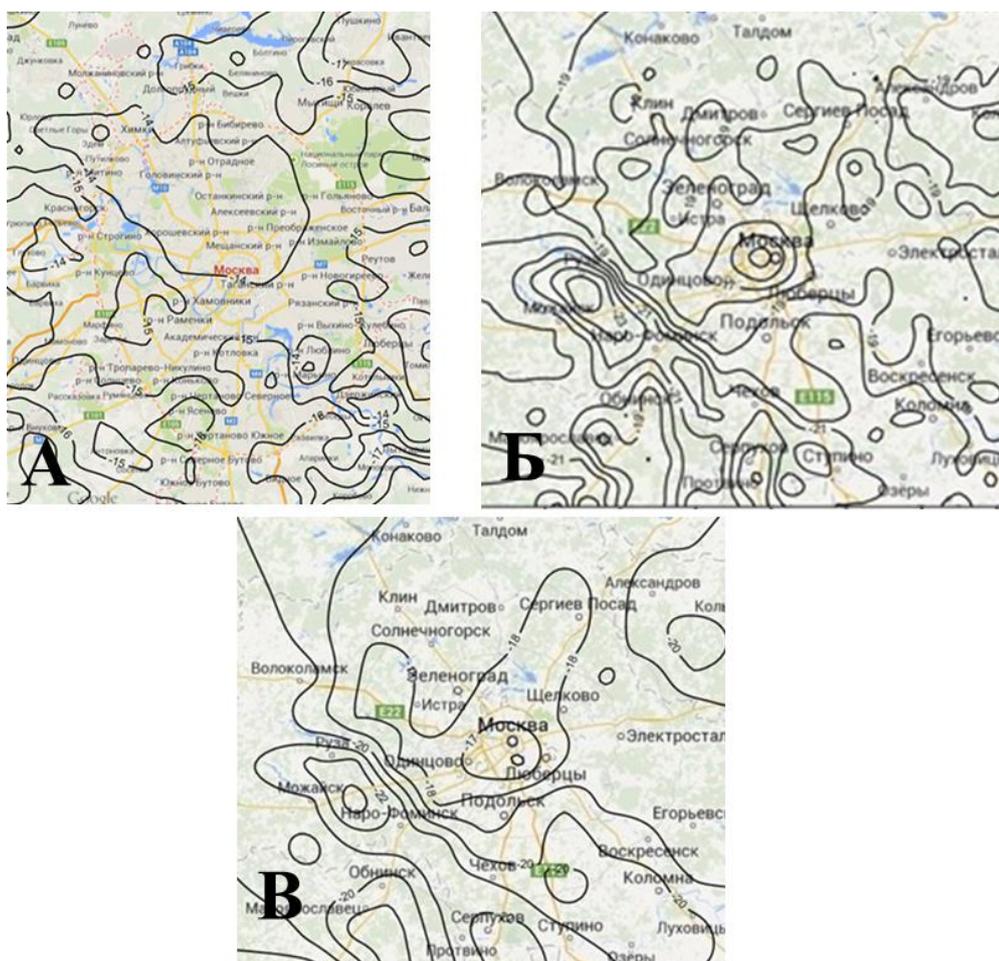


Рис. 4.1 Карты поля температуры поверхности с различным пространственным разрешением за 25.01.2012 г.: А – Карта Москвы с шагом сетки 1×1 км; Б – Карта Московской области с шагом сетки 15×15 км; В – Карта Московской области с шагом 30×30 км

На рис. 4.2 приведены карты температуры поверхности, построенные в среднем за 2008-2015 гг. с шагом сетки 1×1 км: сверху для территории самой Москвы, нижняя часть рисунка – для территории региона исследования.

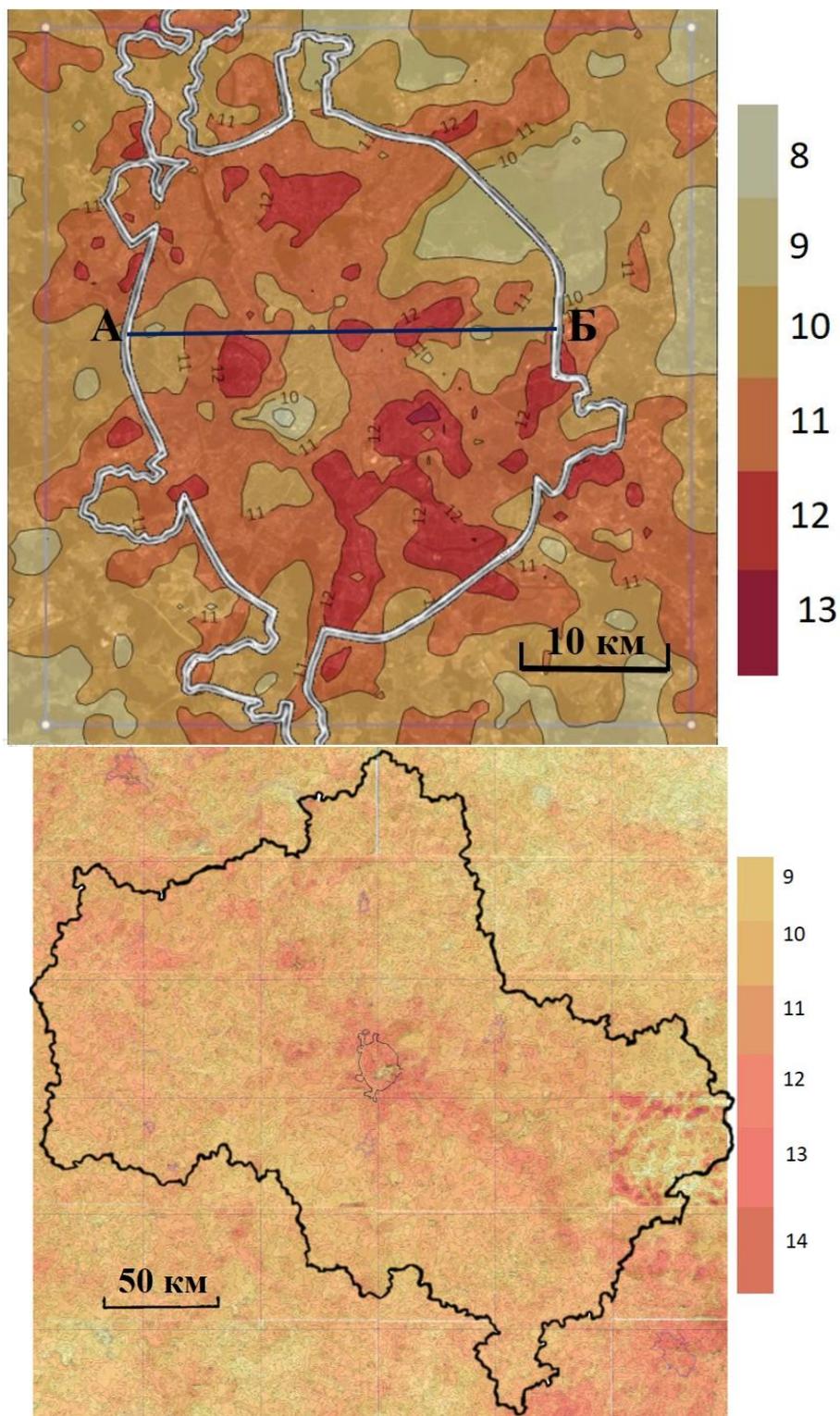


Рис. 4.2 Карта температуры поверхности с разрешением 1 км в среднем за 2008-2015 гг.: верх - карта температурного поля Москвы, низ – карта температурного поля всего региона исследования (шкала в °C).

На таких картах отражаются основные закономерности изменения температуры поверхности. Например, на карте температурного поля Москвы четко выражено понижение температуры в лесопарке Лосиный остров, а также повышение температуры на юго-востоке города, связанное с наличием там промышленных зон с плотной городской застройкой. Однако при построении таких карт существует вероятность ошибочно оценить распределение температуры. Например, в центре города, как показывают температурные профили, построенные по данным двух летних и одного зимнего совершенно безоблачных снимков, всегда наблюдается повышение температуры поверхности (рис. 4.3). Заметим также, что на обоих летних снимках область повышенных значений является протяжённой наподобие «плато» и охватывает также ближнюю к центру периферию города. К западу и к востоку от неё значения $T_{\text{П}}$ ожидаемо уменьшаются вследствие значительных лесопарковых зон на дальней городской периферии. Наименьшая $T_{\text{П}}$ в двух случаях из трёх отмечена вблизи восточной границы города в большом Измайловском лесопарке.

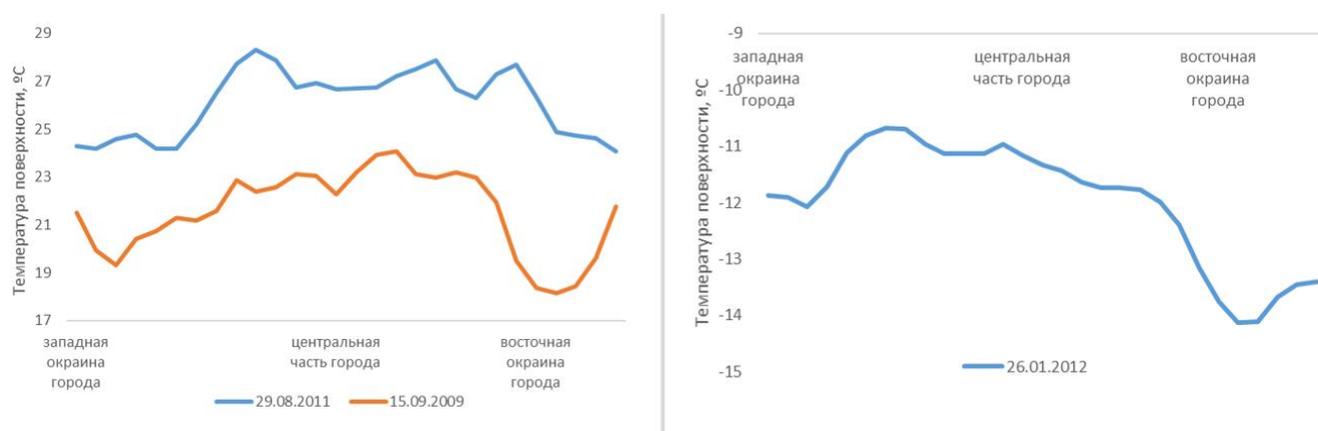


Рис. 4.3 Температурные разрезы через центральную часть города Москва. Линия разреза АБ отображена на рис. 4.2

Если рассматривать карту температурного поля Москвы (рис.4.2), построенную в среднем за 2008-2015 гг. с использованием не только безоблачных, но и малооблачных снимков, то ближняя к центру западная периферия города оказывается одной из самых холодных зон. В чем же причина? Оказывается, что на большинстве снимков летнего периода центр города закрыт антропогенной дымкой вследствие выбросов автомобильных двигателей и оставшихся в городе промышленных предприятий, так что данные о температуре поверхности этой части города в теплый период часто недоступны. При осреднении за многолетний период наличие пропусков данных приводит к общему занижению температуры поверхности в центральной части города. Уменьшение разрешения путем осреднения по квадратам 15×15 км позволяет избежать проявления на среднемноголетних картах подобных ошибок.

На рис. 4.2 снизу представлена карта температуры поверхности в Московском регионе построенная по сетке 1×1 км. На ней можно отметить сильную неоднородность поля $T_{\text{П}}$, в котором прослеживаются как локальные понижения, так и повышения температуры поверхности. Видны две основные зоны высоких значений: на территории Москвы в центре снимка и в Рязанской области в его юго-восточной

части. Слабо выделяются даже острова тепла вокруг других крупных городов региона исследования. Однако и здесь возможны ошибки, связанные с наличием облачности над территорией региона на каждом отдельном снимке. Кроме того, столь сильная неоднородность осложняет анализ общих закономерностей $T_{\text{п}}$ для региона в целом.

Вернемся к рис. 4.1 в). При осреднении температуры поверхности по сетке 30×30 км сглаживаются многие локальные особенности. Однако при таком пространственном разрешении, как уже отмечено, «остров тепла» проявляется слабее и описывается всего одной замкнутой изотермой. Заметим также, что многие локальные экстремумы $T_{\text{п}}$ на отдельных снимках неустойчивы во времени и пространстве и при осреднении по большим выборкам снимков должны сглаживаться. Поэтому было принято решение считать сетку с шагом осреднения 15×15 км наиболее пригодной, вследствие чего именно она использовалась во всех дальнейших расчетах в программе Surfer.

Итогом работы стало построение карты температуры поверхности за период времени с 2000 по 2017 гг. (рис.4.4). Как видим, действительно, поле $T_{\text{п}}$ в значительной мере сглажено в результате осреднения по огромной выборке снимков за 18 лет.

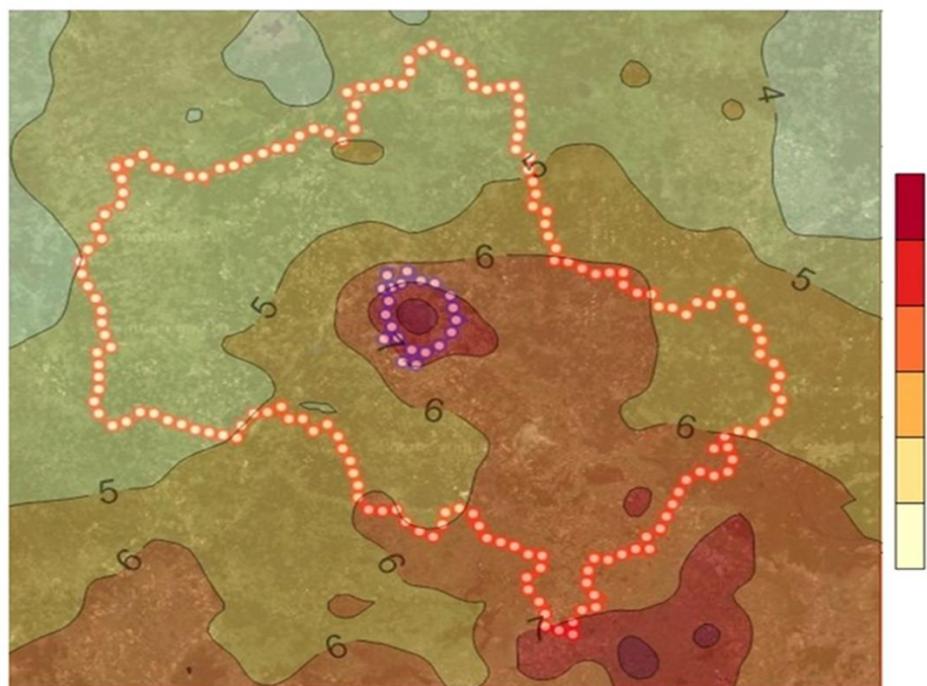


Рис. 4.4 Пространственное поле температуры поверхности по данным спутников за 2000-2017 гг. *Изотермы проведены с шагом 1 °С*

На рис. 4.4 можно увидеть, что в районе Москвы прослеживается заметное сгущение изотерм, что является еще одним доказательством существования в пределах города поверхностного «острова тепла», выраженного в двух замкнутых изотермах (7 и 8 °С) и одной полузамкнутой, вытянутой в направлении на юго-восток, изолинии 6 °С. В среднем по четырем ячейкам расчетной сетки площадью 225 км^2 каждая, охватывающим большую часть «старой» Москвы, температура поверхности по спутниковым данным ($T_{\text{п}}$) составляет $7,3 \text{ °С}$; средняя во всех остальных ячейках вокруг Москвы, в которые столица не попадает,

$T_{\Pi} = 5,4$ °С, и только в ближнем Подмоскowie в радиусе 30 км от границ города (в среднем для 32 ячеек вокруг столицы) $T_{\Pi} = 5,9$ °С. Разумеется, приведенная выше оценка интенсивности поверхностного острова тепла (2,6 °С) более точна, поскольку получена по данным с более высоким разрешением 1 км. Очевидно, что более высокая средняя температура поверхности в ближнем Подмоскowie отражает влияние крупных пригородов столицы, каждому из которых присущ свой собственный остров тепла. Впрочем, с увеличением радиуса области сравнения это влияние быстро сходит на нет.

Помимо этого, мы можем наблюдать в целом заметное увеличение ТС в направлении с северо-запада на юго-восток. Максимальная среднегодовая температура поверхности наблюдается в приграничных районах Рязанской области. Она достигает +8 °С, а в некоторых районах даже выше. Минимальные же значения в 3-4 °С, как и следовало ожидать, наблюдаются на северо-западе и северо-востоке прямоугольной зоны сравнения в приграничных с Подмоскowieм районах Тверской, Смоленской и Владимирской областей.

Для определения причин подобного распределения температуры поверхности по территории Московского региона был проведен регрессионный анализ зависимостей температуры поверхности в округах Московской области от различных природных и антропогенных факторов, таких как: географические координаты, NDVI (косвенный показатель биопродуктивности территории), лесистость, тип почвы, степень переувлажнения почв, общая плотность населения и плотность городского населения (табл. 4.1).

Температура поверхности и NDVI рассчитаны с использованием данных MODIS отдельно для каждого приведенного в таблице крупного округа Московской области как среднее из всех пригодных для анализа снимков за 2018 год. Процент лесистости, тип почв и степень их переувлажнения для каждого региона были определены по картам из Атласа Московской области [Ссылка на атлас Московской области]. Общая плотность населения и плотность городского населения в регионах были рассчитаны по данным Федеральной службы государственной статистики за 2021 год [ссылка на данные о численности населения Росстат].

