

УДК 528.8

Х. Пакуаса,геолого-географический факультет,
Национальный исследовательский Томский государственный
университет

Научный руководитель: канд. геогр. наук, доц. В. В. Хромых

Картирование изменений покрытия земли в районе никелевой добычи в Веда, Индонезия

Аннотация. В исследовании использовались спутниковые снимки Landsat 5 за 1995 г. и Landsat 8 за 2025 г., классифицированные методом случайного леса в Google Earth Engine для картирования земельного покрова. Экспансия добычи никеля в Веда (1995–2025 гг.) вызвала значительное сокращение естественной растительности, появление новых зон добычи, увеличение открытых земель и застроенных территорий, а также стабильность рек и озер, несмотря на риск седиментации. В целом это указывает на деградацию экосистемы и подчеркивает необходимость реабилитации и устойчивого территориального планирования.

Ключевые слова: Landsat, покров земель, район добычи.

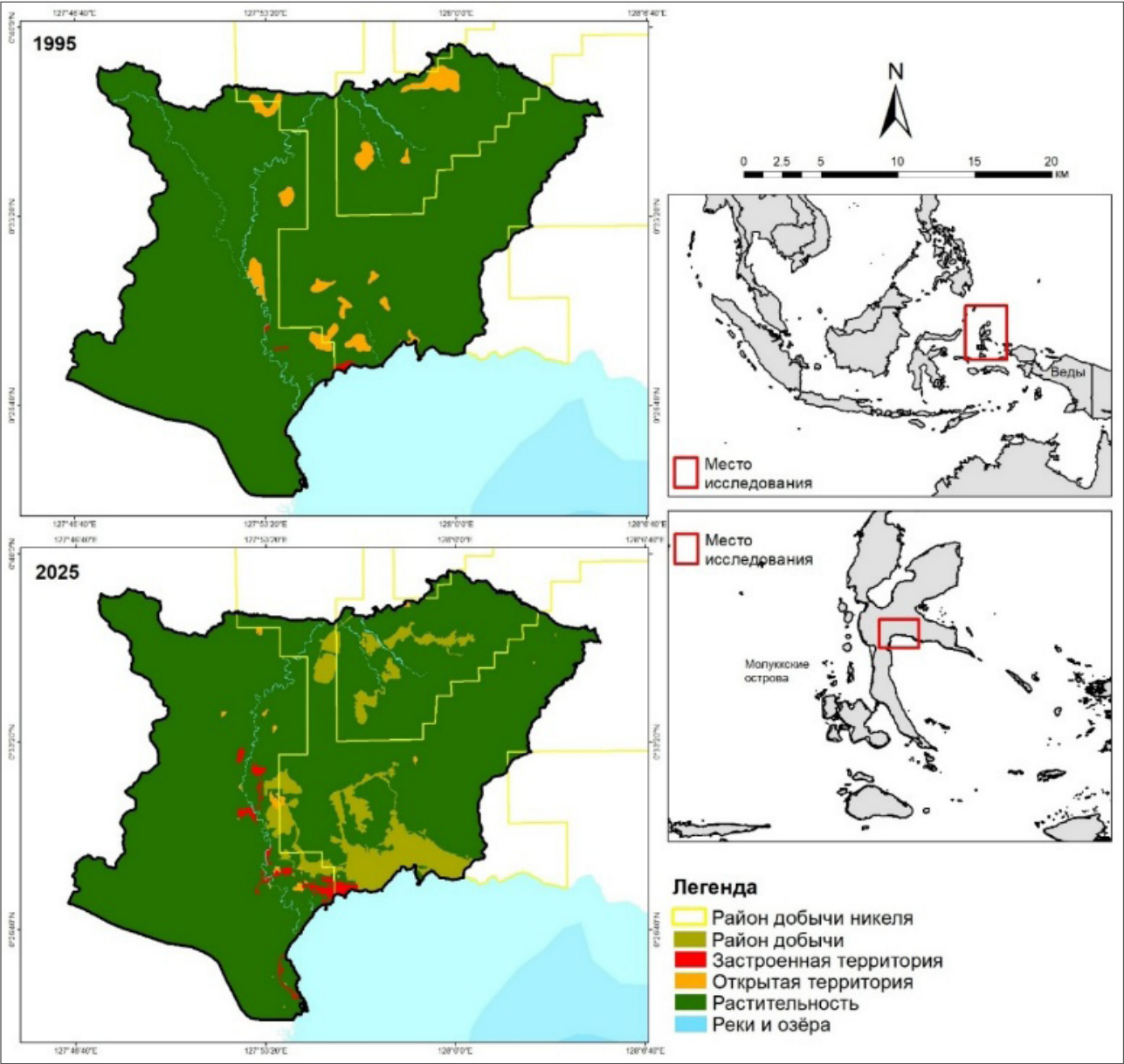
Быстрое развитие добычи никеля в районе Веда на острове Хальмахера приводит к значительным изменениям в земельном покрове через вырубку лесов, деградацию растительности и расширение неvegetированных территорий, что требует точного пространственно-временного мониторинга на основе дистанционного зондирования [2]. В настоящем исследовании картографируются изменения земельного покрова в зоне добычи никеля Веда с использованием изображений Landsat 5 для представления условий 1995 г. и Landsat 8 для 2025 г., позволяя провести пространственный анализ конверсии земель, в первую очередь из лесов и естественной растительности в открытые горные участки, карьеры и застроенные территории, с применением метода классификации изображений на основе машинного обучения случайного леса. Результаты картирования призваны предоставить количественные доказательства масштабов и паттернов изменений земельного покрова из-за добычи никеля, а также послужить научной основой для улучшения практик экологического управления шахтами, планирования реабилитации земель и разработки более устойчивой политики землепользования в районе Веда на острове Хальмахера, Индонезия.

