

На правах рукописи

НГУЕН ТХИ ТХЮИ ХА

**ОЦЕНКА ЭРОЗИИ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКИХ МУССОНОВ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ**

Специальность: 4.1.3. Агрехимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата сельскохозяйственных наук**

Москва 2024

Диссертационная работа выполнена в агробиотехнологическом департаменте аграрно-технологического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

Научный руководитель:

Доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
профессор агробиотехнологического
департамента аграрно-
технологического института

Астарханова Тамара Саржановна

Официальные оппоненты

доктор биологических наук, профессор РАЕ,
профессор кафедры промышленной экологии
и безопасности ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет»

Околелова Алла Ароновна

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий опытным полем
лаборатории почвенно-экологического
мониторинга Центра МГУ Чашниково
ФГБОУ ВО "Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Кубарев Евгений Никитич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный аграрный университет"

Защита диссертации состоится «11» декабря 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ПДС 2021.002 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 117198, ул. Миклухо-Маклая, д. 8 корп.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в УНИБЦ (Научной библиотеке) ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 117198 ул. Миклухо-Маклая, д. 6, и на сайте: <https://www.rudn.ru/science/dissovet>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

и.о. Ученого секретаря,
доктор биологических наук

Игнатов А.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В настоящее время около 70 % мировой территории земель подвергается эрозии почв и опустыниванию. Во Вьетнаме примерно 40 % территории подвержено эрозии. Этот вид деградации почв представляет собой угрозу не только для сельского хозяйства, но и для социально-экономического развития страны в целом. Эрозия почвы может быть вызвана такими причинами, как водная и ветровая, интенсивность проявления которой зависит от типа и свойств почвы, характера растительного покрова, системам землепользования и эффективностью противоэрозионных мероприятий. Эрозия почвы усугубляется посредством деятельности, человека. В горных районах Вьетнама население до настоящего времени занимается сельским хозяйством на землях с крутыми склонами (даже более 25 °). В таких условиях происходит значительная эрозия, почва быстро деградирует, время использования земель сокращается, обычно после 2-3х урожаев культур короткого срока вегетации. Почва становится заброшенной и неподлежащей восстановлению. Замена естественного лесного покрова посаженными лесами представляет собой процесс, ускоряющий эрозию почвы, как правило, на плантациях акации во Вьетнаме.

Горная местность провинции Нгеан Вьетнама находится под воздействием тропического муссонного климата со среднегодовым количеством осадков, варьирующих от 1800 до 2200 мм/год. Вид землепользования, сельскохозяйственная обработка и влияние климата, в особенности колебания, количества осадков, увеличивают риск проявления эрозии почвы. Это подтверждает актуальность исследований по оценке и прогнозу эрозии почв для разработки эффективных мер по борьбе с ней.

Степень разработанности исследований. Факторами, влияющими на развитие процессов эрозии, в разные годы занимались Moore I.D., Grayson R.V. andoth., 1999; Соболев С.С. (1948), Девдариани А.С. (1964), Заславский М.Н. (1979), Швебс Г.И. (1981), Ларионов Г.А. (1993), Жеренков А.В. (1999) и др. В настоящее время много исследований на данную тему у Adornado H. A., Yoshida M. И., Apolinaris H. A. (2009), Kazuya Takahashi (2020), Савина И.Ю. (2020,2022), Соболева С.С. (1975), Брауде И.Д. (1965, 1976), Лидова В.П. (1981), Кочетова И.С. (1988), Сурмач Г.П. (1992).

Целью исследований является изучение развития эрозии почв в регионе тропических муссонов и разработка мер, направленных на ее минимизацию на примере района Тхань Чуонг провинции Нгеан Вьетнама.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- выявление и оценка факторов, влияющих на развитие эрозии почв на исследуемой территории;
- определение интенсивности развития эрозионных процессов с применением дистанционного зондирования и программного обеспечения Географической информационной системы (ГИС) GIS;
- оценка возможности применения унифицированного уравнения потерь почвы от эрозии (RUSLE) при построении прогнозов проявления водно-эрозионных

процессов с использованием современных ГИС-систем (ArcGis 10) и анализе изображений Landsat 8;

- разработка цифровых картограмм района Тхань Чуонг на основе эмпирических параметров RUSLE;

- разработка комплекса противоэрозионных мер, основанных на иерархии факторов модели RUSLE лесохозяйственных и агротехногенных ландшафтов.

Объект исследования. Эродированные почвы и системы землепользования в районе Тхань Чуонг провинции Нгеан Социалистической Республики Вьетнам.

Предмет исследования. Оценка эрозии почвы в условиях тропических муссонов за 2010 - 2021 гг.