Исходя из приведенных ниже данных был проведен регрессионный анализ, в котором зависимой переменной выступала температура поверхности, а остальные показатели (координаты, лесистость, NDVI, тип и состояние почв и плотность населения) - независимые переменные. Рассчитанные коэффициенты корреляции и значения критерия Стьюдента приведены в табл. 4.2.

Табл. 4.1 Влияние природных и антропогенных факторов на значение температуры поверхности в регионах Московской области

Годской округ/район Московской области	Средняя по округу температура поверхности, °С	Географические координаты	NDVI	Лесистость, %	Тип почвы	Степень переувлажнения почв, %	Общая плотность населения, чел/км ²
Балашиха	11,2	55,80° с.ш. 37,94° в.д.	0,37	30-40	Дерново-подзолистые супесчаные	50-75	2125,5
Волоколамский	9,7	56,03° с.ш. 35,95° в.д.	0,42	30-40	Подзолистые суглинистые	25-50	23,0
Воскресенск	10,8	55,31° с.ш. 38,66° в.д.	0,39	20-30	Болотные подзолистые	25-50	188,2
Дмитровский	9,8	56,33° с.ш. 37,52° в.д.	0,41	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	75,1
Домодедово	11,2	55,44° с.ш. 37,75° в.д.	0,39	30-40	Светло-серые лесные суглинистые	10-25	222,3
Егорьевск	10,2	55,38° с.ш. 39,03° в.д.	0,41	>50	Болотные подзолистые	50-75	61,5
Зарайск	11,2	54,75° с.ш. 38,88° в.д.	0,33	0-10	Темно-серые лесные суглинистые	0-10	39,8
Истра	10,2	55,91° с.ш. 36,86° в.д.	0,42	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	97,7
Кашира	11,3	54,83° с.ш. 38,13° в.д.	0,35	10-20	Темно-серые лесные суглинистые	0-10	96,6
Клин	9,4	56,33° с.ш. 36,70° в.д.	0,43	40-50	Подзолистые суглинистые	50-75	63,3
Коломна	10,6	55,08° с.ш. 38,76° в.д.	0,38	20-30	Светло-серые лесные суглинистые	25-50	104,9
Красногорск	11,4	55,83° с.ш. 37,33° в.д.	0,38	30-40	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	1210,0
Ленинский	11,8	55,56° с.ш. 37,69° в.д.	0,35	30-40	Дерново-подзолистые супесчаные	10-25	883,8
Лосино-Петровский	10,6	55,87° с.ш. 38,20° в.д.	0,39	30-40	Болотные подзолистые	25-50	573,3
Лотошино	10,3	56,23° с.ш. 35,64° в.д.	0,42	10-20	Дерново-подзолистые супесчаные	50-75	16,4
Луховицы	11,2	54,96° с.ш. 39,10° в.д.	0,35	20-30	Темно-серые лесные суглинистые	25-50	45,7
Люберцы	12,5	55,66° с.ш. 37,88° в.д.	0,33	30-40	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	2608,6
Можайский	9,7	55,50° с.ш. 36,30° в.д.	0,42	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	27,2

Мытищи	10,3	55,91° с.ш. 37,74° в.д.	0,36	40-50	Болотные подзолистые	25-50	633,6
Наро-Фоминский	10,4	55,38° с.ш. 36,73° в.д.	0,43	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	50-75	112,2
Богородский	10,6	55,85° с.ш. 38,44° в.д.	0,39	30-40	Болотные подзолистые	50-75	260,7
Одинцовский	10,7	55,67° с.ш. 37,26° в.д.	0,41	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	265,6
Орехово-Зуевский	10,2	55,80° с.ш. 38,96° в.д.	0,41	40-50	Болотные подзолистые	>75	124,7
Павлово-Посадский	10,5	55,75° с.ш. 38,65° в.д.	0,41	>50	Болотные	>75	134,4
Подольск	11,6	55,43° с.ш. 37,54° в.д.	0,39	>50	Светло-серые лесные суглинистые	10-25	981,5
Пушкинский	10,0	56,01° с.ш. 37,85° в.д.	0,40	40-50	Болотные подзолистые	25-50	241,5
Раменский	11,2	55,57° с.ш. 98,23° в.д.	0,39	30-40	Светло-серые лесные суглинистые	25-50	225,4
Рузский	9,9	55,68° с.ш. 36,18° в.д.	0,42	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	38,8
Сергиево-Посадский	9,2	56,30° с.ш. 38,13° в.д.	0,41	>50	Подзолистые суглинистые	25-50	103,6
Серебряные Пруды	11,9	54,46° с.ш. 38,71° в.д.	0,34	0-10	Черноземы	0-10	27,2
Серпухов	10,7	54,91° с.ш. 37,41° в.д.	0,41	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	146,1
Солнечногорск	9,9	56,18° с.ш. 36,96° в.д.	0,41	40-50	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	155,5
Ступино	10,6	54,88° с.ш. 38,06° в.д.	0,40	30-40	Светло-серые лесные суглинистые	10-25	69,9
Талдомский	9,5	56,73° с.ш. 37,36° в.д.	0,42	40-50	Болотные подзолистые	50-75	32,4
Химки	11,2	55,89° с.ш. 37,44° в.д.	0,36	20-30	Дерново-подзолистые суглинистые	10-25	
Черноголовка	10,3	56,00° с.ш. 38,38° в.д.	0,39	30-40	Болотные подзолистые	25-50	366,8
Чехов	10,6	55,14° с.ш. 37,45° в.д.	0,43	40-50	Светло-серые лесные суглинистые	50-75	152,3
Шатура	9,7	55,56° с.ш. 39,53° в.д.	0,41	>50	Болотные подзолистые	>75	32,4
Шаховская	9,9	56,01° с.ш. 35,50° в.д.	0,43	30-40	Дерново-подзолистые суглинистые	25-50	21,0
Щелково	10,3	55,91° с.ш. 38,00° в.д.	0,40	40-50	Болотные подзолистые	25-50	306,4

Таблица 4.2 Значение коэффициента корреляции между температурой поверхности и другими природными и антропогенными факторами (уровень значимости 0,1%)

	Географические координаты	NDVI	Лесистость, %	Тип почв	Степень переувлажнения почв, %	Общая плотность населения, чел/км ²	Плотность городского населения, чел/км ²
Температура поверхности	0,57	0,81	0,50	0,56	0,43	0,60	0,58
Критерий Стьюдента	4,28	8,51	3,56	4,17	2,94	4,62	4,39
Выводы:	Значимая, заметная связь	Значимая, высокая связь	Значимая, заметная связь	Значимая, заметная связь	Значимая, умеренная связь	Значимая, заметная связь	Значимая, заметная связь

Исходя из расчетов, приведенных в таблице 4.2, можно сделать вывод, что в наибольшей степени распределение температуры поверхности по территории Московского региона зависит от значения вегетационного индекса NDVI, то есть состояния растительного покрова на территории округов. Коэффициент корреляции в этом случае равный 0,81 показывает наличие между переменными значимой высокой связи. Приблизительно в равной степени температура поверхности также зависит от географических координат, преобладающего типа почв, плотности городского и общего населения на территории Московской области. С этими переменными температура поверхности имеет значимые заметные связи. В наименьшей степени на поле температуры поверхности влияет степень переувлажнения почв и лесистость территории (то есть доля территории, занятая землями лесного фонда РФ).

Сопоставим карты температуры поверхности и температуры воздуха на высоте 2 метра, представленной в [33] (рис.4.5). Примечательно, что сходное распределение проявляется во все летние месяцы, а также для суммы температур воздуха более 10 °С. Мячкова Н.А. и Сорокина В.Н. предположили, что повышение температуры воздуха летом в направлении с северо-запада на юго-восток объясняется более частой повторяемостью вхождения теплых тропических воздушных масс из Казахстана и Средней Азии. Таким образом, можно сделать вывод, что общая географическая зональность в Московском регионе проявляется в распределение температуры не только поверхности, но и воздуха на высоте 2 м и в значительной мере определяется атмосферной циркуляцией.

Потепление нижних слоев атмосферы Земли - это подтвержденный и всесторонне изученный факт. Однако возникает вопрос, теплеет ли поверхность в той же степени, что и атмосфера? Для изучения этого

вопроса были рассчитаны значения средней температуры поверхности за период 2000-2020 годов как в Московском регионе без учета Москвы, так и отдельно в столице (рис. 4.6).

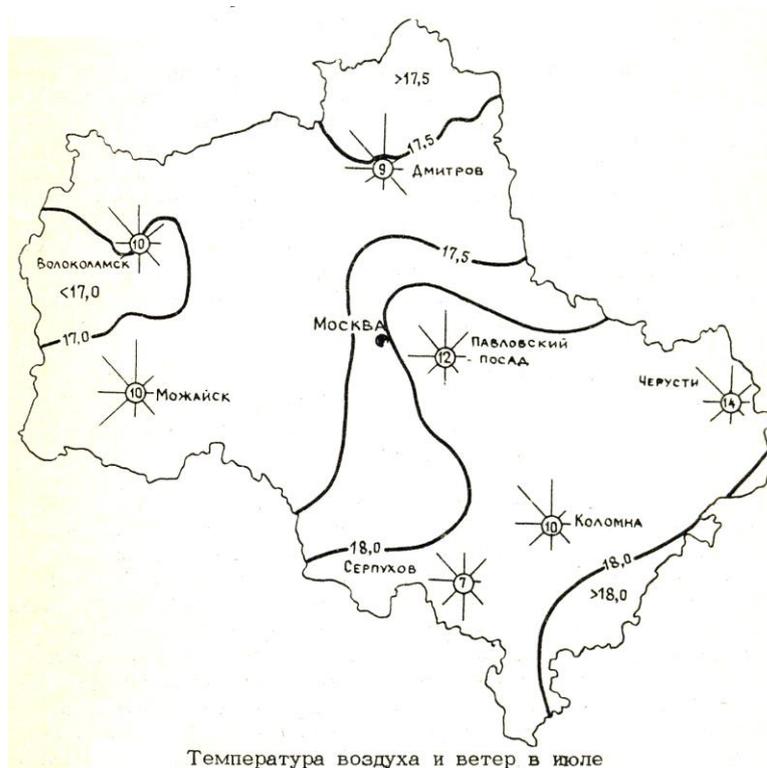


Рис. 4.5 Карта температуры воздуха в Московской области в июле

Каждое среднегодовое значение было рассчитано с нормированием на среднесезонные значения. Поскольку число доступных для анализа снимков бывает различным в разные месяцы и сезоны года, простое осреднение $T_{\text{П}}$ по всей годовой выборке значений неизбежно приводит к смещению оценок из-за влияния годового хода $T_{\text{П}}$. Для исключения этого влияния необходимо нормировать значения в отдельные месяцы или сезоны с приданием им равных весов при осреднении за год. Однако нормировать значения по отдельным месяцам невозможно, поскольку во многих случаях в течение того или иного месяца не находится ни одного безоблачного или даже малооблачного снимка. Поэтому нормирование проводилось нами по отдельным сезонам, а среднегодовое значение $T_{\text{П}}$ считалось средним из четырёх среднесезонных. Но даже при таком подходе не удалось получить среднегодовое значение за 2012 год, поскольку осенью в тот год не оказалось ни одного доступного для анализа снимка.

Можно увидеть, что средняя температура поверхности год от года сильно меняется: от $+11,7^{\circ}\text{C}$ в 2000 г. до $+3,2^{\circ}\text{C}$ в 2004 г. в Подмоскowie и от $+13,9^{\circ}\text{C}$ в 2000 г. до $+5,9^{\circ}\text{C}$ в 2004 г. в Москве. Такой разрыв объясняется как межгодовой изменчивостью погодных условий, так и различной обеспеченностью снимками в отдельные годы. Так, например, в 2004 году не было ни одного пригодного для анализа снимка с 19 апреля по 21 августа. Это говорит о том, что даже при нормировании на сезоны года значения температуры поверхности и в Московской области, и в Москве в 2004 году могут быть

немного занижены. Несмотря на это, в целом полученные среднегодовые значения вполне надёжны. Приведённые на рис. 4.6 линейные тренды не показывают статистически значимых изменений температуры поверхности ни в Московской области, ни в Москве за последний 21 год: оба коэффициента линейной регрессии оказались менее $0,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{год}$. Можно сделать вывод, что температура поверхности за рассмотренный период оставалась примерно на одном уровне, но с сильными межгодовыми колебаниями.

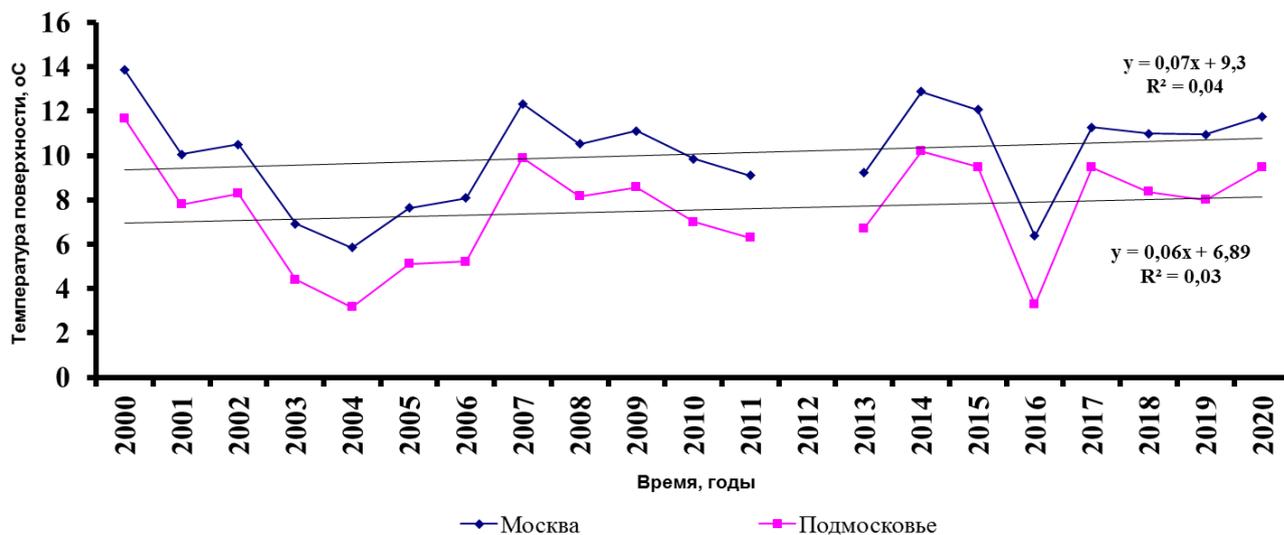


Рис. 4.6 Среднегодовые изменения температуры поверхности в Московском регионе нормированные по сезонам года

Что же происходит с температурой поверхности в самой столице? Как можно заметить, во все рассмотренные годы температура поверхности в столице значительно выше температуры в области. Однако, как и в Московском регионе, температура поверхности в Москве также не показывает статистически значимого изменения за период исследования.

4.2. Сравнительный анализ поверхностных «островов тепла» городов и малых населённых пунктов Московского региона.

Городские «острова тепла» - это явление, свойственное не только крупным городам, но и малым населённым пунктам [30]. Но большинство авторов сталкиваются с серьёзной проблемой определения и изучения температурной аномалии в небольших населённых пунктах. Это связано с ограниченным количеством метеорологических станций, ведь для вычисления характеристик «острова тепла» в поле температуры приземного слоя воздуха необходимо иметь хотя бы две наземные станции (одну в городе, другую в ближайшем пригороде). Однако таких населённых пунктов крайне мало, помимо самых крупных городов. Для решения этой проблемы прибегают, как правило, к двум приемам: к установке сети временных станций с регистрирующими датчиками температуры воздуха или к маршрутным съёмкам. Однако оба этих метода предоставляют лишь эпизодические данные. Здесь на помощь исследователям приходят космические снимки

В рамках данной работы был проведен сравнительный анализ температурных аномалий в населенных пунктах Московской области с различной площадью и численностью населения в поле температуры поверхности. Для этого на территории Московской области и прилежащих к ней регионов было выбрано 10 населенных пунктов с различной численностью населения: 8 городов, включая Москву, и две деревни. Это позволило охватить большой диапазон численности населения (от 10^1 до 10^7 человек) и площади (от 10^{-1} до 10^3 км²). Расположение выбранных населенных пунктов показано на рис. 4.7.

Для каждого из населенных пунктов был получен векторный слой границ города с точностью до ± 20 м. Москва, как и всюду выше, рассматривалась в пределах ее административных границ, действовавших до 2012 года. Векторный слой Рязани составлен без учета отдельного городского анклава – поселка Солотчи, а Москвы – без анклава Зеленоград. Все векторные слои представлены более подробно на рис. 4.8.

