

УДК 911.9

Х. Ракуаса,
геолого-географический факультет,
Национальный исследовательский Томский государственный
университет
Научный руководитель: канд. геогр. наук, доц. В. В. Хромых

Пространственно-временные изменения температуры поверхности суши на острове Тернате (Индонезия)

Аннотация. В исследовании представлен анализ пространственно-временных закономерностей температуры поверхности земли (LST) на острове Тернате (Индонезия) в период с 1995 по 2025 г. с использованием снимков Landsat 5 и Landsat 8, обработанных в платформе Google Earth Engine (GEE). Выявлен значительный рост максимальной и минимальной температур, существенное увеличение площади территорий с экстремально высокими температурами ($> 35^{\circ}\text{C}$) и сокращение площади участков с низкими температурами. Основные факторы изменений — урбанизация и сокращение растительного покрова, что усилило эффект городского теплового острова и оказало негативное воздействие на экологию и здоровье населения.

Ключевые слова: температура поверхности земли, остров Тернате, Google Earth Engine.

Пространственно-временные изменения температуры поверхности земли (LST) на острове Тернате становятся критически важным объектом исследования из-за их воздействия на прибрежные экосистемы и качество жизни населения. Глобальные исследования показывают, что небольшие острова с быстрой урбанизацией особенно уязвимы к росту LST, в основном из-за преобразования зеленых зон в водонепроницаемые поверхности [2, с. 339]. Исторические данные со спутника Landsat 5 (1995) выявили первоначальные закономерности LST, связанные с естественным растительным покровом, в то время как анализ данных Landsat 8 (2025) демонстрирует тенденцию к повышению температуры из-за расширения жилой застройки и инфраструктуры. Тернате как вулканический остров обладает уникальной географической динамикой, где давление застройки и рост населения ускоряют формирование эффекта городского теплового острова (UHI).

Анализ на основе Google Earth Engine (GEE) представляет собой эффективное решение для картирования многолетних изменений LST с интеграцией данных Landsat 5 и Landsat 8. Данная платформа позволяет проводить облачные вычисления для извлечения LST с использованием алгоритмов Single Channel или Split-Window, которые были validated в аналогичных исследованиях. Для 1995 г. Landsat 5 TM предоставил данные теплового канала (Band 6), преобразованные в темпе-

ратуру поверхности посредством радиометрической и атмосферной коррекции, тогда как Landsat 8 (2025) использует Band 10 и 11 с более высоким тепловым разрешением [1, с. 2]. GEE упрощает пространственно-временной анализ за счет автоматизированных скриптов, позволяя сравнивать 30-летние тенденции LST и выявлять горячие точки температурных изменений. Такой подход способствует оценке градостроительной политики, ориентированной на смягчение эффекта UHI, особенно в ресурсограниченных регионах, таких как Тернате.

Данное исследование проводилось на острове Тернате, Индонезия (рис. 1), с использованием количественного подхода и анализа данных спутниковых снимков Landsat 5 за 1995 г. и Landsat 8 за 2025 г., обработанных на платформе Google Earth Engine (GEE). Процесс анализа включал загрузку спутниковых изображений, радиометрическую и атмосферную коррекцию, извлечение значений температуры поверхности земли (LST) с использованием стандартных алгоритмов, адаптированных для каждого датчика, а также картирование и пространственно-временной анализ изменений LST на острове Тернате. Полученные данные LST были классифицированы по температурным категориям ($^{\circ}\text{C}$) для выявления тенденций изменений и их пространственного распределения. Данный метод позволил эффективно и точно отслеживать температурные изменения в течение 30-летнего