Научная новизна. Новизна выполненной нами работы заключается в том, что впервые в условиях тропических муссонов представлены характеристики эрозии почв, уровни иерархии, влияния и выявлены взаимосвязи факторов от изменения комплекса климатических, метеорологических, топологических, орографических параметров. Проведена комплексная оценка географического распространения эрозии почвы, основанная на применении интегрированных моделей GIS, RS и RUSLE, анализе систем землепользования и верификационных полевых моделей. Это позволило впервые разработать комплекс противоэрозионных мер на их основе для территории района Тхань Чуонг провинции Нгеан Социалистической Республики Вьетнам, которые способствовали устойчивому снижению факторов эрозии.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Факторы, влияющие на эрозию почв;
2. Результаты дистанционного зондирования с использованием программного обеспечения Географической информационной системы (ГИС) GIS;
3. Результаты оценки эрозии почв на основе изображений Landsat 8 для определения эмпирических параметров RUSLE;
4. Комплекс мер, направленных на снижение эрозии почвы в условиях тропических муссонов.

Достоверность результатов исследований подтверждается значительным объёмом накопленных экспериментальных данных, полученных в результате выполнения опытов с применением систем дистанционного зондирования и программного обеспечения Географической информационной системы (ГИС) GIS, определением эмпирических параметров модели RUSLE для оценки степени эрозии почв на основе изображений Landsat 8, современных способов статистического и математического анализа, положительными результатами апробирования разработанной технологии, достигнутыми в производственных условиях, и публикаций основных положений диссертации.

Теоретическая значимость исследования. Дается обоснование возможности использования GIS технологии, дистанционного зондирования и применимости RUSLE модели для оценки и расчета параметров эрозии почвы в районе тропических муссонов в районе Тхань Чуонг, провинция Нгеан (Вьетнам).

Практическая значимость. Определены тенденции изменения климатических параметров и обеспеченности основными метеорологическими

элементами в географических зонах влияния тропических муссонов районов Центрального Вьетнама;

Установлены уровни иерархии, влияния и взаимосвязи факторов, определяющие развитие водно-эрозионных процессов почв в условиях тропических муссонов, для проведения комплексной оценки эрозии почвы и ее географического распределения;

Разработана методология проведения комплексной оценки эрозии почвы и географического распределения, основанная на применении интегрированных моделей GIS, RS и RUSLE, анализе используемых систем землепользования и верификационных полевых моделей;

Выявлены взаимосвязи эрозионной устойчивости почв лесохозяйственных и агротехногенных ландшафтов, систем землепользования и фитомелиоративной способности растительного покрова;

Составлена цифровая карта интенсивности водно-эрозионных процессов ландшафтов и слои картографии распределения основных факторов;

Разработан комплекс практических мер борьбы по снижению эрозии почв, ориентированных на устойчивое развитие лесохозяйственных и агроландшафтов.

Методология и методы исследований.

В основу теоретико-методологической части исследований положены общепринятые методы планирования и проведения опытов, а также лабораторные исследования. Планирование и проведение исследований включает мета-анализ данных по литературным научным источникам. При проведении исследований применялся системный подход.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, выборе методик проведения полевых опытов, обработке и анализе результатов исследований, подготовке публикаций, диссертационной рукописи и автореферата, выводов и предложений производству.

Доля личного участия в выполнении исследований, положенных в основу написания диссертации, составляет более 85 %.

Научные публикации. По материалам исследования диссертации опубликовано 6 статей в журналах из базы данных Скопус и 1 статья - в журнале из других рецензируемых баз.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 141 страницах компьютерного текста. Состоит из введения, четырех глав, содержит 8 таблиц, 19 рисунков, 4 приложения. Список использованной литературы включает 123 источника, в том числе 110 зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы исследований и степени ее разработанности, приведена научная новизна, теоретическая и практическая значимости, представлены цель и задачи исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, показаны степень достоверности результатов исследования и их апробация.

В первой главе представлен обзор научной литературы по эрозии почв, проведен анализ основных факторов, ее определяющих.

Обосновано, что эрозионные процессы почв представляют собой явления перемещения почвы посредством дождевой воды или ветра под действием силы тяжести на поверхности почвы. Показано, что высокие вероятности и максимальные скорости эрозии почвы наблюдаются на территориях с сильным изменением рельефа, горельефом и склонами в условиях интенсивных и продолжительных обильных осадков в период муссонов (Vijith, H., 2012). Указано, что климатические условия в тропических регионах являются основным фактором, определяющими эрозионную активность на склонах, интенсивность оползней в гористой местности. Наблюдаемость случайного характера осадков и неоднородности коренных пород, накладывают ограничение на применение методов анализа эрозионной устойчивости ландшафтов, разрабатываемых преимущественно для нетропических (немуссонных) районов (Nagarajan, R., 2000). Результаты мета-анализа литературных данных позволили типизировать и выделить основные факторы, определяющие эрозию почвы в географических зонах влияния муссонов: климат, топография, почва, растительность и деятельность человека, положенны в основу применимости инструментария проводимых исследований (рис. 1).



Рисунок 1. Основные факторы, определяющие эрозию почвы

Изучена проблема оценок эрозионных потерь и применимость большого количества различных подходов и методов исследования в глобальном масштабе. Обосновано применение сочетания RS, GIS и RUSLE методов для проведения комплексной оценки эрозии почвы и ее географического распределения для более крупных районов с большей точностью при приемлемых затратах. Выведена преимственность выбора модели оценки эрозии почвы на основе доступности проводимых анализов, минимального количества набора исходных данных для

создания картограмм, применяемых подходов и методов в зависимости от конкретных условий и целей.