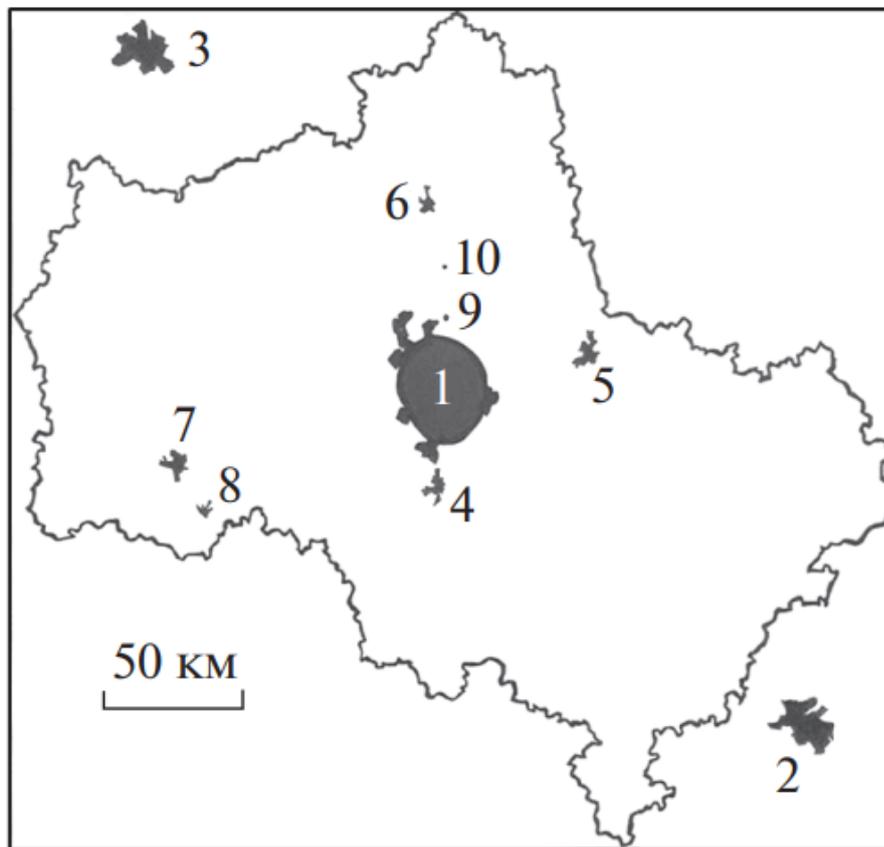


Рис. 4.7 Карта Московского региона с населенными пунктами, выбранными для анализа (цифровые обозначения: 1 – Москва, 2 – Рязань, 3 – Тверь, 4 – Подольск, 5 – Ногинск, 6 – Дмитров, 7 – Можайск, 8 – Верей, 9 – Афанасово, 10 – Бяконтово). Прямоугольник – область сравнения.

Работа с Интернет-ресурсами космических снимков и LULC позволила определить ближайшее окружение населенных пунктов. В анализе поверхностного «острова тепла» важно понимать, какие типы поверхности преобладают на территории населенного пункта и в его ближайшем окружении. Необходимо оценить, как приграничные районы могут повлиять на расчет температуры поверхности в городе из-за влияния краевых эффектов. Так, например, крупный город Тверь практически со всех сторон

окружен лесной растительностью, а Рязань – сельскохозяйственными угодьями. Деревня Афанасово в радиусе примерно 1 км окружена лесом, но находится в непосредственной близости от Москвы и как минимум еще четырех населенных пунктов. То же самое касается и города Подольск. Исходя из вышесказанного нужно понимать, что эти два населенных пункта могут попадать под температурное влияние столицы (полный список городов и их окружений представлен в табл. 4.3).

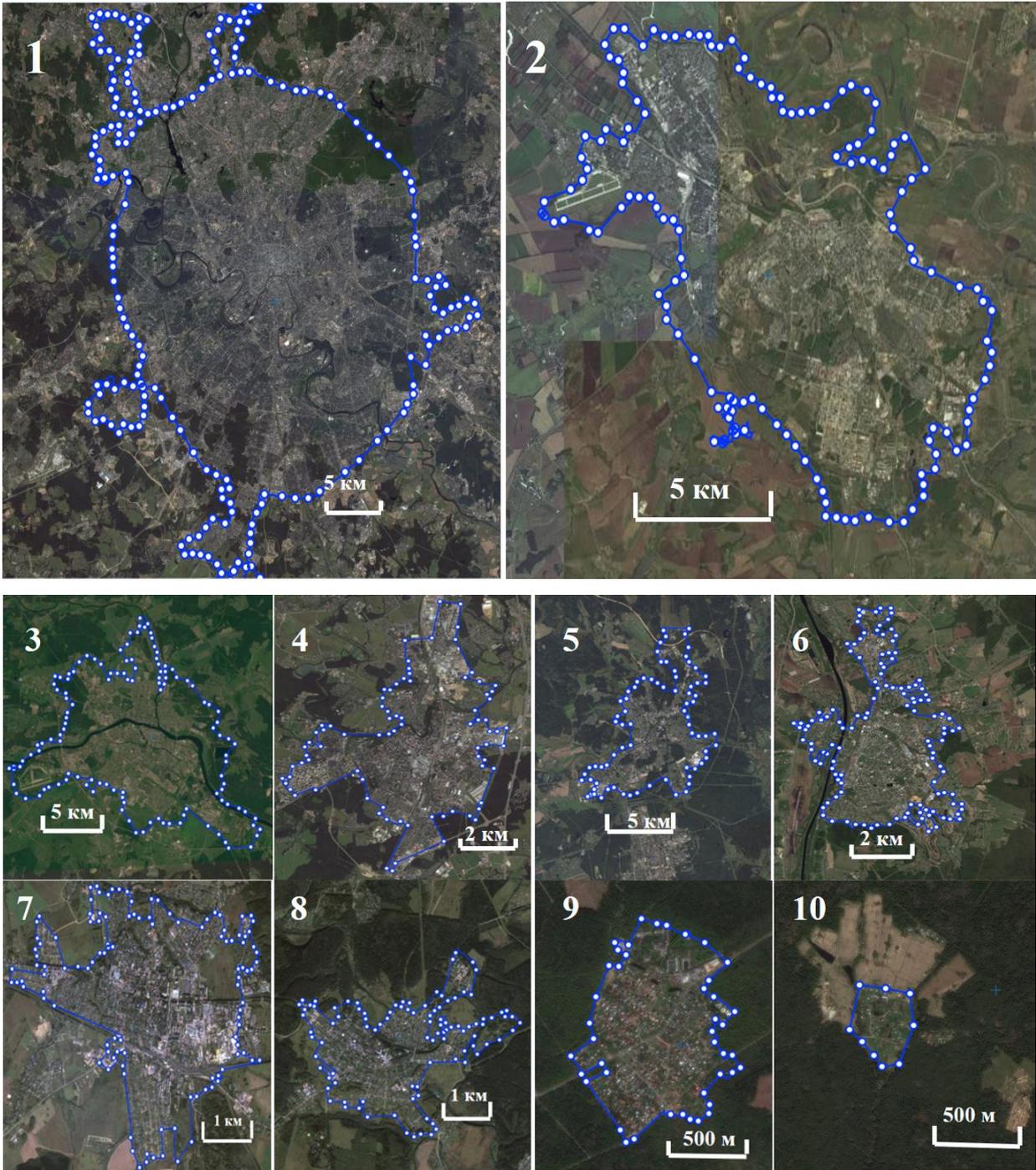


Рис. 4.8 Векторные слои населенных пунктов, используемые в данной работе (нумерация населенных пунктов совпадает с рис.4.1)

Очевидно, что выбранные для анализа населенные пункты должны:

– иметь по возможности цельную и компактную, геометрически простую форму;

- находиться в условиях равнинного рельефа и вдали от обширных водоемов;
 - быть окруженными в основном сельской местностью, т.е. не иметь общих границ с другими сравнимыми или бóльшими по размеру городами;
 - не находиться слишком близко ни к Москве (во избежание влияния теплового следа столичного “острова тепла”), ни к границам области сравнения (во избежание влияния географической зональности).
- Как было описано выше в §4.1, зональность в Московском регионе проявляется в общем росте температуры и поверхности, и воздуха в направлении с северо-запада на юго-восток.

Таблица 4.3 Соотношение типов поверхности внутри населенных пунктов и преобладающее окружение города.

№	Населенный пункт	Площадь города, км ²	Численность населения, тыс. чел	Плотная городская застройка, %	Парки и густые зеленые насаждения, %	Смешанный тип поверхности (остальная часть города), %	Окружающая местность
1	Москва	1081	12678	20	13	67	Пригороды, поля, лес
2	Рязань	224	539	3	4	93	Пригороды, поля
3	Тверь	152	450	4	19	77	Лес, поля, пригороды
4	Подольск	40	291	13	8	79	Москва и другие ее пригороды
5	Ногинск	52	104	7	18	75	В основном - лес
6	Дмитров	26	69	4	8	88	Поля, открытая местность
7	Можайск	18	30	2	10	88	Поля, открытая местность
8	Верея	5	5	0	12	88	Лес
9	Афанасово	1	0,336	0	6	94	Лес, пригороды Москвы
10	Бяконтово	0,14	0,006	0	10	90	Лес

Но населенные пункты, подходящие нам по численности населения, не всегда соответствуют сразу всем предложенным выше критериям.

Как видно из рисунка 4.7, выбранные населенные пункты территориально располагаются в различных частях области сравнения (как и в главе 2, в качестве области сравнения был принят прямоугольник, описанный вокруг реальных границ Московской области). Так, например, города Тверь и Рязань, следующие после Москвы по численности населения, находятся на северо-западном и юго-

восточном краях области сравнения соответственно, что не соответствует последнему из критериев отбора. Такое расположение этих городов приводит к занижению интенсивности поверхностного «острова тепла» в Твери и ее завышению в Рязани, так как в первом случае сравнительно холодный из-за географической зональности город сравнивается в основном с более теплой по сравнению с ним областью сравнения, а во втором - наоборот.

Если рассматривать города по критерию рельефа местности, то Ногинск, Тверь и Рязань находятся несколько ниже относительно других населенных пунктов. Согласно сайту topographic-map.com, высота в основной части Московской области находится примерно в пределах 170-250 метров над уровнем моря, а вот города Ногинск, Тверь и Рязань находятся в локальных понижениях (высота над уровнем моря в Твери составляет примерно 135 метров, Ногинск – 140 метров, а Рязань - 110 метров). Этот факт может в свою очередь повлиять на расчетные значения интенсивности. Однако в целом рельеф в Московском регионе ровный и ни один из выбранных населённых пунктов не находится в условиях замкнутых котловин, так что возможные смещения оценок их «островов тепла» из-за рельефа крайне малы.

В данной части работы использовались лишь снимки за 2018 год. Этот временной промежуток выбран исходя из обеспеченности снимками в различные сезоны года. Это позволяет оценить годовую изменчивость интенсивности поверхностных «островов тепла», а общая обеспеченность снимками достаточна для получения статистически достоверных выводов (табл. 4.4). Однако отдельные города не всегда проявляются на каждом из снимков. По методике, описанной в главе 2 для анализа поверхностного «острова тепла» Москвы, снимки считались пригодными даже тогда, когда облачность в области сравнения достигала 50 %. Это привело к тому, что на имеющихся снимках отдельные города могли быть закрыты облаками.

Табл. 4.4 Количество снимков, пригодных для анализа в 2018 году

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	всего
Количество снимков с обоих спутников за 2018 год	2	13	12	3	25	4	2	18	15	9	13	2	118
Количество дней, обеспеченных снимками	1	8	8	3	13	4	1	12	10	5	8	2	75

В таблице 4.5 можно увидеть количество снимков, на которых тот или иной город проявился при допустимых условиях облачности и пространственном разрешении 1 км. Естественно, наибольший размер выборки значений в отдельные дни (75) присущ самому большому по площади объекту – Москве, так как все снимки изначально отбирались для анализа поверхностного «острова тепла» именно в этом

городе. Самый маленький из рассмотренных населенных пунктов – деревня Бяконтово – крайне редко выявлялась автоматической программой распознавания. Это происходит из-за малой его площади (всего 0,14 км²). Лишь на 12 снимках, когда часть ближайшей ячейки была закрыта облаками, площадь этой деревни ненамного превысила половину ее оставшейся открытой поверхности.

Табл. 4.5 Обеспеченность снимками для отдельных городов Московской области, используемых в анализе поверхностных «островов тепла»

	Москва	Рязань	Тверь	Подольск	Ногинск	Дмитров	Можайск	Верея	Афанасово	Бяконтово
Количество снимков с обоих спутников за 2018 год	118	110	102	115	113	114	105	103	94	12
Количество дней, обеспеченных снимками	75	71	68	74	74	73	71	70	66	12

Интенсивность поверхностного «острова тепла» для каждого отдельного города рассчитывалась по тому же принципу, что и в главе 2 для г. Москва, то есть как разность между средней температурой поверхности внутри населенного пункта и за его пределами в области сравнения (без учета территории самих городов). Среднегодовые значения нормированы на годовой ход. Результаты расчетов представлены в таблице 4.6. Как можно увидеть, максимальная интенсивность поверхностного «острова тепла» в среднем за 2018 год присуща самому крупному городу Москве (2,6 °С).

На втором месте оказался город Подольск с интенсивностью 2,2 °С, который по площади занимает лишь 5-е место, а по численности населения – 4-е. В среднем холоднее области сравнения оказались лишь две исследуемые в данной работе деревни.

В таблице 4.6 представлены также данные о максимальных и минимальных значениях интенсивности поверхностного «острова тепла» в исследуемых населенных пунктах. Можно заметить, что эти значения имеют очень большой разброс. При подробном рассмотрении оказалось, что даже время, когда были достигнуты экстремумы в отдельных городах, не совпадает. Скорее всего, каждый отдельный экстремум связан с определенными погодными условиями. Так как города находятся на значительном удалении друг от друга, на температуру поверхности может оказывать влияние как географическая зональность, так и особенности атмосферной циркуляции в тот или иной день, включая прохождение атмосферных фронтов.

Еще один показатель – это доля случаев с отрицательным значением интенсивности поверхностного «острова тепла» в общей выборке случаев. Оказалось, что этот параметр отлично описывает особенности формируемых городом «островов тепла». Наблюдается статистически значимая экспоненциальная зависимость доли случаев с отрицательным значением I от площади города с

коэффициентом корреляции 0,9 (рис. 4.9). Как можно увидеть, все города лежат очень близко к экспоненциальной кривой, однако два города (Подольск и Тверь) выбиваются из общей картины.

Табл. 4.6 Значения интенсивности поверхностных «островов тепла» в населенных пунктах Московской области и прилегающих регионов

	Москва	Рязань	Тверь	Подольск	Ногинск	Дмитров	Можайск	Верея	Афанасово	Бяконтово
Интенсивность поверхностного "острова тепла", °С	2,6	2,0	0,3	2,2	0,7	1,2	0,8	0,0	-0,1	-0,4
Стандартное отклонение, °С	1,4	2,3	2,8	1,6	1,4	2,0	2,3	1,5	1,3	1,0
Максимальное значение интенсивности, °С	5,4	6,7	5,0	6,1	3,7	5,3	5,7	2,7	2,9	1,3
Минимальное значение интенсивности, °С	-1,3	-7,8	-11,3	-1,7	-6,5	-8,3	-7,5	-6,2	-4,2	-2,2
Доля случаев с отрицательной интенсивностью, %	2,5	19,1	32,4	7,0	24,8	24,6	27,6	40,8	55,3	66,7

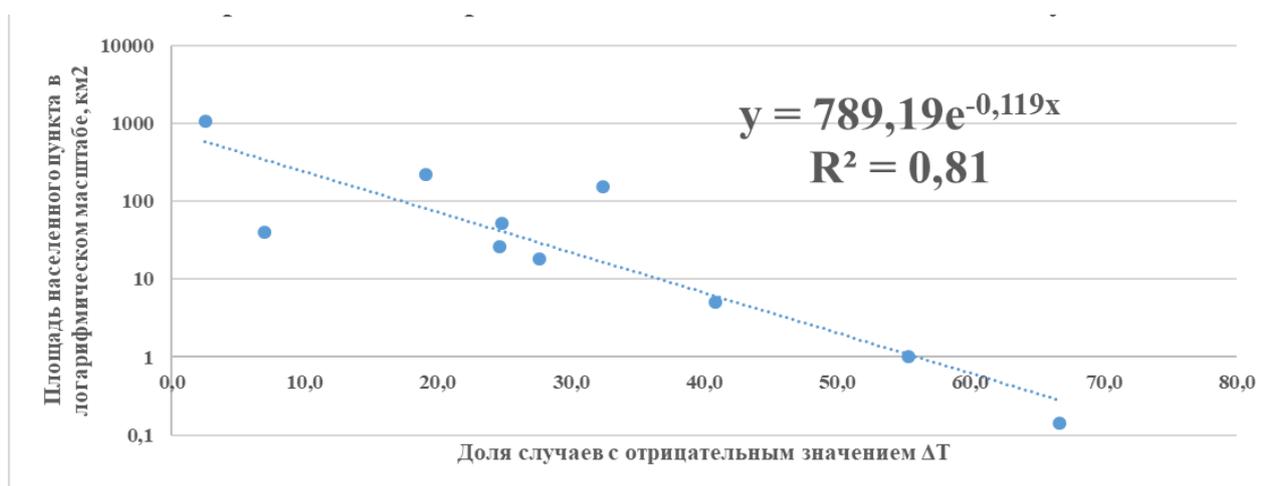


Рис. 4.9 Зависимость доли снимков с отрицательным значением интенсивности поверхностного «острова тепла» в общей их выборке от площади города (шкала площади представлена в логарифмическом масштабе)

Город Тверь оказался холоднее области сравнения в 32,4% случаев. Это объясняется его географическим положением на северо-западном краю области, то есть в самой холодной зоне региона. Подольск, наоборот, крайне редко холоднее области сравнения (всего в 7% случаев), что еще раз

подтверждает формирование в нем более сильного «острова тепла», чем в других рассмотренных населенных пунктах.