Исследование проводилось в районе Веда на острове Хальмахера, Индонезия. Данные изображений, использованные в исследовании, включают данные Surface Reflectance Collection 2 Tier 1 Landsat 5 за 1995 г. и данные Surface Reflectance Collection 2 Tier 1 Landsat 8 за 2025 г., представляю-

щие собой атмосферно скорректированную поверхностную отражательную способность с сенсора Operational Land Imager (OLI) Landsat 8 с пространственным разрешением 30 м. Оба набора данных получены из U.S. Geological Survey и доступны через каталог данных Google Earth Engine [1]. Для справки: Collection 2 Tier 1 представляет собой коллекцию данных Landsat уровня 1, прошедшую проверку качества геометрии и радиометрии с корневым среднеквадратичным отклонением (RMSE) < 12 м. Все данные Landsat упакованы в «сцены» с перекрытием, охватывающие 170 × 183 км [1].

В настоящем исследовании классификация земельного покрова проводилась с использованием контролируемой классификации. Контролируемая классификация — это метод, включающий вмешательство пользователя на всех этапах, от определения исследуемой территории до процесса группировки, с использованием полигональных выборок на основе руководства по классификации земельного покрова [3]. Одним из методов контролируемой классификации на основе машинного обучения, применяемых в исследовании, является Random Forest, который наиболее широко используется в Google Earth Engine и обладает высокой точностью.

Изменения типов земного покрова в районе Веда за период 1995–2025 гг. демонстрируют масштабную трансформацию ландшафта, в значительной степени обусловленную расширением никеледобывающей промышленности. Растительный покров, который в 1995 г. практически полностью



Карта покрытия земной поверхности Веды за 1995 и 2025 гг.

доминировал в структуре землепользования с площадью порядка 53 294,20 га, к 2025 г. сократился до 48 324,33 га, что означает утрату более 4 900 га естественной растительности за три десятилетия. Одновременно в 2025 г. появляется новая категория земного покрова — «участок никеледобычи» — площадью 4 447,69 га, отсутствовавшая в 1995 г., а также наблюдается увеличение площади открытых территорий с 78,72 до 206,96 га. Карту земного покрова за 1995 и 2025 гг. можно увидеть на рисунке 1. Такая конфигурация полностью соответствует выявленным в литературе тенденциям для никеледобывающих районов Халмахеры, где фиксируются рост площадей безрастительного покрова, деградация и фрагментация растительности вблизи горнодобывающих и пе-

рерабатывающих объектов. Подробные значения площадей типов земного покрова за 1995 и 2025 гг. представлены в таблице.

Площадь покрытия земной поверхности в 1995 и 2025 гг.

Типы земельного покрова	Площадь 1995 (га)	Площадь 2025 (га)
Застроенная территория	153,98	547,92
Открытая территория	78,72	206,96
Реки и озера	363,14	363,14
Растительность	53 294,20	48 324,33
Никеледобывающий участок	0,00	4 447,69
Общая площадь	53 890,04	53 890,04

Помимо этого, площадь застроенных территорий возрастает с 153,98 до 547,92 га, что указывает на развитие промышленной инфраструктуры, жилых зон для работников и сопутствующих объектов в контуре никелевого кластера Веда. При этом формально неизменная площадь категории «реки и озера» (363,14 га в оба момента времени) не исключает существенных трансформаций гидрологических и качественных характеристик водных объектов, поскольку исследования в регионе показывают, что интенсивная добыча никеля сопровождается заилением русел, повышением мутности воды и загрязнением стоками с промышленных площадок.

В совокупности сдвиг структуры земного покрова от преобладания сплошного растительного покрова к мозаике деградированных экосистем, открытых земель и горнодобывающих участков свидетельствует о снижении ландшафтно-экологической устойчивости территории. Это подчеркивает необходимость ужесточения природоохранных стандартов для горнодобывающего комплекса, пространственного планирования, ограничивающего освоение лесных массивов в особо ценных зонах, а также разработки и реализации научно обоснованных программ рекультивации и восстановительного озеленения нарушенных земель.

1. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick, [et al.] // Remote Sens. Environ. — 2017. — Vol. 202. — P. 18–27.

2. Kurniawan B. S., Deforestation A., Arif N. Trends and Drivers in Central Halmahera Regency // J. Wasian. — 2024. — Vol. 11, no. 1. — P. 15–19.

3. Random Forest Classification of Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) Using Sentinel-2 Data—A Case Study of Czechia / Svoboda J., [et al.] // Remote Sens. — 2022. — Vol. 14, no. 5. — P. 1189. — DOI: 10.3390/rs14051189