В результате аргументирован методологический подход, отражающий взаимосвязи и иерархии факторов, предлагаемый для проведения комплексной оценки и географического распределения эрозии почвы в условиях тропических муссонных районов Центрального Вьетнама, заключающийся в оценке эрозии почвы с применением интегрированных моделей GIS, RS и RUSLE и разработке мер на его основе, направленных на предотвращение потерь почвы и деградации земли.

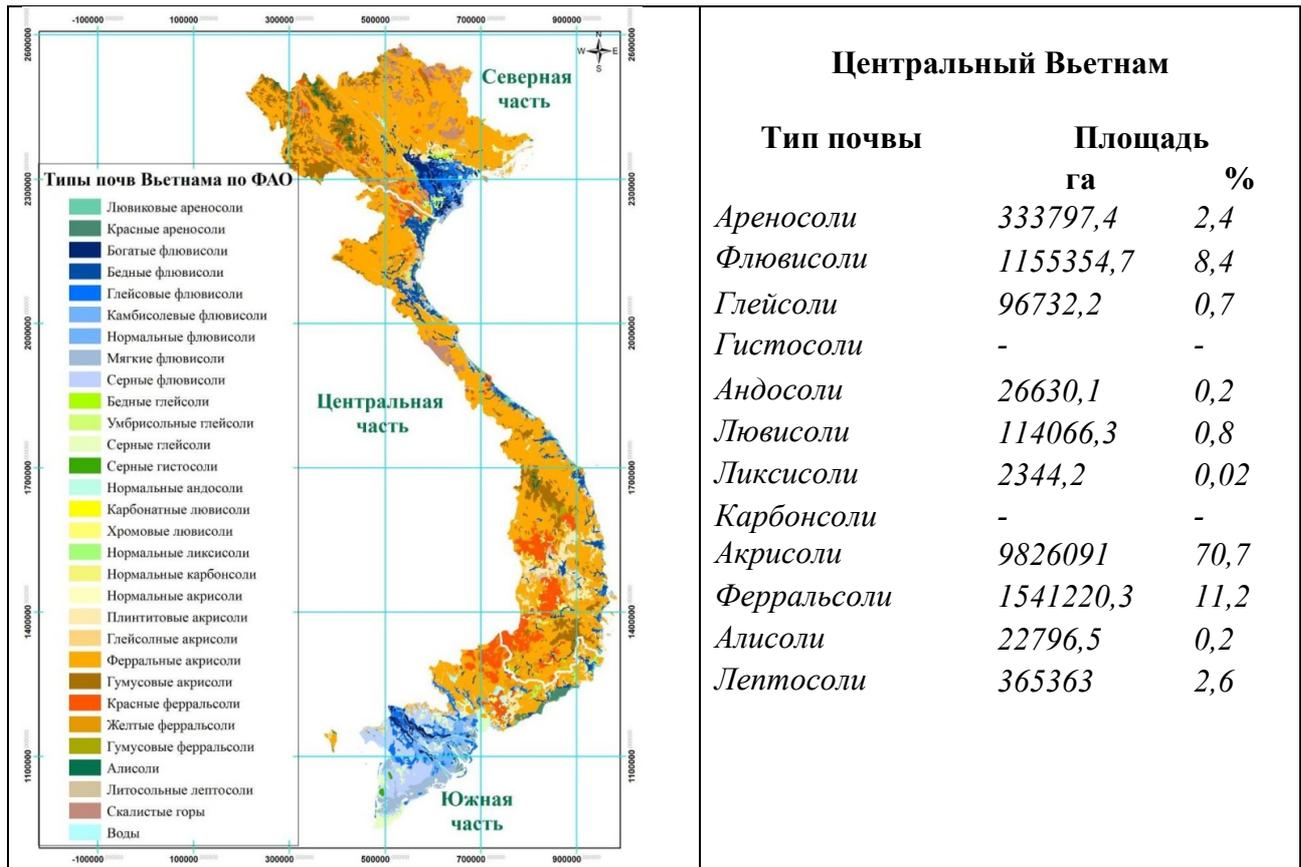
Во второй главе отражены природно-климатические характеристики района Тхань Чуонг, приведены объекты и методы исследований.

Район Тхань Чуонг расположен в центральном Вьетнаме и находится под влиянием тропических муссонов, определяющих особенности агроклиматических условий возделывания лесотехнических и сельскохозяйственных культур. Отмечаемые суровость климата и наличие штормов и юго-западного ветра (фена) оказывают лимитирующее влияние на инфраструктурно-экономическое развитие территории, особенно, на агропромышленное производство. Годовые сезоны являются четко выраженными: выделяется жаркое и влажное лето с большим количеством дождей и относительно холодная зима с небольшим количеством дождевых осадков. Район характеризуется по обилию и интенсивности дождей. Количество атмосферных осадков изменяется от 1800 до 2200 мм в год.