Статистически значимые зависимости наблюдаются и непосредственно между интенсивностью поверхностного «острова тепла» и площадью города, а также его населением (рис. 4.10). Как видим, корреляционное отношение (или коэффициент корреляции в полулогарифмических координатах) R равно 0,82 и 0,80 соответственно для численности населения и площади. Обе зависимости существенно нелинейны: при их аппроксимации линейными трендами коэффициенты корреляции меньше: лишь 0,60 и 0,65 соответственно. Разумеется, полученные зависимости можно аппроксимировать и степенными функциями разного порядка с гораздо более высокими значениями R : вплоть до 0,99–1,00 для полиномов 5-й и 6-й степени. Однако эти функции немонотонные; описание же обеих зависимостей экспонентами отражает общую тенденцию усиления «островов тепла» с ростом площади и населения городов. Заметим, что подобные функции ранее были описаны в ряде работ – например, в известной монографии Т.Ока отдельно для европейских и американских городов [82]. Применительно к спутниковым данным о температуре поверхности, сходная экспоненциальная зависимость интенсивности «островов тепла» 28 городов Северо-Западной Сибири от их населения получена в работах И.Есау и В.Майлс [63]. Однако нами зависимости интенсивности «островов тепла» от площади города и от его населения впервые получены для столь широких диапазонов, составляющих семь порядков по численности населения (от 10^1 до 10^7 человек) и пять порядков по площади (от 10^{-1} до 10^3 км²).

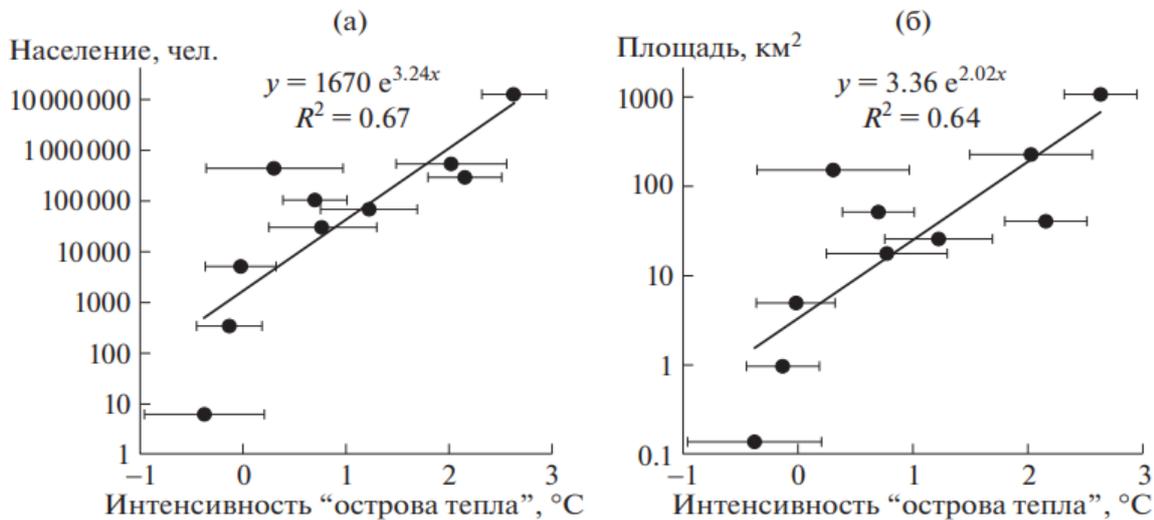


Рис. 4.10. Связи интенсивности поверхностных «островов тепла» городов и деревень Московского региона с их населением и площадью по данным спутников Terra и Aqua 2018 г. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5% по выборке всех дней со снимками.

Для объяснения различий, формируемых «островами тепла» в городах, близких друг другу по численности населения и площади, вернемся к таблице 4.3. В ней представлены результаты расчета доли плотной городской застройки, парков и остальной части города в общей его площади. Расчет площадей производился после проведения бинарной автоматической классификации в программе Scanex Image

Processor для территории каждого города отдельно по набору общих эталонных участков (для городской застройки и парков было создано по 5 эталонных участков). Доля остальной части города рассчитывалась как простая разность. Так как эталонные участки для плотной городской застройки и параметры классификации были для всех городов одинаковы, то мы имеем полное право сравнивать результаты между собой. На территории трех самых маленьких населенных пунктов – Вереи, Афанасова и Бяконтова – плотная городская застройка отсутствует, а в Москве и Подольске ее доля составляет 20% и 13% соответственно. На территории Твери и Ногинска высока доля парков и лесов от общей площади города.

Если рассмотреть еще раз более подробно город Тверь, то можно увидеть, что доля зеленых насаждений в этом городе самая высокая и составляет примерно 19% от общей площади города. Так как зеленые зоны являются поверхностными «островами холода», то их охлаждающее действие наряду с географическим положением приводит к уменьшению интенсивности поверхностного «острова тепла» для этого города.

Очень теплая поверхность Подольска, видимо, объясняется двумя факторами. Во-первых, доля плотной застройки в этом городе очень велика и составляет 13%. Стоит отметить, что этот показатель самый высокий среди рассмотренных малых городов (выше только в самой столице). Помимо этого, во-вторых, сказывается тепловой след соседней Москвы. Взаимосвязь значений интенсивности поверхностных «островов тепла» в Москве и Подольске также подтверждается коэффициентом корреляции, рассчитанным по всем значениям интенсивности в обоих городах ($R = 0,73$). В среднем интенсивность поверхностного «острова тепла» в Подольске ниже, чем в Москве, всего на $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим два других близких друг другу города – Дмитров и Можайск. Средняя температура воздуха по данным метеорологических станций в этих городах в 2018 году оказалась одинаковой и составила $5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако интенсивность поверхностного «острова тепла» в Дмитрове оказалась выше, чем в Можайске. Данный результат объясняется большей (примерно в два раза) долей городской застройки в Дмитрове, чем в Можайске.

Примечательно, что самый маленький город Подмосковья Верея показал почти нулевое значение интенсивности поверхностного «острова тепла», а обе деревни Мытищинского района – даже слабо отрицательные. С учетом их малой площади очевидно, что расчетные ячейки, распознанные программой по векторным слоям как Афанасово и Бяконтово, включают в себя окружающий обе деревни лес. Таким образом, если границу Бяконтово считать проходящей не по кромке леса, а на расстоянии ~ 300 м в его глубине, то эта деревня вместе с лесной опушкой является слабовыраженным «островом холода» в поле температуры поверхности. Впрочем, с учетом величин σ в табл. 4.6 и доверительных интервалов на рис. 4.10, отрицательный знак интенсивности поверхностного «острова тепла» обеих деревень не является статистически достоверным с доверительной вероятностью 0,95. Для получения более точных оценок интенсивности «островов тепла» столь малых населенных пунктов требуются данные спутников с более высоким пространственным разрешением.

Для проведения такого более подробного анализа «островов тепла» малых населенных пунктов, таких как Афанасово и Бяконтово, был выбран снимок спутника Landsat8 в безоблачных условиях 28 мая 2018 году в 08:23. В этот же день, но чуть позднее над регионом пролетал спутник Terra, данные которого использовались для сравнения результатов. Однако в вычислении и сравнении температуры поверхности существует значительная сложность. Если для спутников серии MODIS разработчики предоставляют готовый продукт с расчетами температуры поверхности в каждом отдельном пикселе снимка, то для спутников Landsat необходимо самостоятельно производить пересчет значений спектральной яркости в инфракрасном канале съемки в необходимую нам температуру поверхности. Для этого пересчета существует большое количество методик и способов интерпретации с различной сложностью расчетов. В данной работе мы остановились на упрощенной методике пересчета, представленной на геоинформационном портале GIS-lab [104]. Рассмотрим данную методику.

Исходными данными для определения температуры поверхности служат значения излучения в инфракрасном тепловом диапазоне (в нашем случае 10-й тепловой канал спутника Landsat8), пришедшие на фиксирующий сенсор спутника - R, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$R = M_R * Q + A_R, \quad \text{где (16)}$$

Q - дискретное калиброванное значение пикселя, получаемое из файла снимка для каждого отдельного пикселя, измеряется в условных относительных единицах DN (Digital Numbers). M_R и A_R - калибровочные коэффициенты, приведенные в файле метаданных снимка.

Перевод интенсивности излучения R в температуру поверхности T производится по следующей формуле:

$$T = (K_2 / \ln(K_1/R + 1) - 273,15 \text{ (}^\circ\text{C)}), \quad (17),$$

где K_1 и K_2 – калибровочные константы, представленные в файле метаданных для каждого теплового канала.

Таким образом, мы получили температуру поверхности в каждом отдельном из рассматриваемых городов и в области сравнения. Область сравнения для расчетов интенсивности поверхностного «острова тепла» на снимках Landsat8 и Terra ограничена шириной полосы съемки спутником Landsat 185 км – поэтому в нее не попали ни Тверь, ни Рязань. Оказалось, что утром в этот день значение интенсивности составило по данным Landsat 4,8 °C и для Москвы, и для Дмитрова; 5,5 °C для Можайска; 3,5 °C для Вереи; 3,4 °C для Афанасова и 1,4 °C для Бяконтова. По данным же спутника Terra, значения распределились следующим образом: 4,7; 2,4; 5,8; 2,8 и –0,8 °C соответственно для Москвы, Дмитрова, Можайска, Вереи и Афанасова (оценить интенсивность «острова тепла» Бяконтова на втором снимке не удалось – видимо, из-за внутримассового облака Su над этой деревней при пролёте Terra). Как видим, в этот день в силу погодных условий все «поверхностные острова тепла» проявились сильнее обычного (применительно к Москве это значение оказалась почти вдвое больше, чем в среднем за год). Оценки интенсивности обоими спутниками почти совпали для Москвы и близки для Можайска, однако для

Дмитрова сильно разошлись. Для малых населенных пунктов получены положительные значения интенсивности поверхностных «островов тепла» по данным Landsat, но гораздо меньшие (для Вереи) и даже отрицательные (для Афанасова) по данным Terra. Очевидно, оценки Landsat точнее вследствие близости расчетной области на мелкой сетке этого спутника к реальным границам населенных пунктов. Таким образом, занижение интенсивности «островов тепла» малых городов и деревень по спутниковым данным со средним разрешением из-за включения в расчеты на краях ячеек окружающего эти пункты леса подтверждается данным примером.

В дополнение была рассмотрена годовая изменчивость интенсивности поверхностных «островов тепла» в малых населенных пунктах Московского региона. Годовой ход, представленный на рис. 4.11, из-за недостаточности снимков в отдельные месяцы года был построен с осреднением по двум месяцам. Как было описано в главе 2, для Москвы максимум интенсивности отмечается в июне, когда растительность в области сравнения достигает максимума своего развития. Это же подтверждают данные отдельно за 2018 год. Как можно увидеть, для всех достаточно крупных городов (Подольск, Дмитров и Ногинск) годовой ход интенсивности поверхностного «острова тепла» качественно сходен с постепенным увеличением от весны к лету и последующим понижением к осени. Следует отметить еще одну закономерность: с учетом доверительных интервалов, во все сезоны года различия в «острове тепла» Москвы и других малых городов статистически значимы, за исключением Подольска, который снова оказался наиболее близким к столице по своему температурному влиянию.

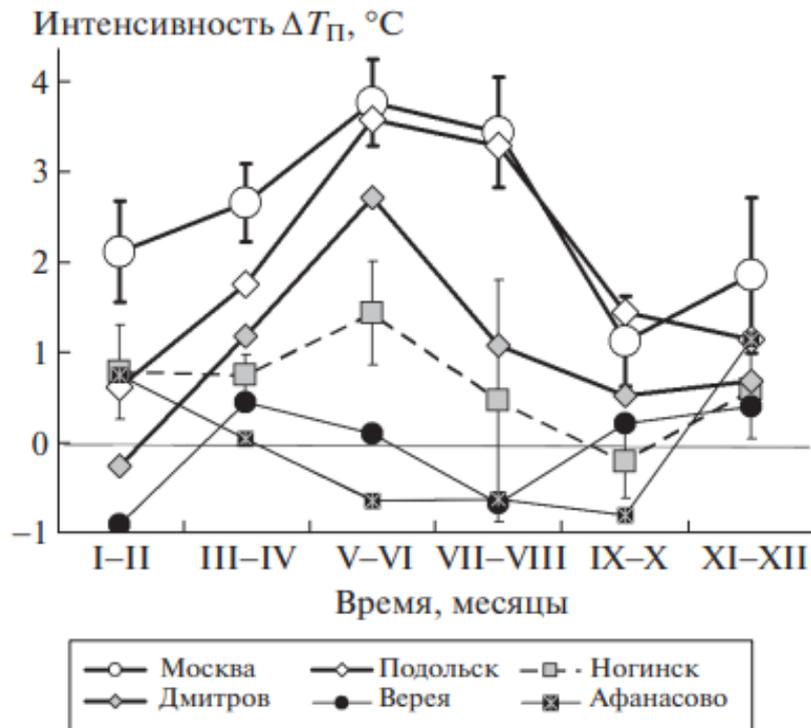


Рис. 4.11 Годовой ход интенсивности поверхностных «островов тепла» разных населенных пунктов Московского региона по данным спутников Terra и Aqua за 2018 год. Доверительные интервалы рассчитаны с уровнем значимости 5%.

Однако для малых населенных пунктов однозначных закономерностей годового хода поверхностного «острова тепла» не выявлено.

Выводы к главе.

1. Как показывают карты распределения температуры поверхности в Московском регионе, ее увеличение происходит постепенно с северо-запада на юго-восток.
2. На картах температуры поверхности Московского региона наша столица проявляется как температурная аномалия, ограниченная двумя замкнутыми и одной полузамкнутой изотермами с шагом 1 °С.
3. Температура поверхности в районах и городских округах Московской области имеет значимые связи с состоянием растительного покрова (NDVI), географическим положением, лесистостью, типом почвы и плотностью населения.
4. За период с 2000 по 2021 гг. не выявлено статистически значимых изменений средней температуры поверхности в Московском регионе.
5. Любые города, включая малые, создают в средних широтах поверхностные «острова тепла» в виде устойчивой тепловой аномалии в поле температуры поверхности. Величина этой аномалии составляет в среднем за год вплоть до 2,0–2,6 °С для крупных городов.
6. Острова тепла самых малых населенных пунктов слабые, интенсивность их составляет порядка 1 °С; с учетом окружающей деревню лесной опушки она близка к нулю или является слабоотрицательной.
7. Связи интенсивности «поверхностных островов тепла» с численностью населения и площадью населенных пунктов с высокой достоверностью можно описать экспоненциальными функциями.
8. Годовой ход интенсивности «поверхностных островов тепла» большинства городов отмечен наибольшими значениями летом и наименьшими – осенью или зимой.
9. На интенсивность поверхностного «острова тепла» в малых городах Московского региона влияет как их непосредственное окружение (лес или пригороды), так и внутренне устройство территории. Например, высокая доля озеленения территории города приводит к ослаблению «острова тепла», а высокая доля плотной городской застройки – наоборот, к его усилению.

Глава 5. Поверхностный «остров тепла» в условиях тропиков.

Основной задачей данной работы явился анализ явления поверхностного «острова тепла» Москвы и малых населенных пунктов Московского региона. Однако, как показано в первой главе, это явление характерно для большинства городов в разных географических регионах и климатических зонах. Интересно сопоставить полученные результаты с поверхностными «островами тепла» в других климатических условиях – например, в тропиках. Для решения этой задачи было рассмотрено поле температуры поверхности в двух крупных городах Индии: Дели и Бангалор.

Данная часть работы осуществлена автором в рамках проекта РФФИ № 18-55-45012_Инд. Анализ производился по методике, описанной выше в главе 2. На территории Индии существует четыре крупнейших мегаполиса: Мумбаи (Бомбей), Дели, Бангалор и Калькутта (рис. 5.1). Крупнейший город Индии – Мумбаи, а также город Калькутта были исключены из анализа из-за особенностей своего географического положения: Мумбаи находится непосредственно на побережье Аравийского моря, а Калькутта – всего в 50-100 км от берега Бенгальского залива. Очевидно, что область сравнения с любым городом должна быть не слишком маленькой и охватывать окрестности значительного радиуса (не менее 100 км) во всех направлениях. Таким образом, области сравнения для Мумбаи и Калькутты будут неизбежно включать в себя морскую поверхность. Это создаёт их резко выраженную термическую неоднородность, требующую отдельного учёта.

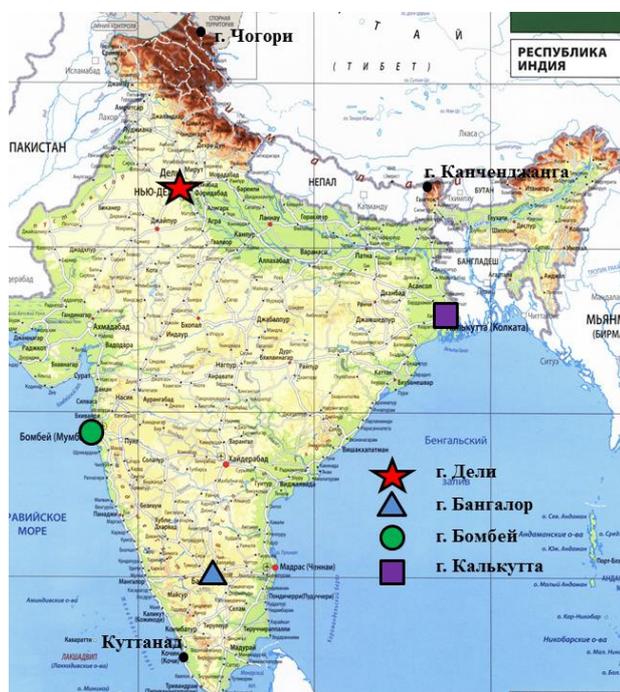


Рис. 5.1. Карта Индии. Значками изображены крупнейшие города, а также самая высокая и самая низкая точки Индии.

Города Дели и Бангалор, напротив, находятся на значительном удалении от береговой линии внутри континента, что позволяет рассмотреть для них области сравнения, характеризующиеся термической однородностью.

5.1. Изучаемая территория.