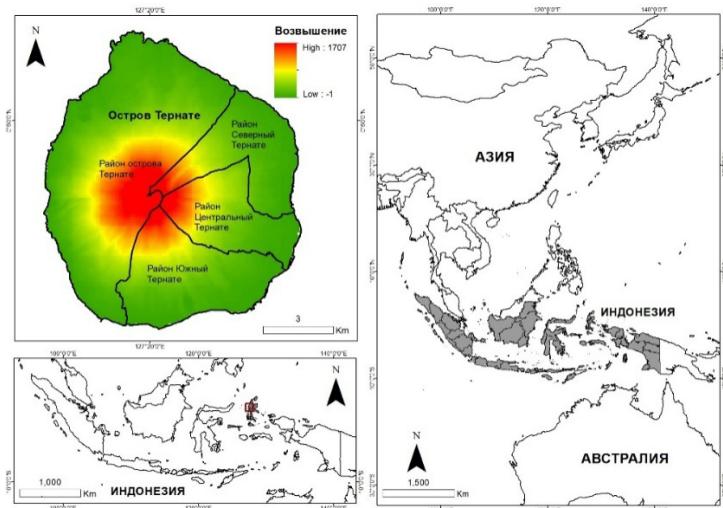


Рис. 1. Район исследования: остров Тернате, Индонезия

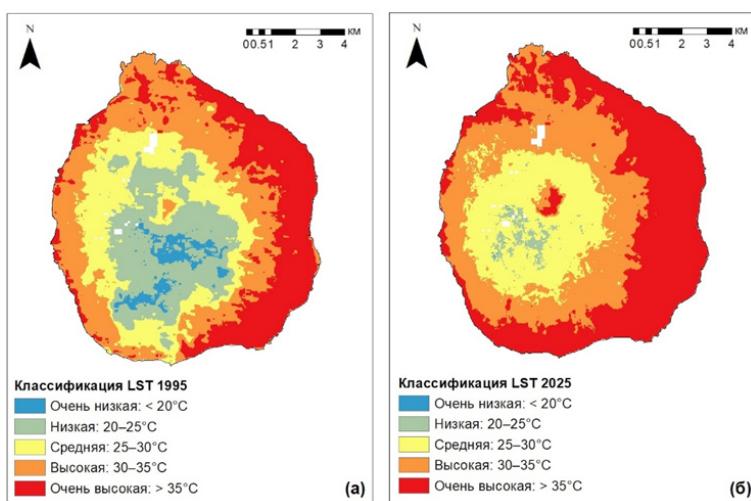


Рис. 2. Карта температуры поверхности земли острова Тернате в 1995 (а) и 2025 (б) гг.

периода, что способствует пониманию последствий урбанизации и изменения климата в исследуемом регионе.

Анализ пространственно-временных изменений температуры поверхности земли (LST) на острове Тернате, представленный на рисунке 2, выявил значительные сдвиги в распределении температурных классов между 1995 и 2025 гг. Площадь тер-

риторий с очень низкой температурой (<20 °C) резко сократилась с 326,92 га до всего 2,36 га, что свидетельствует о стабильном локальном потеплении. Зоны с низкой температурой (20–25 °C) также уменьшились с 2.044,15 га до 184,74 га, указывая на сокращение прохладных участков вследствие изменения земного покрова и урбанизации. В то же время площади со средней температурой (25–30 °C) увеличились с 2.165,45 га до 2.346,99 га, демонстрируя переход к более теплым условиям. Наиболее резкий рост наблюдался в зонах высокой температуры (30–35 °C) — с 3.069,61 га до 3.567,21 га, а также в зонах очень высокой температуры (>35 °C) — с 2.508,58 га до 4.013,90 га, что подтверждает ускоренную тенденцию потепления.

Изменения в распределении температуры поверхности земли на острове Тернате обусловлены сочетанием природных и антропогенных факторов: вулканическая активность горы Гамалама вызывает локальные температурные колебания, тогда как урбанизация и изменение землепользования являются основными драйверами роста LST [3, с. 55]. Использование платформы Google Earth Engine позволило точно идентифицировать очаги потепления, выявив более быстрый рост температур в урбанизированных зонах. Сокращение растительного покрова усиливает эффект городского теплового острова (UHI) в районах Тернате, что согласуется с данными по другим тропическим регионам, где деградация экосистем напрямую коррелирует с повышением тепловой нагрузки.

Комбинация геотермальных процессов и антропогенного воздействия создает уникальные вызовы для устойчивого развития острова, требуя интеграции данных дистанционного зондирования в планирование мер по адаптации, таких как восстановление зеленых зон и оптимизация городской инфраструктуры.

1. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series / S. L. Ermida [et al.]. // *Remote Sens.* — 2020. — Vol. 12, no. 9. — P. 1–21.
2. Investigating and Predicting Land Surface Temperature (LST) Based on Remotely Sensed Data During 1987–2030 (A Case Study of Reykjavik City, Iceland) / M. Mansourmoghadam [et al.] // *Urban Ecosyst.* — 2023. — Vol. 26, no. 2. — P. 337–359.
3. Rakuasa H., Khromykh V. V., Latue P. C. Spatial Analysis of the Relationship between Vegetation Index and Land Surface Temperature in Ternate Island, Indonesia // *BIOPENDIX J. Biol. Pendidik. dan Terap.* — 2025. — Vol. 12, no. 1. — P. 48–57.