На северо-востоке более половины территории района представляют собой переходную зону между горными районами и равнинами, с низкогорным рельефом и пологими холмами. На юго-западе района расположены высокие горные хребты, проходящие вдоль границы Вьетнама и Лаоса

Почвообразующие породы - осадочные, метаморфические, вулканические, аллювиальные образования. В горных и холмистых районах преимущественно осадочные породы, а на равнинах – аллювиальные. Почвы Вьетнама формируются под воздействием ферралитизации, т.е. накоплением в профиле элементов железа и алюминия. У этих почвы низкие катионообменная и высокую анионная поглотительные способности, очень кислую реакцию, также характерен процесс оглеения. Почвенный профиль имеет красную, пёструю и жёлто-красную окраску. В составе гумуса преобладают преимущественно фульвокислоты, его содержание колеблется от 1 до 10 % (рис. 2.).

Зональными типами почв Центрального Вьетнама являются гуминовые почвы (81,9 %): серая (гумусовые акрисоли) и красно-желтая (гумусовые ферральсоли), аллювиальная почва (флювисоли). Ферралитные почвы используют под посевы риса, плантации кофейного дерева, гевеи, какао, сахарного тростника, масличной пальмы и прочих культур.



**Рисунок 2. Почвенная карта Вьетнама и типы почв Центрального Вьетнама
Материалы и методы исследований.**

Исследования основаны на данных, полученных при проведении анализов спутниковых снимков, GIS, открытых гео-информационных ресурсов, отчетных и статистических данных территориальных органов власти, полевых исследованиях и верификационных моделях.

Спутниковые снимки. Проведены классификация и селекционный отбор снимков дистанционного зондирования и карт пространственно-временного распределения землепользований - Landsat (<https://glovis.usgs.gov>), изображений - Sentinel (<https://scihub.copernicus.eu>) с разрешением в 30 м за период 2000-2021 гг. Коррекция на оптическую прозрачность атмосферы реализована методом приближения спектральных кривых растительности к их действительному спектру. Изображения обработаны с применением программного обеспечения ENVI (версия 4.7) для последующего кластерного и картографического анализов.

Данные GIS. Произведенные первичные расчетные данные цифровой модели рельефа (DEM) были подвергнуты повторному селекционному отбору на основе метода привязки к геооснове; выделенные изображения верифицированы с учетными полевыми точками, и определены критерии соответствия. Цифровые данные GIS, получены в Департаменте природных ресурсов и окружающей среды,

и включают в себя: административную карту, карта текущего землепользования, карту почв.

Статистические и отчетные данные. Отчеты Департамента природных ресурсов и окружающей среды провинции Нгеан, Департамента сельского хозяйства и развития сельских районов провинции Нгеан, Народного комитета района Тхань Чуонг; Статистического ежегодные данные провинции Нгеан и Тхань Чуонг (2020-2024гг).

Полевые исследования и верификационные модели. Проведен сбор, анализ и оценка данных по факторам, способствующих развитию водных эрозионных процессов почв, включающие исследования о видах и параметрах естественных и агрогенных фитоцинозов, параметров почв, системах землепользования.

Метод дистанционного зондирования. Реестр изображений составлен с проведением предварительной обработки, включающий сшивание изображений, выпрямление, фильтрацию и улучшение качества снимка. Метод классификации изображений представлен алгоритмом оценки максимального правдоподобия.

Расчетно-прогнозный метод эрозионных потерь почвы (Модель RUSLE) проведен по унифицированной статистико-математической модели оценки потерь почв от эрозии, основанной на комбинации определяющих ее факторов: агрессивности осадков, смыва почвы, уклона, длины склона, системы землепользования и применяемых противоэрозионных методов.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты мониторинга эрозии почв спутниковыми изображениями

По результатам проведенных исследований нами были отобраны три источника спутниковых изображений: Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, Sentinel 2A, которые представляли наиболее полную информативную характеристику объектов исследований. Этапы исследования, методология и архитектура анализа получения данных представлена на рисунке 3.