Территория Индии имеет очень разнообразные условия: от прибрежных равнин до горных хребтов и высокогорий. Эта страна, расположившаяся на полуострове Индостан и растянувшаяся на 3000 км с севера на юг и на 2000 км с запада на восток. Общая площадь территории государства равна 3 287 тыс. км² [101].

Индия расположена в пределах трех крупных орографических областей: Гималайских гор, Индо-Гангской равнины и плоскогорья Декан. Наивысшие точки Индии – это гора Канченджанга высотой 8586 м на границе Индии и Непала, а также гора Чогори высотой 8614 м на севере государства на границе с Китаем (правда, склоны этой вершины со стороны Индии ныне контролируются Пакистаном). Самая низшая точка страны Куттанад находится на юго-западе страны в штате Керала. Высоты окружающей территории близки к уровню моря, а сам Куттанад имеет высоту около -2 м, т.е. расположен чуть ниже [99].

Рассмотрим окрестности города Бангалор. Они находятся на локальном плато (возвышенной части плоскогорья Декан), высота которого меняется в пределах от 500 до 1500 метров над уровнем моря. Сам же город, согласно справочным источникам, имеет среднюю высоту 920 м. Заметим, что более возвышенное положение города по сравнению с его окрестностями может влиять на значение интенсивности городского «острова тепла» в сторону ее уменьшения, поскольку с высотой обычно уменьшается температура и воздуха, и поверхности. При этом важным условием является не общая высота над уровнем моря всего региона в целом, а разность высот самого города и окружающих его районов.

Был проведен расчёт средней высоты в черте г. Бангалор и в окружающей области сравнения. Расчёты были проведены путем построения горизонтальных профилей высот по сетке с шагом 0,03° как широты, так и долготы в общедоступной программе Google Earth. Оказалось, что сам город Бангалор расположен на высотах от 756 до 949 м, причем математическое ожидание составило 891 м при среднеквадратическом отклонении $\sigma = 53$ м по выборке из 12 построенных профилей. Заметим, что полученное значение немного ниже справочных данных о высоте Бангалора (920 м по данным Википедии) – возможно, неточных. Средняя же высота над уровнем моря в области сравнения вокруг города составила по данным 42 построенных профилей 841 м при значении $\sigma = 161$ м. Участок с наименьшими высотами располагается на юго-востоке области сравнения, а максимальные высоты наблюдаются в её северной части в районе невысокого горного хребта. Как видим, действительно, высота собственно Бангалора выше окружающей его сельской местности на 50 м, однако эта разность статистически незначима с учётом разброса значений.

Что касается города Дели, то сам город имеет высоту около 200 м, а область сравнения находится на высотах от 200 до 500 метров [61]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что температура внутри

обоих этих городов и в областях сравнения с ними (в их окрестностях) может сильно различаться уже в силу орографических особенностей, т.е. разных высот над уровнем моря.

Рассмотрим климатические особенности Индии. Эта страна располагается на юге континента Евразия. В силу определенных географических и орографических особенностей данная территория в зимнее время находится в области повышенного давления, образующейся как следствие усиления континентальности климата и более низких зимних температур над тропическими широтами континента. Летом же данная территория оказывается в зоне сильнейшего летнего муссона, то есть летний муссон представляет собой главную климатическую особенность Индии [10].

Среднегодовое количество осадков на территории Индии изменяется в широких пределах. Так, например, в устье реки Ганг, где проходит граница распространения экваториального муссона, находятся самые засушливые территории страны со среднегодовым количеством осадков менее 200 мм. С другой стороны, на западном побережье на обращенных к муссону склонах Западных Гат местами количество осадков достигает 5000-6000 мм в год. Основная же часть Индии характеризуется умеренным количеством осадков, изменяющимся от 1000 до 1500 мм в год [11].

Стоит обратить внимание на то, что в силу особенностей циркуляции атмосферы в районе полуострова Индостан внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) и, как следствие, зона субэкваториального пояса распространяется далеко на север. Это единственное место в мире, где субэкваториальный тип климата, минуя тропический, граничит напрямую с субтропическим поясом, а пояс тропического климата здесь разорван. Еще одна особенность индийского климата – это наличие на севере высокогорной системы Гималаев, которая препятствует проникновению континентальных умеренных воздушных масс [11].

Муссоны – это ветры, меняющие свое направление два раза в год. Различают зимний (дующий с суши на океан) и летний (дующий с океана на сушу) муссоны. Основная причина появления муссонов – это различия в температуре воздуха над сушей и океанами в разные сезоны. Направление же экваториальных муссонов определяется в основном наличием летних областей низкого давления на континенте в летние месяцы.

В период летнего муссона (с конца мая до начала октября, причем продолжительность муссона в Индии уменьшается с удалением к северу от южного побережья) в зону муссонного климата происходит вхождение экваториальных воздушных масс, которое сопровождается резким увеличением влажности, облачности и количества выпадающих осадков, имеющих характер конвективных ливней. Вместе с тем, при достаточном удалении от экватора, возможно развитие циклонической деятельности, фронтальной облачности и осадков. На равнинах, при удалении от экватора и по мере приближения к засушливым тропическим широтам, происходит уменьшение количества выпадающих осадков вплоть до 300–400 мм в северных районах Индии. С приходом летнего муссона на территории Индии наблюдается резкая смена

погоды, а вот его отступление происходит постепенно. Это, пожалуй, единственное место в мире, где происходит столь резкая смена засушливого сезона на дождливый [10].

В период зимнего муссона, с ноября по март, наблюдается обратная ситуация. Вторжение континентальных тропических воздушных масс приводит к тому, что постепенно устанавливается ясная и сухая погода. В это время господствуют северо-восточные ветры, являющиеся по своей сути пассатными течениями. Однако устойчивость их гораздо слабее, нежели у летнего экваториального муссона, а повторяемость ветров данного направления не превышает в среднем 50 %. Зарождение данных пассатов происходит над южными склонами Гималаев, что приводит к формированию более высоких зимних температур, чем в районах средней Азии. Поэтому температура в зимние месяцы держится достаточно высокая и меняется с севера на юг от 10-15 до 20-25 °С [11].

В годовом ходе температуры наблюдаются два максимума и два минимума, один из которых основной, а другой вторичный. Главный минимум температуры отмечается в зимние месяцы и связан, как уже сказано выше, с вторжением прохладного континентального тропического воздуха из глубины континента. Второй же минимум формируется в летний период с приходом более прохладных, по сравнению с тропическими, экваториальных воздушных масс. Максимумы T же формируются непосредственно перед вторжением муссона и после его отступления [10]. В таблице 5.1 приведены данные о температуре воздуха в двух городах Индии. Данные для города Бангалор приведены по станции, находящейся в центре города за 2002 год в среднем за 5 сроков измерений. Данные по городу Нагпур были приведены как показательные в работе Алисова [11]. Из таблицы видно, что для каждого из городов характерно наличие упомянутых выше максимумов и минимумов. Летний и зимний минимумы в обоих городах совпадают по времени (отмечаются в августе и в декабре), а вот основной весенний максимум смещен в Нагпуре на один месяц вперед. Это является следствием более раннего прихода муссона на территорию города Бангалор, находящегося южнее. Амплитуда годового хода температуры воздуха в городе Нагпур (15,2 °С) также больше, чем в Бангалоре (7,0 °С), что свойственно континентальным городам, удаленным от экваториальной зоны; кроме того, сравнительно малая амплитуда в Бангалоре связана также с его возвышенным положением на плато. Заметим, что при сравнении самих значений T в Таблице 5.1 в обоих местах следует учитывать глобальное потепление климата в продолжение последних десятилетий.

По классификации климатов, составленной Б.П. Алисовым на основании закономерностей общей циркуляции атмосферы, почти вся территория Индии относится к субэкваториальному типу климата (климату экваториальных муссонов), отмеченному коричневым цветом (рис.5.2А).

Табл. 5.1 Среднемесячные температуры воздуха в городах Индии. Красным цветом отмечены максимумы температуры в годовом ходе, а синим – минимумы.

	Бангалор, 2002 год	Нагпур, по данным Б.П.Алисова, 1950 [5].
Январь	21,2	20,4
Февраль	22,5	23,5
Март	26,0	28,0
Апрель	27,6	32,6
Май	26,3	34,7
Июнь	24,1	30,3
Июль	23,5	26,9
Август	23,1	26,3
Сентябрь	24,0	26,9
Октябрь	23,3	25,8
Ноябрь	21,8	22,3
Декабрь	20,6	19,5

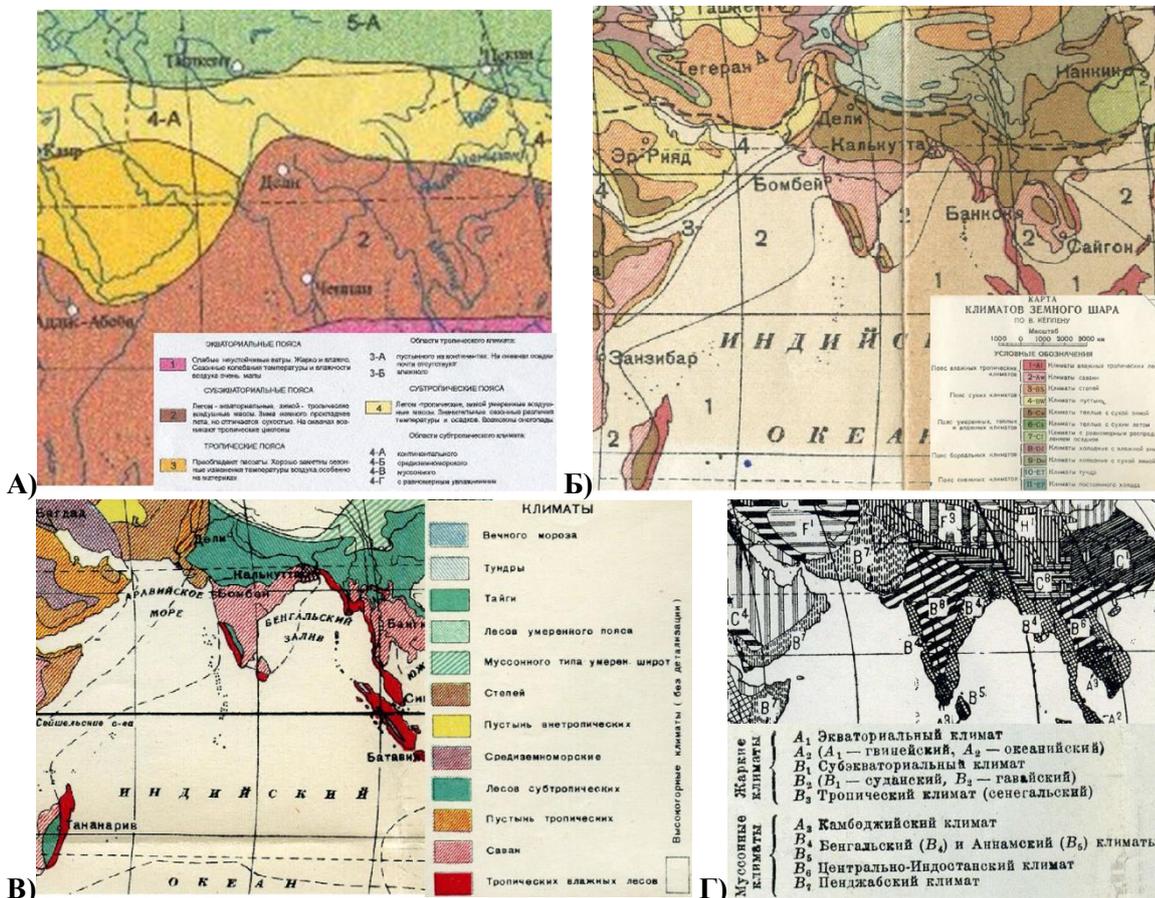


Рис. 5.2. Район Индии в различных классификациях климата: А) Б.П. Алисова. Б) В.П.Кёппена В) Л.С. Берга Г) Э. Де Мартона

Данный тип климата формируется в тех же радиационных условиях, что и экваториальный, но в силу муссонной активности проявляются сезонные изменения в приходе прямой радиации и радиационном балансе в целом. Максимальные суммы прямой солнечной радиации обычно приходится на весенние месяцы. Для муссонного типа климата характерно два четко выраженных сезона – это

влажное и прохладное лето и сухая тёплая зима. Эти два сезона проявляются особенно ярко в межсезонном контрасте увлажнения [10]. Выделяется также третий сезон (с марта по май) – весна или, иначе говоря, предмуссонный период. Это время является наиболее жарким и засушливым. Температура в данный период может превышать $+35\dots+40$ °С. В данный период солнце находится в зените над северным тропиком. Радиационный баланс в это время достигает максимума [10].

По классификации В.П.Кёппена, основанной на нескольких основных признаках: количестве тепла, агрегатном состоянии воды в атмосфере и на поверхности, а также на типах растительных сообществ как следствии из двух предыдущих факторов [26], территория Индии лежит в двух основных типах климата (рис. 5.2 Б): климат саванн (зона влажных тропических климатов) и теплого климата с сухой зимой (зона умеренных теплых и влажных климатов).

Согласно В.П. Кёппену, территория Индии с севера на юг сильно отличается по условиям увлажнения и среднемесячным температурам самого холодного и самого теплого месяцев. Влажность и облачность меняются на территории Индии вслед за сменой основных сезонов. В то время как зимой относительная влажность минимальна и редко превышает 20%, летом в период муссона она может достигать 90-100%, что сравнимо с зоной влажных экваториальных лесов. Отличительной чертой климата полуострова Индостан является большое количество гроз, особенно в период наступления летнего муссона. Город Бангалор, видимо, отмечен климатом саванн, относящимся к климатам группы А, то есть к поясу влажных тропических климатов. Общая характеристика этой группы – это непрерывное тепло. Заметим, однако, что в классической версии классификации Кёппена [26] положение Бангалора – пограничное вблизи сразу четырех типов климата, относящихся к трем поясам: влажных тропических климатов (2-Аw – климат саванн), сухих климатов (3-Вs – климат степей), умеренных, теплых и влажных климатов (5-Сц – теплый климат с сухой зимой и 7-Сf – климат с равномерным распределением осадков). Столь сильное многообразие климатических условий, видимо, связано с действием локальных факторов – в частности, с возвышенным положением Бангалора на плато, а также преобладанием в центральной части Индии различных растительных сообществ.

Город Дели относится к типу умеренных теплых климатов подтипу теплого климата с сухой зимой (Сw). Данный тип климата характеризуется наличием прохладного периода с температурой самого холодного месяца от -3 до $+18$ °С и температурой самого теплого месяца $> +10$ °С. Главная особенность этого подтипа – превышение количества осадков в самом влажном месяце по меньшей мере в 10 раз по сравнению с самым сухим. По своему общему виду и течению сезонов подтип теплого климата с сухой зимой близок к климату саванн с единственным отличием – это уменьшение количества осадков и увеличением амплитуды температур.

Классификация Л. С. Берга (рис 5.2 В) составлена на основе соединения климатических характеристик и природных зон, но скорее похожа на почвенную, так как границы многих зон совпадают

именно с границами распространения того или иного типа почв. Согласно ей, территория Индии относится к климату саванн и субтропических лесов.

Город Дели находится в зоне субтропических лесов. Данный тип климата характеризуется сравнительно теплой засушливой зимой, лето при этом жаркое с большим количеством осадков. Растительность представлена древесными широколиственными породами. Местами данная природная зона характеризуется развитием муссонных процессов, но при движении на север их роль угасает.

Город Бангалор находится в зоне климата саванн или тропического лесостепья. Описывается преобладанием тропического климата. Характерная черта данного типа климата – чередование сухого и влажного сезонов, сопровождающееся изменениями в растительном покрове. Максимальное количество осадков не должно превышать 2000-2500 мм. В сухое время года здесь в среднем выпадает 12% осадков от годового их количества, в то время как во время наступления летнего муссона оставшиеся - 88%. Это зона возделывания большинства тропических культур: хлопок, рис, сахарный тростник, кофе и т. д. [17].

Существует еще одна, менее известная в России классификация климатов Э. Де Мартона (рис. 5.2 Г). В ее основе лежат различия в двух показателях – среднегодовой амплитуде температур и среднегодовой амплитуде количества осадков, но учитывается и циркуляция атмосферы. По данной классификации оба рассматриваемых города относятся к группе муссонных климатов Центрально-Индостанского типа.

Данный тип характеризуется, помимо всего прочего, высокой амплитудой значений атмосферного давления, связанной с движением воздушных масс (смена экваториальной массы с низким давлением на тропическую континентальную с высоким давлением).

Подводя итоги, можно сказать, что природа и климатические условия территории Индии достаточно разнообразны. Два рассматриваемых города (Бангалор и Дели) сильно отличаются друг от друга по климатическим и орографическим условиям, но в пределах окружающих их территорий условия в целом однородны, что позволяет нам провести достоверный анализ температурных условий поверхности этих городов.

5.2 Методические аспекты анализа данных в условиях тропиков.

Анализ явления поверхностного «острова тепла» для городов Дели и Бангалор производился, как и применительно к Московскому региону, по данным радиометра MODIS, установленного на двух американских спутниках Terra и Aqua. Также, как и над Москвой, эти спутники пролетают над территорией Индии поздним утром – правда, с большим промежутком времени между ними. Terra осуществляет свой пролет над территорией страны приблизительно между 10:00 и 11:35 по местному времени, в то время как Aqua – чуть позднее: с 12:50 до 14:25. В отдельных случаях оба города могут оказаться как в одной снимке пролёта, так и в соседних, то есть разница в съёмке температуры поверхности может составлять либо пять, либо десять минут.