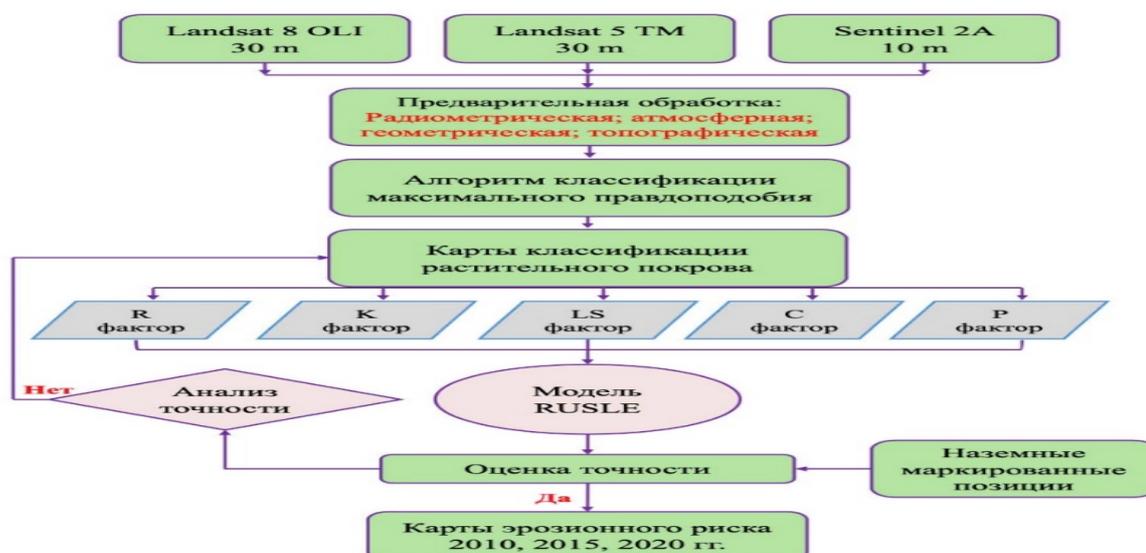


Рисунок 3. Блок-схема процедуры обработки изображений с целью создания карты эрозионного риска

Результаты эрозии почв методом полевых исследований

По результатам полевых исследований были установлены данные об эрозии почвы, включая: (1) при восстановлении природного леса естественными способами; (2) при посадке лесной растительности; (3) под покровом многолетней растительности; (4) под покровом однолетней растительности; (5) под покровом кустарниковой растительности; (6) на участках без растительного покрова. Обследованы три типа сельскохозяйственного угодий: (1) выращивание чайных и цитрусовых деревьев вдоль контурных линий на холмистой местности; (2) совмещение однолетних сельскохозяйственных культур на склоновых землях; (3) возделывание монокультуры на склонах, включая акацию и маниоку. Составлена верификационная оценка эрозии почвы и выделены 5 классов с доказанными уровнями эрозии: очень низкий (0-5 т га¹ в год), низкий (5-10 т га¹ в год), умеренный (10-20 т га¹ в год), высокий (20-50 т га¹ в год), очень высокий (>50 т га¹ в год). Показано, что точки прямых полевых оценок эрозии почвы являются репрезентативными для местной природно-территориальной совокупности факторов и равномерно распределены по всей территории исследования, в связи с чем и был выбран район Тхань Чуонг, провинция Нгеан, Центральный Вьетнам (рис. 4).

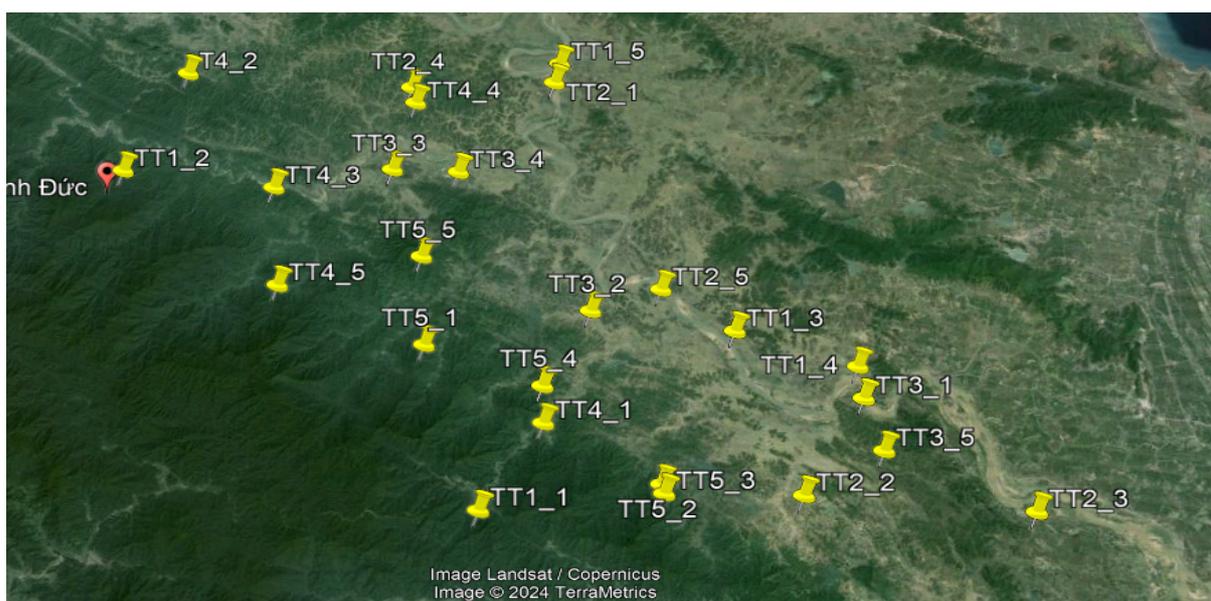


Рисунок 4. Верификационные точки эрозии

Результаты мониторинга эрозии почв методом дистанционного зондирования

Оценку точности классификации методом дистанционного зондирования проводили для каждой карты растительного покрова, она заключалась в маркировке девственных и плантационных лесов, многолетних и однолетних насаждений, других растений и водоемов с использованием полевых чипов для проверки положения точек, отмеченных на земле, с помощью GPS.