Феномен поверхностного «острова тепла» крупных городов Индии исследовался нами по данным двух лет (2017-2018). Как и для территории Московского региона, в анализе использовались снимки при не слишком большом покрытии города облаками, но отличие состоит в том, что предельное значение допустимого балла облаков не было определено в ходе эксперимента, а взято условно в виде 55%. Это значит, что к анализу принимались снимки, в которых число безоблачных ячеек внутри границ города составляло не менее 45% от их общего числа для каждого снимка в отдельности. В результате выборка снимков обоих спутников, пригодных для анализа, за период с 01.01.2017 по 31.12.2018 для города Бангалор составила 176, а для Дели 279. Внутригодовое распределение данных в этих городах отличается. Так, например, город Бангалор в зимние месяцы находится в безоблачных условиях чаще, чем Дели. Большая обеспеченность данными городской территории Дели объясняется также более поздним приходом летнего муссона на данную территорию и более ранним его отступанием.

Расчет интенсивности поверхностного «острова тепла» (I) производился по уже опробованной на Московском регионе методике. Для обоих городов были составлены векторные слои городской территории. Для города Бангалор ее площадь составила 420 км², а контуры проводились по двум кольцевым дорогам. Одна из них охватывает весь город по кругу (Outer Ring Road), а другая находится в процессе строительства. Это дорога называется NICE Peripheral Ring Road и охватывает большую часть застройки на востоке города. Что касается Дели, то границы самого города были проведены в рамках Outer Ring Road, переходящей в Ring Road Delhi; они соответствуют общепринятым границам индийской столицы. Площадь города в данных границах составила 252,3 км². В качестве области сравнения применительно к Дели рассмотрены две версии: малая и большая. Малая область ограничена созданным векторным слоем, в точности повторяющим административные границы национального столичного округа Дели, включающего сам город Дели. Площадь этой области сравнительно мала: лишь 1470 км². К сожалению, данная территория неоднородна по характеру поверхности (рис. 5.3), а её административные границы формальны.

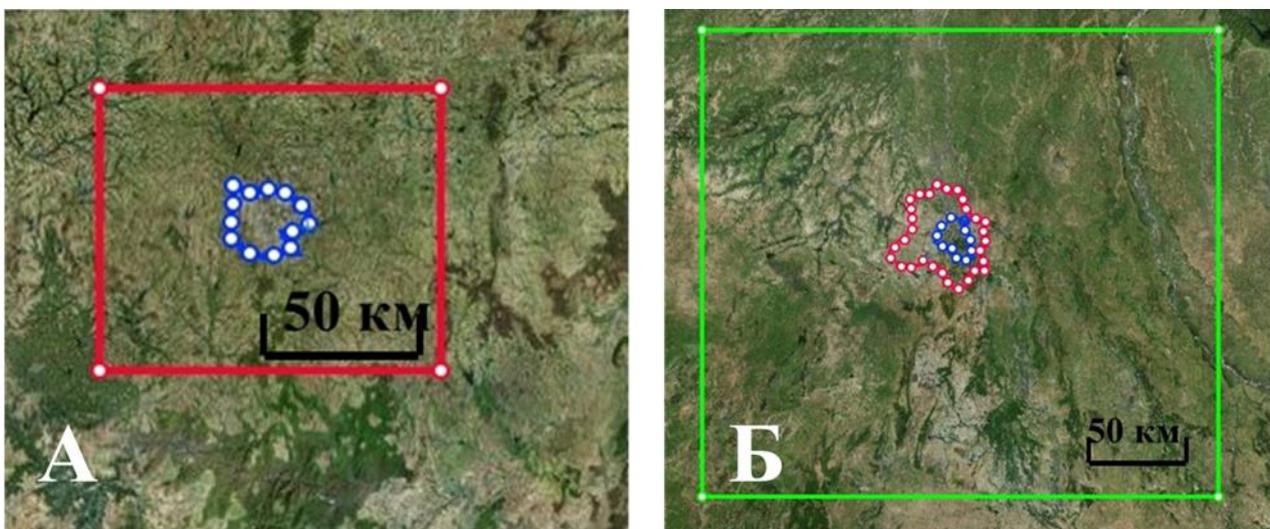


Рис. 5.3 Границы областей вычисления температуры поверхности: а) для города Бангалор; б) для города Дели

В этих границах присутствуют как обширные зоны жилой застройки ближних пригородов Дели и промышленных районов, так и большие по площади сельскохозяйственные угодья и лесные зоны. Как уже отмечено нами выше, при выборе слишком малой области сравнения вокруг того или иного города мы можем столкнуться с систематическим занижением реальной интенсивности «поверхностного острова тепла» из-за значительной доли пригородов в общей площади сравнения. Поэтому, применительно к Дели, нами был также выбран второй вариант большей по площади зоны сравнения. Как и при анализе Московского региона, он представляет собой геометрически правильный прямоугольник, площадью чуть больше 60000 км², с нахождением города (Дели) примерно посередине. Критерием выбора размера этой большой зоны служила ее приблизительная однородность, т.е. равнинное положение, а также отсутствие других крупных городов. Естественным ограничением размера служили предгорья Гималаев на северо-востоке.

Для города Бангалор область сравнения имеет площадь на порядок ниже и составляет примерно 10 тыс. км². Это обусловлено тем, что при выборе большей территории в область сравнения попадают такие крупные города как Хиндупур на севере региона и Колар на востоке с численностью населения приблизительно 152 и 113 тыс. человек, а также к западу от границ этой области имеются крупные золотые рудники, включение которых также нарушило бы однородность выбранной территории.

Помимо спутниковых данных, были привлечены данные наземной сети метеорологических станций в городе Бангалоре за 2002 год. Это необходимо для оценки относительной погрешности вычисления интенсивности поверхностного «острова тепла» в суточном и годовом ходе. Использовались данные двух станций о температуре воздуха на высоте 1,5 метра над землей за пять различных сроков наблюдения. Одна из станций находится в центре города, в то время как другая работала в старом аэропорту на его восточной периферии (рис. 5.4).

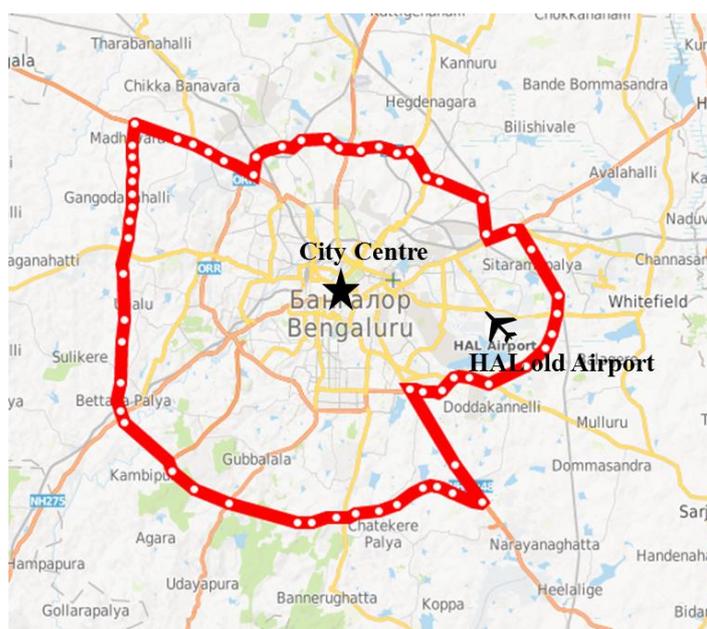


Рис. 5.4 Расположение метеорологических станций в пределах города Бангалор. Местоположение метеорологической станции в центре города отмечено приблизительно

Для анализа «острова тепла» Бангалора в поле температуры воздуха производился расчет среднесуточного значения интенсивности по пяти имеющимся срокам (это 5:30, 8:30, 11:30, 17:30 и 23:30 по местному времени) как разность значений температуры в центре города и в аэропорту. Отдельно использовалось значение интенсивности в срок 11:30, так как это наиболее близкий срок наблюдений к среднему времени пролета обоих спутников. Недостаток метода состоит в том, что данные, полученные на территории старого аэропорта, не совсем точно отражают условия пригородной сельской местности.

5.3 Характеристика поверхностных «островов тепла» в условиях тропиков.

Как говорилось ранее, интенсивность поверхностного «острова тепла» вычислялась как разность значений средней температуры поверхности внутри города и в области сравнения. Для каждого города в отдельности было рассчитано среднее значение интенсивности за 2017-2018 гг. по имеющимся данным (табл. 5.2). Это значение, строго говоря, нельзя назвать среднегодовым, так как в период летнего муссона для территории городов нет ни одного пригодного для анализа снимка. Обеспеченность снимками составляет всего 6-7 месяцев из 12 в Бангалоре и 9-10 месяцев в Дели. Дата прихода летнего муссона на территорию городов различна, что и повлекло за собой разницу в обеспеченности данными. На территорию Индии муссон приходит с Индийского океана, то есть с юго-востока на северо-запад, а отступает в противоположном направлении. Из этого следует, что город Бангалор, находящийся на юге страны, затянута облаками более продолжительный период времени, чем Дели (рис 5.5). Так, например, летний муссон на территорию города Бангалор в 2017 г. пришел 1 июня, в то время как на территорию Дели - спустя лишь месяц, а именно 2 июля.



Рис. 5.5 Даты прихода муссона на территорию северной Индии. Зеленые линии – дата наступления муссона в 2017 году, красные линии – средняя дата наступления муссона

Таблица 5.2 Значения средней интенсивности поверхностного «острова тепла» в городах Дели и Бангалор по данным спутников в 2017-2018 гг.

город	Дели				Бангалор	
	Интенсивность "острова тепла" при сравнении со Столичной территорией Дели		Интенсивность "острова тепла" при сравнении с большой областью сравнения			
год	2017	2018	2017	2018	2017	2018
Январь	0,1	0,1	0,5	0,5	-2,1	-1,1
Февраль	0,6	0,2	2,2	2,0	-3,1	-1,8
Март	0,1	0,0	1,6	2,0	-3,3	-1,8
Апрель	-1,5	-1,6	-1,5	-1,2	-	-
Май	-1,5	-2,1	-1,7	-1,2	-	-
Июнь	-0,4	-	0,9	-	-	-
Июль	-	-	-	-	-	-
Август	-	-	-	-	-	-
Сентябрь	0,3	0,7	0,9	1,5	-	-
Октябрь	-1,0	-0,7	-0,5	-0,5	-	1,1
Ноябрь	-1,1	-0,9	-1,9	-1,7	0,9	-0,1
Декабрь	-0,6	-0,3	-1,0	-0,9	-0,6	-1,8
Среднее	-0,5	-0,5	0,0	0,0	-1,6	-0,9

Но даты наступления муссона для территории г. Бангалор не совпадают с периодом наступления фактического плотного облачного покрова. Это, скорее всего, связано с близким положением города к морскому побережью. При визуальном отборе снимков было отмечено более частое присутствие большого объема кучевых облаков, закрывающих город от датчиков.

Как видно из табл. 5.2, знак связанной с городом температурной аномалии может быть, как положительным, так и отрицательным. В отличие от городов средних широт, мегаполисы Индии оказались в среднем холоднее области сравнения или различия между ними незначительны.

Как говорилось ранее, интенсивность поверхностного «острова тепла» (I) для города Дели рассчитывалась для двух различных областей сравнения. При сравнении города с национальной столичной территорией оказалось, что в среднем город холоднее. Это может быть связано с самой спецификой столичной территории Дели, так как она представляет собой плотно застроенную промышленную пригородную территорию города, в то время как внутри города находятся достаточно крупные парковые зоны, одной из которых является Buddha Jayanthi Park вместе с территорией сельскохозяйственной академии Дели площадью примерно 20 км², занимающей 8% от территории города.

Однако для выявления различий города и природной территории лучше обратить внимание на сравнение с большой областью сравнения. В этом случае город в среднем за 2017-2018 гг. не отличается

от окружающей его сельской местности по своей температуре поверхности. За оба анализируемых года значение I оказалось равным нулю. Однако в годовом ходе наблюдаются характерные для двух лет закономерности (рис 5.6). Как можно заметить, графики, построенные за два разных года, повторяют свой ход и практически совпадают. Для каждого среднемесячного значения были построены доверительные интервалы с доверительной вероятностью 95%. Следует отметить, что максимальные значения интенсивности достигаются в феврале и в марте, и с вероятностью 95% они больше единицы.

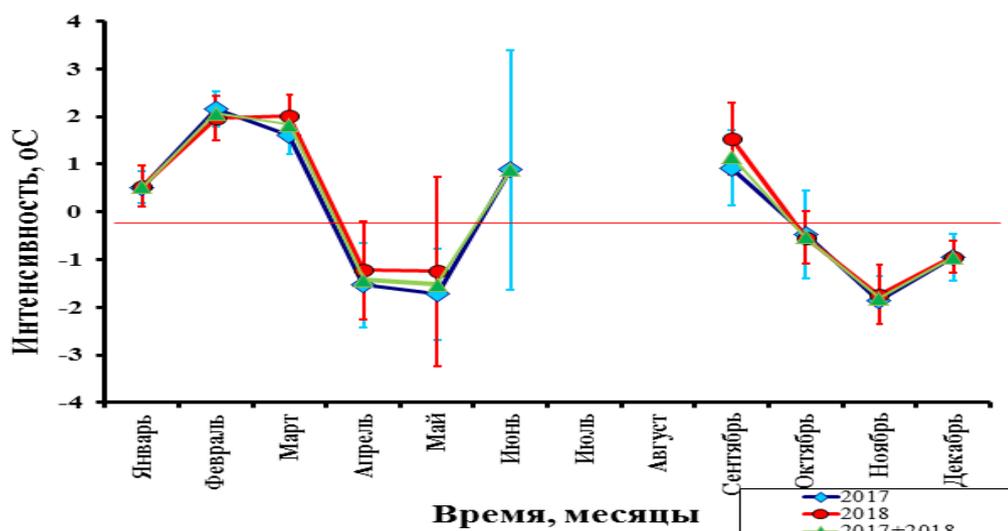


Рис. 5.6 Годовой ход интенсивности поверхностного «острова тепла» в городе Дели

Смотря на рисунок 5.6 можно также увидеть, что в предмуссонный период, а именно с марта по июнь, значение I уменьшается и становится отрицательным. К сожалению, среднемесячное значение июня в 2017 г. непоказательно, так как обеспеченность снимками мала (всего два пролета за месяц в безоблачных условиях). Оценить интенсивность поверхностного «острова тепла» в муссонный период по спутниковым данным не представляется возможным из-за сплошного покрова плотных облаков. Что касается послемуссонного периода, то в сентябре значение интенсивности поверхностного «острова тепла» вновь становится положительным, но к ноябрю значение уменьшается и достигает своего минимума. Затем, с декабря по февраль, в период зимнего муссона, интенсивность снова начинает расти. Такой сложный годовой ход можно попытаться объяснить особенностями отклика температуры разных типов поверхности на климат территории.

После муссона растительность за пределами города начинает увеличивать свою биомассу, в то время как в пределах города доля озеленения гораздо меньше. Затем, с приходом зимнего муссона, скорее всего, начинается увядание растительности в сельской местности, а также уборка урожая в конце декабря. Не стоит забывать, что на территории города, как и в области сравнения, имеются сельскохозяйственные угодья. Все поля оголяются и лишаются растительного покрова, а, как известно, открытая сухая почва может сильно нагреваться. Но, однако, в период сильной жары асфальтовые и бетонные покрытия городов, имеющие большую теплоемкость, чем открытая почва, все-таки прогреваются сильнее. В конце

марта, когда жара несколько уменьшается и засуха прекращается, поля снова активно засеваются, в том числе и внутри города, то есть доля озеленения резко увеличивается.

В литературе имеется пример определения интенсивности городского «острова тепла» по наземным данным в городе Дели. Измерения производились на трех метеорологических станциях и 27 автоматических станциях, одни из которых находятся внутри города, а другие - в пределах столичной территории Дели. Вся площадь столичной территории была разделена на ячейки размером 8 на 8 км, на каждую из которых приходилось одно значение температуры. Измерения производились в течение нескольких дней с утра 25 до ночи с 28 на 29 мая 2008 года в стандартные сроки наблюдений, а именно в 03:00, 09:00, 15:00 и 21:00 часов. Для каждого из сроков наблюдения были построены осредненные карты температуры воздуха, исходя из которых определялась интенсивность «острова тепла». Она рассчитывалась как разность между двумя значениями температуры на территории города – максимальным и минимальным. В первый срок ото дня ко дню интенсивность изменялась в пределах между 4,1 и 5,2 °С. В срок, характеризующийся максимальными суточными температурами (15:00), она изменялась в более широком диапазоне от 3,8 до 7,6 °С. Причина такой изменчивости значений стало наличие двух дождливых дней, значение интенсивности в которые было минимальным. Средние за период наблюдения значения интенсивности «острова тепла» в два оставшихся срока (09:00 и 21:00) составили 5,4 и 5,1 °С соответственно. Также в работе было отмечено, что максимальная температура внутри города достигается в зонах с наибольшей плотностью застройки, в то время как минимальные в зеленых зонах города.

Таким образом, наши данные для территории города Дели не подтверждаются краткосрочными наземными измерениями ни в среднем за период, ни в суточном ход. В этой связи следует отметить, что методика исследований различна. Именно поэтому для изучения «острова тепла» территории другого исследуемого города (Бангалор) были привлечены данные двух метеорологических станций, как упоминалось ранее, одна из которых располагается в центре города, а другая на его восточной окраине. Нам удалось получить данные за 2002 год по пяти срокам наблюдения 5:30, 8:30, 11:30, 17:30 и 23:30. Интенсивность «острова тепла» в данном случае рассчитывалась как разность температуры на двух станциях в каждый срок наблюдений.

Но для начала следует представить данные о вычислении интенсивности «острова тепла» в поле температуры поверхности. Итак, среднее значение I , рассчитанное по имеющимся данным за период наблюдения с января 2017 по декабрь 2018 годов, составляет -1,3 °С. Максимальное значение было достигнуто 23.10.2018 по данным спутника Aqua и составило 2,3 °С. Минимальное значение 27 марта 2017 года было получено по снимку со съемочной аппаратуры спутника Terra и достигло значения -9,8 °С. Отрицательное значение среднегодовой интенсивности поверхностного «острова тепла» можно объяснить особой структурой городского устройства как самого Бангалора, так и его окрестностей. Внутри города находятся обширные зеленые зоны (в 2017 г. их доля от площади города составила 16%)

и крупные водные объекты, в то время как пригородная территория в последние годы все больше превращается в индустриальные урбанизированные районы.

При оценке же годового хода I возникают некоторые объективные сложности. К сожалению, из-за продолжительного периода летнего муссона спутниковые данные доступны нам только на протяжении 5-6 месяцев в году с перерывом за период с апреля по октябрь. Данные среднемесячных значений представлены в табл. 5.2, а на рис. 5.7 представлен график приблизительного годового хода значения интенсивности поверхностного «острова тепла». Так же, как и в случае с городом Дели, для каждого значения были рассчитаны доверительные интервалы с доверительной вероятностью 95%, что позволяет оценить надежность полученных данных. Графики среднемесячных значений интенсивности «острова тепла» за 2017 и 2018 гг. имеют качественно сходный ход. На протяжении почти всего периода, обеспеченного данными, значение I для города Бангалор отрицательно. Но следует отметить, что, как и для города Дели, после отступления летнего муссона его значение положительно, а затем плавно уменьшается. Большой доверительный интервал в марте 2017 года объясняется проявлением в этом месяце экстремально минимального значения интенсивности «острова тепла». К причинам создаваемого Бангалором «острова холода» в поле температуры поверхности помимо довольно плотной застройки в пригородной зоне и наличия в городе парков (как и в Дели) относится также возвышенное положение Бангалора на плато по сравнению с окружающей его фоновой местностью.

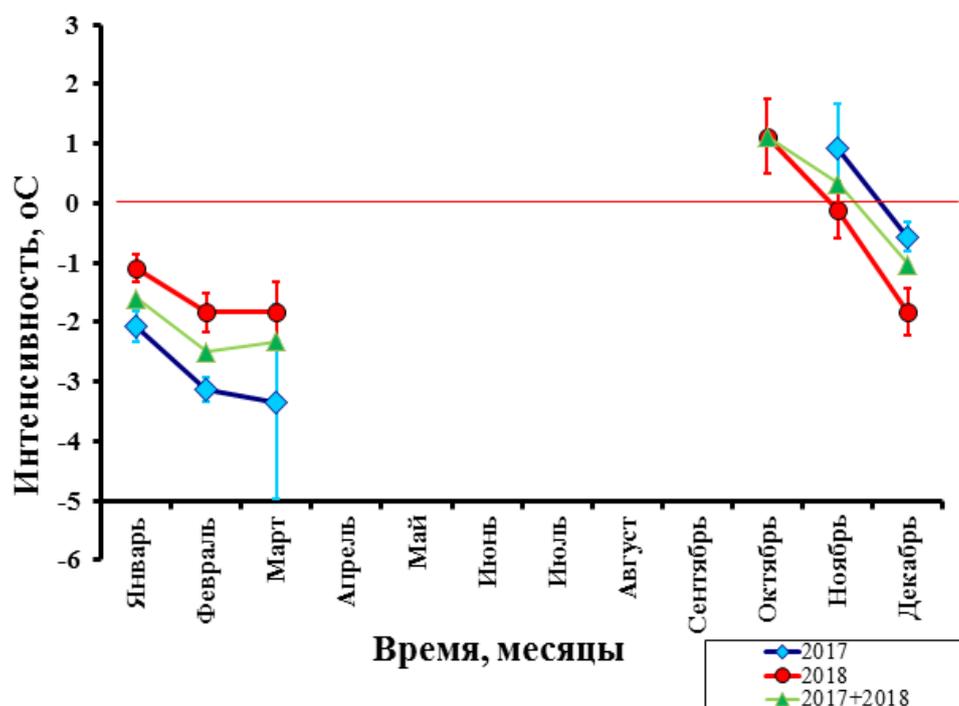


Рис. 5.7 Годовой ход интенсивности поверхностного «острова тепла» в г. Бангалор

Одной из задач исследования стало определение смещения значений интенсивности «острова тепла» из-за неоднородности в суточном и годовом ее ходе.

Данные спутников доступны нам всего один раз в сутки поздним утром на протяжении 6 месяцев в году при безоблачных или малооблачных условиях. Возникает вопрос, может ли время пролета спутника влиять на значение интенсивности поверхностного «острова тепла» и каково это смещение. Для изучения вопроса применялись данные метеорологической сети города Бангалор. Как говорилось выше, нами были использованы данные с двух метеорологических станций, одна из которых находится в центре города, а другая в старом аэропорту на восточной его окраине. За интенсивность «острова тепла» в поле температуры воздуха (I_B) принималась разность температуры на этих двух станциях.

Был построен суточный ход этого параметра I_B (рис. 5.8). Как можно увидеть, значение интенсивности имеет четко выраженный суточный ход. В 2002 году он сглажен с небольшой амплитудой колебания (лишь 1,05 °C).

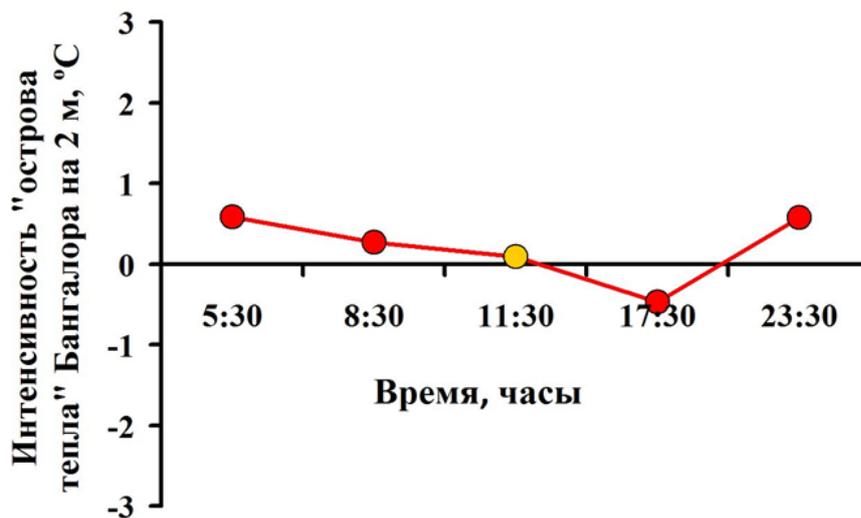


Рис. 5.8 Суточный ход интенсивности городского «острова тепла» в Бангалоре по данным двух метеорологических станций.

После срока 11:30 в среднем за 2002 год значение параметра уменьшается и становится отрицательным. Обратный знак меняется только поздним вечером. Спутники пролетают в большинстве случаев именно после данного срока. Скорее всего, это является одной из причин отрицательного значения средней интенсивности поверхностных «островов тепла».

Произведена оценка отклонения среднесуточного значения I_B от значения в 11:30 (ближайший срок наблюдения за температурой воздуха ко времени пролета спутника). Поправка производилась двумя методами: методом разности и методом отношения.

Итак, среднесуточная интенсивность I_B в городе Бангалор в 2002 году составила 0,2 °C, в то время как средняя интенсивность I_B в 11:30 оказалась близкой к нулю и составила 0,09 °C. При введении поправки методом разности можно сделать вывод, что смещение мало и составляет всего 0,1 °C, что составляет всего 7 % от среднего значения I за 2017-2018 год, и около 10% от суточной амплитуды

колебания значений $\Delta T_{\text{в}}$. В результате можно сказать, что интенсивность I в 11:30 меньше среднесуточной на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет с учетом поправки $-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Если же вводить поправку методом отношений, то из-за времени пролета спутника интенсивность I может быть занижена по сравнению со среднесуточной в $0,4$ раза. Это уже значительное превышение и при введении поправки среднесуточное значение I для города Бангалор в 2017-2018 году составляет $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Также вводилась поправка на пропуски данных в годовом ходе. Так как данные о температуре поверхности доступны нам только, во время отсутствия муссона (для города Бангалор на протяжении 6 месяцев) с января по март и с октября по декабрь, то мы должны произвести нормирование значения на годовой ход. На рис. 5.9 представлен совмещенный график годового хода интенсивности поверхностного острова тепла за 2017-2018 гг. и острова тепла в поле температуры воздуха за 2002 год.

Рассчитаем поправку на годовой ход методом разности. Среднее значение среднесуточной интенсивности приземного «острова тепла» на $1,2\text{ м}$ в месяцы, когда имеются спутниковые данные, составляет $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в среднем за весь год $= 0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разница между этими значениями как раз и является поправкой, а именно интенсивность поверхностного «острова тепла» в Бангалоре завышена на $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению со среднегодовым значением. Приведение спутниковых данных об интенсивности поверхностного «острова тепла» I Бангалора в утренние часы к среднесуточному значению методом разности:

$$\Delta T_{\text{п}} = -0,9 - 0,2 = -1,1\text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (16)$$

Поправка методом отношений показывает, что интенсивность поверхностного «острова тепла» в $1,6$ раз больше, чем интенсивность острова тепла на высоте $1,2\text{ м}$.



Рис. 5.9 Годовой ход интенсивности «острова тепла» по наземным и спутниковым данным.

Выводы к главе.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

1. Крупные города Индии (Дели и Бангалор) в среднем за 2 года не создают в поле температуры поверхности явно выраженного «острова тепла»;
2. Интенсивность поверхностного «острова тепла» I в городе Дели в среднем за период наблюдения составила $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вот Бангалор создает вокруг себя явно выраженную отрицательную температурную аномалию со средней интенсивностью $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. При анализе отклонений значений интенсивности поверхностного «острова тепла», рассчитанной с использованием спутниковых данных, по сравнению с интенсивностью в поле температуры воздуха было выявлено, что в суточном ходе из-за позднего времени пролета спутников I занижается, а в годовом ходе из-за пропусков во время муссонного периода, наоборот, несколько завышается.
4. В годовом ходе I для обоих городов замечена тенденция усиления «острова тепла» в послемуссонный период, что может быть связано с максимумом вегетации растений в сельской местности после сезона дождей.

Заключение.

В данной работе на основе температуры поверхности по данным дистанционного зондирования Земли спутниками Terra и Aqua, а также данных о температуре воздуха на высоте двух метров и поверхности вскопанной площадки, полученных на станциях метеорологической сети, было проведено исследование явления городского «острова тепла» на территории г. Москва. Помимо всего прочего были рассмотрены основные закономерности распределения температуры поверхности по всему Московскому региону, и произведена оценка влияния растительного покрова на характеристики температурного поля.

По итогам работы можно сделать следующие выводы:

- На территории города Москва существует устойчивая положительная температурная аномалия, проявляющаяся как в поле температуры поверхности, так и по данным о температуре приземного слоя воздуха.

- Произведен отбор пригодных для анализа снимков территории Московского региона. В ходе эксперимента с имитацией облаков были установлены рамки пригодности снимка для анализа характеристик поверхностного «острова тепла». Так, при покрытии облаками более 20% города и 50% области происходит значимое смещение оценок данного параметра.

- Данные стационарной метеорологической сети позволили впервые определить отклонения в расчетах интенсивности поверхностного «острова тепла» связанные с временем пролета спутника и учета только тех дней, когда над территорией региона устанавливается безоблачная (антициклональная) погода, в условиях которой «остров тепла» максимален

- Рассчитаны значения интенсивности поверхностного «острова тепла» как по всей выборке данных, так и в среднем за период с 2008 по 2018 гг. Ее величина изменяется от случая к случаю в широких пределах от -1,3 до +7,7 °С. Отрицательное значение подтверждает тот факт, что при определенных синоптических условиях город может оказаться холоднее окружающей его сельской местности. В среднем же, однако, значение интенсивности все же положительно и составляет 2,7°С.

- Произведена оценка годового хода интенсивности поверхностного «острова тепла» в Москве по данным космических снимков, что также не встречалось ранее в литературе. Максимальных значений данный параметр достигает в июне и составляет (+4,4 °С), в то время как минимум наблюдается в октябре-ноябре (+1,0 и +1,1 °С соответственно).

- По данным космических снимков за период с 2008-2015 получены карты распределения температуры поверхности в Московском регионе, из которых видно, что поле температуры поверхности подчиняется законам географической зональности, а также зависит от других факторов поверхности, таких как наличие крупных городов (Москва приводит к смещению изотерм далеко на север), лесистость территории (районы области, где процент лесов от общей площади минимален, оказались более теплыми), а также типа почв.

- При подробном разборе температурного поля внутри города были выявлены локальные понижения, связанные с наличием крупных парков. Это явление в литературе получило название локальных «островов холода». Было выявлено 28 парковых зон с площадью не менее 0,5 км², которые могут проявиться в поле температуры поверхности при пространственном разрешении снимков в 1 км. В среднем за весь период наблюдения они оказались на 1,3 °С холоднее всей остальной части города.

- Среднемесячные значения интенсивности локальных «островов холода», то есть разности средней температуры внутри парков и в остальной части города, имеют четко выраженный годовой ход с максимальным охлаждающим эффектом в июне (-2,7 °С) и минимумом в ноябре (-0,2 °С). Такое распределение значений данного параметра связано с изменениями в самом растительном покрове.

- В ходе анализа интенсивности локальных «островов холода» внутри различных парков были выявлены статистически значимые закономерности проявляемого охлаждающего эффекта от площади парка и значения вегетационного индекса NDVI, косвенно отражающего объём биомассы. Для территории 20 парков был проведен анализ зависимости параметра интенсивности охлаждения от индекса листовой поверхности (LAI), с помощью которого существует возможность оценки плотности сомкнутости крон. Однако выявленная зависимость не оказалась значимой. Таким образом, чем больше площадь парка и его биомасса, тем более сильный охлаждающий эффект он оказывает.

В качестве рекомендаций по применению результатов диссертации предлагается использование новых спутниковых оценок значений интенсивности «острова тепла» для регулирования дат начала и конца отопительного сезона. Рассмотренные в работе ряды среднегодовых значений можно использовать для прогнозирования усиления эффекта городского «острова тепла» и связанных с ним экономических последствий. Следует рассмотреть возможность применения спутниковых данных для расширения возможностей экологической и термического мониторинга внутри городских территорий. Исследование охлаждающего эффекта парковых зон применимы для задач градостроения, особенно в условиях регламентирования степени озеленённости территории города в настоящее время.

Перспективы в дальнейшей разработке темы состоят в:

- Более подробное рассмотрение температурного влияния различных типов покрытия внутри города и оценке их вклада в общее значение интенсивности теплового острова;
- Выявлении основных закономерностей формирования городского «острова тепла»;
- Проведении анализа изменчивости температуры поверхности в Московском регионе без учета городских территорий.

Список литературы.