Дополнительно, на основе статистических показателей погрешностей было проведено сравнение карт изменения растительного покрова (LCC) за 2010, 2015 и 2021 годы, разработанных с использованием модели RUSLE и реальных точек ground_marked. Общая точность изображений, которая превысила 90 %, стала

свидетельством хорошего баланса между смоделированной моделью и наблюдаемыми данными. Эта проверка продемонстрировала эффективность примененной модели для моделирования потерь почвы на исследуемой территории.

Расчет эрозии почв оптимизированным методом универсального уравнения потери почвы

Оптимизированная нами модель RUSLE построена на основе интеграции пяти факторов: агрессивность осадков, эрозия почвы, уклон, длина склона, вид землепользования и противоэрозионные методы. Универсальное уравнение Модели RUSLE (Renardetal) имеет следующий вид (1):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P, \text{ где:} \quad (1)$$

A – потенциальный смыв почвы, т/га в год;

R – фактор эродирующей способности дождей, годовой коэффициент эрозионной способности дождевого стока, или эродирующая способность дождей (Мегаджоуль*мм/га*час*год*мм); **K** – коэффициент податливости почв эрозии ландшафта (т*га*час/га.Мегаджоуль*мм); **L** – фактор длины склона (безразмерный); **S** – фактор крутизны склона (безразмерный);

C – фактор растительности и севооборота (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1); **P** – фактор эффективности противоэрозионных мероприятий (безразмерный, изменяющийся от 0 до 1).

R-фактор, интерполируют согласно уравнению, исчисленного с применением подхода Ушмеера-Смита (2):

$$R = 79 + 0,363 \times X_a, \text{ где: } X_a \text{ – среднегодовое количество осадков (мм)}. \quad (2)$$

K-фактор, определяют из уравнения, рассчитанного по методу Römken в модификации Ренарда (3):

$$K = 27.66 \times 10^{1.14} \times 10^{-8} \times (12 - a) + 0.0043 \times (b - 2) + 0.0033 \times (c - 3), \text{ где:} \quad (3)$$

a – органическое вещество почвы (%);

b – средний относительный диаметр частиц почвы;

c – коэффициент фильтрации воды почвенным профилем, %;

LS-фактор, топографическая функция гидрологического анализа ландшафтов для цифровой модели рельефа исчисляется по уравнению Ganasri-Ramesh (4):

$$LS = \left[\frac{Q_a M}{22.13} \right]^y \times (0.065 + 0.045 \times S_g + 0.0065 \times S_g^2), \text{ где:} \quad (4)$$

Q_a – гид-слой стока потоков, или сетка накопления потока;

M – размер ячейки цифровой модели рельефа;

S_g – растровые уклоны сетки, выраженные в процентах;

y – аппроксимация уклона модели, принимающая значение от 0,2 до 0,5.

C-фактор, определяют на основании таблиц Ganasri-Ramesh, рассчитанных в диапазоне LUMP.

P-фактор, определяется с применением подхода Венера (Wener) по уравнению (5)

$$P = 0.2 + 0.03 \times S, \text{ где:} \quad (5)$$

S – растровые уклоны сетки, выраженные в процентах.

Сравнение карт изменения растительного покрова за 2010, 2015 и 2021 годы по реальным точкам исследуемой местности и данных оптимизированной модели RUSLE выявило точность верификации свыше 90 %. Показано преимущество оптимизированной модели RUSLE, заключающейся в интеграции основных факторов эрозии (агрессивность осадков, эрозия почвы, уклон, длина склона, вид землепользования и противоэрозионные методы) и в простоте проведения преобразования данных DEM в спутниковые изображения.

ГЛАВА 4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭРОЗИЮ ПОЧВ

4.1. Эродирующая способность дождей (R)

Многолетний непрерывный и подробный мониторинг атмосферных жидких осадков определяет достоверность ожидаемых величин коэффициентов годовой эрозии почв (Wischmeier and Smith, 1978). Анализ обеспеченности основными агрометеорологическими элементами территории провинции Нгеан, проведенный по данным сети районных гидрометеорологических станций за 12-летний период, позволил выявить относительно более высокое количество выпадения жидких атмосферных осадков на территории района Тхань Чуонг по сравнению с другими районами провинции. Установлено, что годовое, месячное количество жидких атмосферных осадков, а также интенсивность, экспозиция и частота их выпадения, определяют возникновение и степень развития водных эрозионных процессов почв. Показано, что сумма осадков в районе изменялась в диапазоне от 1800 до 2200 мм в год, при этом выделялись годы как с более (2013, 2017 и 2020 годы), так и менее (2012, 2014, 2016 и 2018 годы) обильными дождями. В среднем частота смены типа лет годовых условий по сумме осадков составила один раз в три года, амплитуда колебаний их количества между годами - 140...150 мм, соответственно. Установлена высокая вариация по количеству осадков в относительно сухие месяцы, в апреле вариативность составила 107 %, а в декабре – 123 %, в отдельные годы суммы месячных осадков в сухой период возрастали более чем в три-четыре раза к их среднемноголетним значениям (табл. 1).

Анализ распределения годового количества осадков позволил выявить закономерности изменения климатических условий: наблюдается возрастание общего количества осадков за 10 лет на 1,4 % к среднемноголетнему, проявление нехарактерных годовых метеорологических условий с повышенной обильностью дождей (12...13 %, соответственно) один раз в шесть лет. Распределение осадков по группам месяцев позволило выделить их цикличное и последовательно кратное возрастание количества к наиболее сухому зимнему периоду январь-февраль, в течение календарного года: период дождей приходится на июль-август (в 8 раз) и наибольшее - сентябрь-октябрь (в 15 раз), формирование закладывается в марте-июне, резкий спад обилия осадков наблюдается в ноябре-декабре. Показано, что для проведения мониторинга, составления прогнозов и расчета оценок потенциального смыва почв требуется непрерывный, подробный ряд данных об атмосферных жидких осадках, с учетом характера климатических, годовых и месячных метеорологических изменений.

Таблица 1. Годовые атмосферные жидкие осадки, 2010-2021 гг. (мм)

Год	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек	Всего осадков
2010	57	12	13	86	80	101	140	743	83	684	28	15	2042
2011	42	12	78	22	126	292	384	172	539	272	77	46	2061
2012	21	27	45	18	399	66	61	293	614	79	185	44	1851
2013	23	17	22	39	104	349	255	225	647	472	66	32	2251
2014	25	32	29	39	89	286	157	356	519	206	66	22	1826
2015	31	28	155	78	78	164	160	266	561	191	126	49	1887
2016	87	18	25	92	61	11	125	179	625	372	206	42	1842
2017	50	11	96	20	346	107	457	298	338	437	37	40	2237
2018	8	52	35	57	79	45	701	158	231	15	171	254	1806
2019	21	20	30	51	81	1	135	186	588	578	139	42	1871
2020	31	24	82	83	102	17	65	289	259	1109	68	18	2148
2021	8	42	56	316	29	188	301	69	613	413	65	25	2124
Всего	404	292	666	902	1575	1627	2941	3234	5616	4827	1234	629	23945
среднее	34	24	56	75	131	136	245	269	468	402	103	52	1995

Картография распределения интерполяции обилия атмосферных осадков и определение коэффициента их эродирующей способности позволили оценить диапазон изменения значений и географический вектор фактора, значимость возрастала с Севера на Юг. Высокие уровни влияния фактора были отмечены соответственно для ландшафтов южных коммун: Тхань Лам, Тхань Суан, Тхань Май, Тхань Тунг, Тхань Йен, Тхань Ха, Тхань Зианг, значение коэффициента изменялось от 0,80 до 0,87, и менее - для ландшафтов северных коммун: Кэт Ван, Тхань Нхо, Тхань Дык, Тхань Хоа, 0,69...0,75, соответственно (рис. 5).

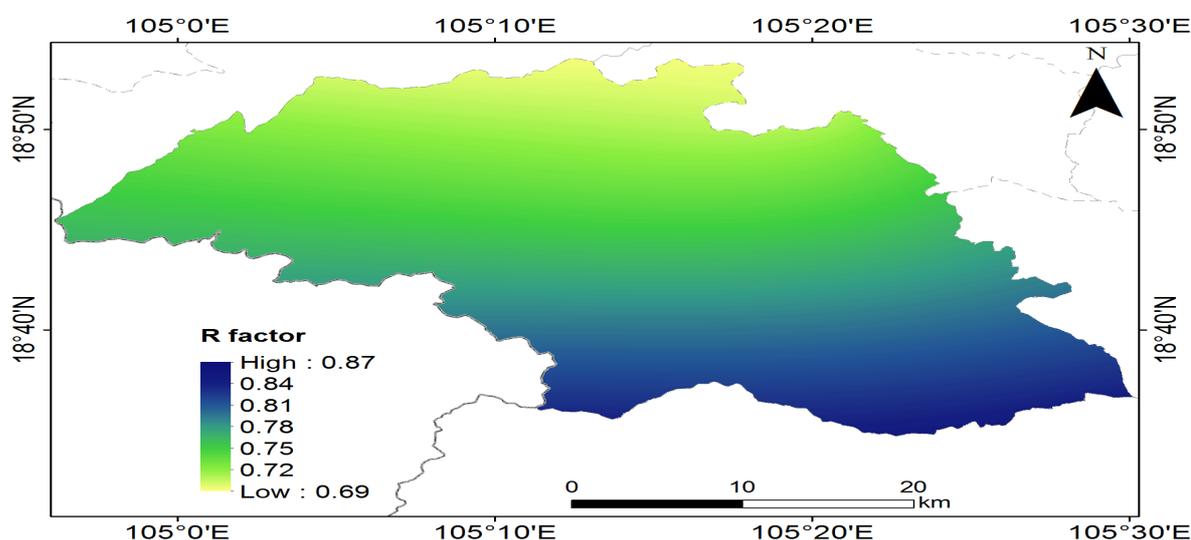


Рисунок 5. Карта дождевой эрозионной активности района Тхань Чуонг

Таким образом, установлено, что вероятности проявления и уровни развития эрозионных процессов зависят от географического положения ландшафтов, количества и интенсивности выпадающих осадков.