1. Постановление Правительства Москвы от 13 ноября 2007 года № 996-ПП с изменениями на 26 ноября 2019 года «О Генеральной схеме озеленения города Москвы на период до 2020 года»
2. Атлас Московской области – М., ГУГиК, 1964 г.
3. Городские зеленые зоны: краткое руководство к действию - Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро, 2017 г. — 23 стр.
4. Загрязнение воздуха и жизнь растений//Под ред. Майкла Трешоу. Л., Гидрометеиздат, 1988 г. — 536 с.
5. Климат Москвы в условиях глобального потепления. Под редакцией Кислова А.В. —М., Издательство Московского университета, 2017 – 288 с.
6. Климат России. Под редакцией Н.В.Кобышевой. — СПб., Гидрометеиздат, 2001, 656 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3, часть 1. — Л., Гидрометеиздат, 1985 – 300 с.
8. The Earth observing system Aqua // NASA facts. – 2002 - Ст. 039GSFC
9. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Климатические ресурсы солнечной энергии Московского региона. - М., "ЛИБРОКОМ", 2012, 312 с.
10. Алисов Б. П. Климатические области зарубежных стран - М. Государственное Издательство Географической Литературы, 1950 г., 351 стр.
11. Алисов Б.П Географические типы климатов - Метеорология и Гидрология 1936 № 6
12. Алисов Б.П., Полтараус Б.В. Климатология - М: Издательство Московского Университета, 1974 г. - 300 с.
13. Афонин С.В. Применение физического и регрессионного подходов к измерению температуры поверхности суши по данным MODIS - Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т.9 - №1 - 2012 г. - С. 9-15
14. Балдина Е.А., Грищенко М.А. Исследование "теплого острова" Москвы по разносезонным снимкам Landsat-4/ETM+. - Геоинформатика, 2011, № 3 - С.62-69.
15. Бёер В. Техническая метеорология. - Л.: Гидрометеиздат, 1966 г. - 291 стр.
16. Белицина Г.Д., Васильевская В.Д., Гришина Л.А., Евдокимова Т.И. Почвоведение: Том 1 - М.: Высшая школа, 1988 г. - 400 с.
17. Берг Л.С. Основы климатологии /2 изд. - Л. Государственное учебно-педагогическое издательство НАРКОМПРОСА РСФСР, 1938 г. - 455 стр.
18. Вагнер Б.Б, Дмитриева В.Т. Озера и водохранилища Московского региона: учеб. Пособие - М: Московский комитет образования Московский Городской Педагогический Университет, 2004 г. - 105 с.
19. Вагнер Б.Б., Клевкова И.В. Реки Московского региона: учеб. Пособие - М: Московский комитет образования Московский Городской Педагогический Университет, 2003 г. - 215 с.
20. Вагнер Б.Б., Манучарянц Б.О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона: учеб. пособие - М: Московский комитет образования Московский Городской Педагогический Университет, 2003 г. - 81 с.
21. Голюков А.С. Анализ данных температуры поверхности Земли по данным MODIS TERRA - Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края - Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2014.
22. Грищенко М.Ю. Применение тепловых снимков системы ETM+ для изучения теплого острова Москвы - Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012 г. Т.9. №4 - С. 95-101
23. Журенков К. Как изменились границы Москвы за последние 100 с лишним лет - Журнал "Огонёк" - 2011. - №25 - С. 5
24. Завьялов М. А. Анализ теплофизических свойств асфальтобетона - Вестник СибАДИ, - 2009 г. - вып. №3(13) - С. 36-40

25. Замолодчиков Д.Г., Кобяков К.Н., Кокорин А.О., Алейников А.А., Шматков Н.М. Лес и климат. - М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2015 г. - 40 с.
26. Кёппен В.П. Основы климатологии (климаты земного шара) // перевод под ред. Тихомирова Е.И. // - М. Государственное учебно-педагогическое издательство НАРКОМПРОСА РСФСР, 1938 г. - 256 стр.
27. Кислов А. В., Варенцов М. И., Горлач И. А., Алексеева Л. И. "Остров тепла" Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления - Вестник Московского Университета, Серия 5, География, №4, 2017 г. - с. 12-19
28. Корнева И. А. Современные климатические изменения нижней тропосферы и деятельного слоя почвы в Московском регионе. Диссертация на соискание уч. степени к.г.н - Москва, 2015
29. Кузнецова И.Н., Бруслова Н.Е., Нахаев М.И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость. - Метеорология и гидрология, 2017, № 5 - стр.49-61.
30. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А. Тематическое картографирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности. - Йошкар-Ола, 2015
31. Ландсберг Г. Е. Климат города. - Л.: Гидрометеиздат, 1983 г. - 248 стр.
32. Локощенко М.А, Енукова Е.А Остров тепла в Москве по данным спутников – Метеорология и гидрология, 2020, №7 – стр. 50-63.
33. Мартонн Э. Основы физической географии: в 4 Т. т. 1 // перевод под ред. Ивановой А. В.// - Л. Государственное объединенное научно-техническое издательство, 1939 г.
34. Мягков М.С., Алексеева Л.И. - Оценка усиления городского острова тепла за счет применения фотоэлектрических установок (на примере Москвы) - Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции. №2,2020 год стр- 120-126
35. Мячкова Н.А., Сорокина В.Н. Климат Московской области. - М., Издательство Московского университета, 1991 г. - 54 стр.
36. Оке Т. Р. Климаты пограничного слоя. - Л.: Гидрометеиздат, 1982 г. - 360 стр.
37. Поздняк Г.В "Атлас мира" - из-во АСТ, 2018 г. стр 184-185
38. Престон Н. Е. Разработка методики текстурно-спектрального анализа тепловых полей изучения ландшафтных комплексов на основе аэрокосмических наблюдений. Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. - Москва, 2012
39. Рубинштейн К.Г., Гинзбург А.С. Оценки изменений температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка). - Метеорология и гидрология, 2003, № 2 - С. 29-38.
40. Самсонов Т.Е., Тригуб К.С. Картографирование локальных климатических зон Москвы по космическим снимкам - Геодезия и картография, №6 - 2018 г. - С. 14-25
41. Сорокина (Енукова) Е.А., Локощенко М.А. "Острова холода" в Москве//Сборник трудов пятого международного экологического конгресса (Седьмой международной научно-технической конференции) ELPIT 2015, Самара, 2015 г. - С. 254-261
42. Сорокина (Енукова) Е.А., Локощенко М.А. Поверхностный "остров тепла" в Москве по данным спутников. - Вестник Международного университета природы, общества и человека "Дубна" Серия "Естественные и инженерные науки", 2017, № 1 (37), стр.32-38.
43. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010 г. - 148 с.
44. Хабаров Д.А., Адиев Т.С., Попова О.О., Чугунов В.А., Кожевников В.А. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли - Московский экономический журнал, №1, 2019 г. - С. 10
45. Черепанов А.С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. // Геоматика. - 2009 . - №3. - С. 28-32.
46. Ягдарова О.А., Воскресенская О.Л., Особенности прохождения фенофаз у однолетних декоративных растений в условиях городской среды - Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности, 2013, № 2
47. Ahmad F. NOAA AVHRR NDVI/MODIS NDVI Predicts Potential to Forest Resource Management in Atalca District of Turkey - Global Journal of Science Frontier Research Environment & Earth Sciences - 2012, Volume 12, Issue 3, Version 1.0

48. Al-Gretawee1 H., Rayburg S. and Neave M. THE COOLING EFFECT OF A MEDIUM SIZED PARK ON AN URBAN ENVIRONMENT - International Journal of GEOMATE, Oct., 2016, Vol. 11, Issue 26, pp. 2541-2546
49. Ali G., Abbas S., Qamer F.M., et al. (2021). Environmental impacts of shifts in energy, emissions, and urban heat island during the COVID-19 lockdown across Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125806.
50. Alonso M.S., Labajo J.L., Fidalgo M. R. Characteristics of the urban heat island of Salamanka, Spain.//*ATMOSPHERA* - 2003 - Vol. 16, № 3 - pp. 138-148
51. Alqasemi A.S., Hereher M.E., Kaplan G. et al. (2021). Impact of COVID-19 lockdown upon the air quality and surface urban heat island intensity over the United Arab Emirates. *Science of the Total Environment*, 767, 144330.
52. Armson D., Rahman M.A., Ennos A.R. A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK.//*Arboryculture & urban forestry*, 39(4) , July, 2013, pp. 157-164
53. Arrofiqoh E. N., Setyaningrum D. A. The Impact of Covid-19 Pandemic on Land Surface Temperature in Yogyakarta Urban Agglomeration. *Journal of Applied Geospatial Information*, 2021, 5(1), 480-485, DOI: 10.30871/jagi.v5i1.2784.
54. Auer, A.H. Correlation of land use and cover with meteorological anomalies - *J. Appl. Meteor.*, 1978, №17 - pp. 636-643.
55. Breda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instrument and current controversies.//*Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, №392, pp. 2403-2417
56. Cao X., Onishib A., Chena J., Imurab H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data - *Landscape and Urban Planning*, №96, 2010, p. 224-231
57. Chandler T.J. *The Climate of London*. - Hutchinson, 1965 - 292 pp.
58. Changa Chi-Ru, Li Ming-Huang Effects of urban parks on the local urban thermal environment - *Urban Forestry & Urban Greening* 13 (2014) 672-681
59. Chow W. T. L., Pope R. L., Martin C. A, Brazel A. J. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts.//*Theoretical and applied climatology*, January, 2010, DOI 10.1007/s00704-010-0293-8
60. Dhruv Nanda, Deepk R. Mishra and Debadatta Swain. (2021). COVID-19 lockdowns induced land surface temperature variability in mega urban agglomerations in India. *Environ. Sci.: Processes & Impacts*, 23(1), 144-159, DOI: 10.1039/D0EM00358A.
61. El Kenawy A.M., Lopez-Moreno J.I., McCabe M.F., Domnguez-Castro F., Pea-Angulo D., Gaber I.M., Alqasemi A.S., Al Kindi Kh.M., Al-Awadhi T., Hereher M.E., Robaa S.M., Al Nasiri N., and Vicente-Serrano S.M. (2021). The impact of COVID-19 lockdowns on surface urban heat island changes and air-quality improvements across 21 major cities in the Middle East. *Environmental Pollution*, 288, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117802.
62. Ennos R., Armson D., Rahman M.A. How useful are urban trees? The lessons of the Manchester research project.//*Trees, people and the build environment II*, parallel session 1b:Urban climate and tree growth, pp. 62-70
63. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W. and Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia - *Atmos. Chem. Phys.* - 2016, №16 - pp. 9563-9577,
64. Fabrizi R., Bonafoni S. and Biondi R. Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome. - *Remote Sensing*, 2010, Vol.2 - pp.1400-1415.
65. Hangbin Zh., Xiaoping Ya. and Jialin Li MODIS data based NDVI Seasonal dynamics in agro-ecosystems of south bank Hangzhouwan bay - *African Journal of Agricultural Research* - 2011, Vol. 6(17) - pp. 4025-4033,
66. Harman Ian Nicholas, *The energy balance of urban areas* - THE UNIVERSITY OF READING, Department of Meteorology - 2003, 157 p.
67. Howard L. *The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis.* - W. Phillips, 1818, Vol.1, - 346 pp.
68. Kaplan G., Avdan U., Avdan Z.Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. - *Sciforum Electronic Conference Series*, 2018, Vol. 2.

69. Keeratikasikorn C. and Bonafoni S. Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery - Remote Sensing, 2018, Vol.10, paper index 440.
70. Kratzer, P. A., The Urban Climate - Das Stadtklima Braunschweig, 1956, 221 pp.
71. Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., and Kimura, F. (2001). A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101, 329-358.
72. Lokoshchenko M.A. and Alekseeva L.I. (2022). About the Annual Course of Moscow Heat Island and the Impact on it of Quarantine Measures to Prevent the COVID-19 Pandemic in 2020. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 58(2), 168-177. DOI: 10.1134/S000143382020086
73. Lokoshchenko M.A. and Isaev A.A. Influence of Moscow city on the air temperature in Central Russia. - Proceedings of the 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, 2003, Vol.2 - pp.449-453.
74. Lokoshchenko M.A. and Sorokina (Enukova) E.A. Urban 'heat island' in Moscow by satellite data. - Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, France, 2015, paper index: 11-7-3911378.
75. Lokoshchenko M.A. Urban "heat island" in Moscow // *Urban Climate*. - 2014. - №Vol. 10 part 3. - pp. 550-562.
76. Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. - *Journal of Applied Meteorology and Climatology* - 2017 - Vol.56, №10 - pp.2729-2745.
77. Los, S.O., Justice, C.O. and Tucker, C.J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. - *International Journal of Remote Sensing* - 1994, Vol. 15(17) - pp.3493-3518.
78. Miles V. and Esau I. Seasonal and Spatial Characteristics of Urban Heat Islands (UHIs) in Northern West Siberian Cities. - *Remote Sensing*, 2017, Vol.9, paper index 989.
79. Mills, G. M. and Arnfield, A. J. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon-II. Comparison of the model results with measurements. *Atmospheric Environment*, 27B(2), 171-181.
80. Miner M. J., Taylor R. A., Jones C., Phelan P. E. - Efficiency, economics, and the urban heat island - *Environment and Urbanization* Volume 29, Issue 1, April 2017, Pages 183-194
81. Narita K., et al. Cold air seeping from an urban green space, Imperial Palace, in Central Tokyo. // Proceedings of the ICUC-7, 2009, Yokohama, Japan, paper index: B3-1.
82. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A. *Urban Climates* - Cambridge University Press, 2016 - 596 p.
83. Parkinson C. L., Greenstone R. EOS Data Products. Handbook. Volume 2 - NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 2000 - 253 p.
84. Patel P.P. Estimation of Land Surface Temperature from Landsat Thermal Images Towards Urban Heat Island Mapping of Kolkata. - *Asian Studies*, 2009, Vol. XXVII, No.2 - pp.34-44.
85. PIRINGER M. and all INVESTIGATING THE SURFACE ENERGY BALANCE IN URBAN AREAS - RECENT ADVANCES AND FUTURE NEEDS - *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 2: 1-16, 2002.
86. Pongracz R., Bartholy J., Lelovics E., Dezso Z., Dobi I. Satellite- and ground-based urban heat effect of the Budapest agglomeration area. - Proceedings of the 8th International Conference of Urban Climate, Dublin, Ireland, 2012, paper index 486.
87. Pope R., Brazel A.J. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: Horizontal and vertical impacts - *THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY* - 2010
88. Raalte Lucas van, Michael Nolan, Praveen Thakur, Simon Xue, Nicki Parker - Economic Assessment of the Urban Heat Island Effect - AECOM Australia Pty Ltd Level 9, 8 Exhibition Street, Melbourne VIC 3000, Australia T +61 3 9653 1234 F +61 3 9654 7117 www.aecom.com ABN 20 093 846 925 - 2012 год 41 стр
89. Rahman M.A., Armson D., Ennos A.R. A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. // *Urban ecosystem*, 2014 DOI 10.1007/s11252-014-0407-7
90. Rasul A. Spatial variation of the day time surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraq Kurdistan, from Landsat 8. // *Urban Climate*, 2015
91. Rasul A., Balzter H., Smith C. Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. - *Urban Climate*, 2015, Vol.14, Part 2 - pp.176-186.

92. Santamouris Mat and all - Urban Heat Island and Overheating Characteristics in Sydney, Australia. An Analysis of Multiyear Measurements - Sustainability 2017, 9, 712; doi:10.3390/su9050712
93. Sellers, P.J., Tucker, C.J., Collatz, G.J., Los, S.O., Justice, C.O., Dazlich, D.A. and Randall, D.A. (). A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. International Journal of Remote Sensing - 1994 Vol. 15(17) - pp.3519-3545.
94. Stathopoulou M., Synnefa A., Cartalis C., Santamouris M., Karlessi T. and Akbari H. A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. - International Journal of Sustainable Energy, 2009, Vol. 28, Nos. 1-3 - pp.59-76.
95. Steitz D. et all. Terra: flagship of the Earth Observing System.//NASA press kit, 1999
96. Stewart I.D and. Oke T.R LOCAL CLIMATE ZONES FOR URBAN TEMPERATURE STUDIES - AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012
97. Tsirantonakis Dimitris and Nektarios Chrysoulakis - Earth Observation Data Exploitation in Urban Surface Modelling: The Urban Energy Balance Response to a Suburban Park Development - Remote Sens. 2022, 14, 1473. <https://doi.org/10.3390/rs14061473>
98. Wiener U., Kutler W. The dependence of the urban heat island intensity on latitude - a statistical approach - Meteorological Zeitschrift., Vol. 14., № 5, 2005 - pp.677-686
99. Азия - географический атлас [электронный ресурс] - Режим доступа свободный: <https://worldkarta.ru/india-map.html> - Дата обращения 03.08.2020
100. Вегетационный индекс NDVI -теория и практика [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <http://gis-lab.info>; - Дата обращения 15.05.2016
101. Википедия [электронный ресурс] - Режим доступа свободный: https://ru.qwe.wiki/wiki/List_of_extreme_points_of_India (Дата обращения 04.01.2020)
102. Генеральный план развития Москвы на 2016 год [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <http://belenyuk.com/novuj-genplan-moskvy-planiruetsya-razrabotat-k-seredine-2016-goda.html> - Дата обращения 01.04.2020
103. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [электронный ресурс] - Режим доступа свободный: <https://gis-lab.info/qa/landsat-data-correction.html> - дата обращения 10.05.2023
104. ГИС-портал [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <https://kosmosnimki.ru> -Дата обращения 15.04.2020
105. Гравюра Маттеуса Мериана "Старая Москва" 1638 год [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <https://rhistory.ucoz.ru/publ/30-1418> - Дата обращения 01.04.2020
106. Грищенко М.Ю., Сарычев Е.Ю. Дешифрирование изменений городской застройки Москвы по снимкам со спутников серии Landsat: опыт использования спектральных индексов - Сборник трудов Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)" [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6813> - Дата обращения 05.02.2020
107. Дистанционное зондирование Земли [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <http://portaleco.ru> - Дата обращения 18.05.2014
108. Карта Москвы 1976 года [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: http://www.oldmoscowmaps.ru/v/1976/07.jpg.html?g2_imageViewsIndex=2 - Дата обращения 01.04.2020
109. Карты экологического состояния Московской области [электронный ресурс] - Режим доступа свободный: <https://mwmoskva.ru/ekologicheskaya-karta-moskvy.html> - 21.03.2022
110. Новый генеральный план Москвы 1824 года [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: <https://www.respectme.ru/photoblog/756-> - Дата обращения 01.04.2020

111. Официальный сайт Управления Федеральной службы государственной статистики по г. Москве и Московской области [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<https://mosstat.gks.ru/folder/64634> -- Дата обращения 01.04.2020
112. Памяти фотографа Надара [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<https://rg.ru/2015/04/04/nadar-site.html> -Дата обращения 15.02.2020
113. Первая фотография Земли из космоса [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<http://go2space.ru> - Дата обращения 10.05.2015
114. План Москвы 1907 год. Приложение к адрес-календарю под изданием А. С. Суворина [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: http://retromap.ru/show_pid.php?pid=g1620 - Дата обращения 01.04.2020
115. Рельеф Подмосковья [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<https://anashina.com/relef-podmoskovya/> - Дата обращения 20.01.2020
116. Социальный компас, Рельеф Москвы [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<http://www.socialcompas.com/2017/12/05/relef-reki-luga-i-bolota-moskvy/> - Дата обращения 20.01.2020
117. Схематический план Москвы по данным БСЭ [Электронный ресурс] - режим доступа свободный: http://www.etomesto.ru/img_map.php?id=1713 - Дата обращения 01.04.2020
118. Atlas of urban expansion [электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<http://atlasofurbanexpansion.org/data> - Дата обращения 15.04.2023
119. Terra and Aqua (MODIS) products [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>
120. Terra, Aqua/MODIS (США) [Электронный ресурс] - режим доступа свободный:
<http://support.scanex.com> - Дата обращения 10.05.2015