4.2. Влияние типов почв на эрозию (K)

Коэффициент потенциальной способности почв к эрозии рассчитывают по уравнению педотрансферной функции почвы, основанной на оценках

гранулометрического состава, скелетности, плотности, порозности почвы, содержания органического вещества, других связанных физико-механических, водно-физических расчетных показателей, и отражает скорость величины потерь почвы от количества атмосферных осадков (Abdo & Salloum, 2017). Анализ картографического распределения эродируемости почв ландшафтов района Тхань Чуонг по уровням варьирования (от 0,017 до 0,02 Мг·ч МДж⁻¹ мм⁻¹) позволил провести ранжирование **почв** коммун по классам значимости фактора (рис. 6).

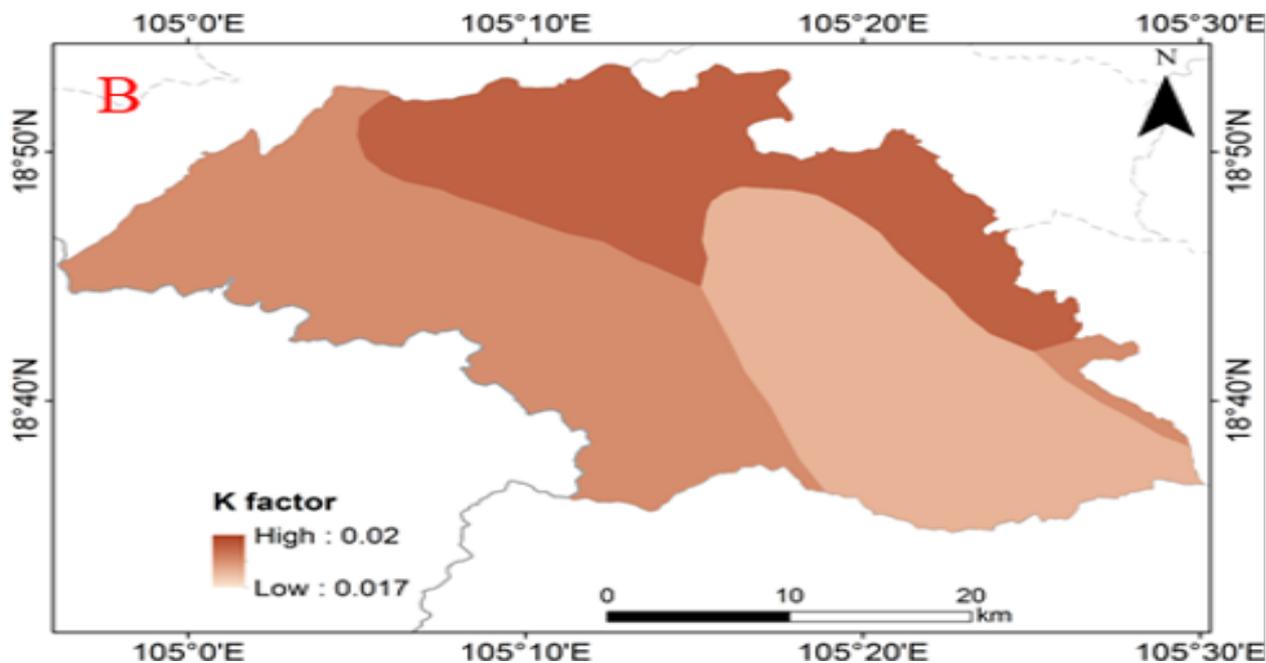


Рисунок 6. Эрозия почвы (К-Фактор) на исследуемой территории

1 класс, представлен ландшафтами с высоким эрозионным потенциалом почв (К-фактор изменяется в диапазоне от 0,019 до 0,02 Мг·ч МДж⁻¹ мм⁻¹), включает преимущественно северные коммуны: Кат Ван, Фонг Тхинь, Тхань Хоа, Тхань Нхо, Тхань Фонг, Тхань Хунг, Тхань Ван;

2 класс, ландшафты, относительно устойчивые к эрозии (К-фактор = 0,018...0,019 Мг·ч МДж⁻¹ мм⁻¹), распространены в восточных коммунах: Тхань Тхуй, Нгок Лам, Тхань Сон, Хань Лам, Тхань Дык;

3 класс, представлен эрозионноустойчивыми ландшафтами (К-фактор = 0,017...0,018 Мг·ч МДж⁻¹ мм⁻¹), преимущественное распространение которых наблюдается в юго-западных коммунах: Тхань Лам, Тхань Суан, Тханьзянг, Тхань Тунг, Тхань Лонг, Во Лиет, Тхань Кхе, Донг Ван, Тхань Чуонг.

4.3. Топографическая функция эродируемости почв ландшафтов (LS)

Вклад топографического фактора ландшафтов в развитие интенсивности водно-эрозионных процессов определяют по оценкам длины прогонов, степени крутизны склонов, распределения, накопления потока воды. Картографический анализ значений фактора позволил установить диапазон вариации значений и выделить последовательные его градации (рис 7).

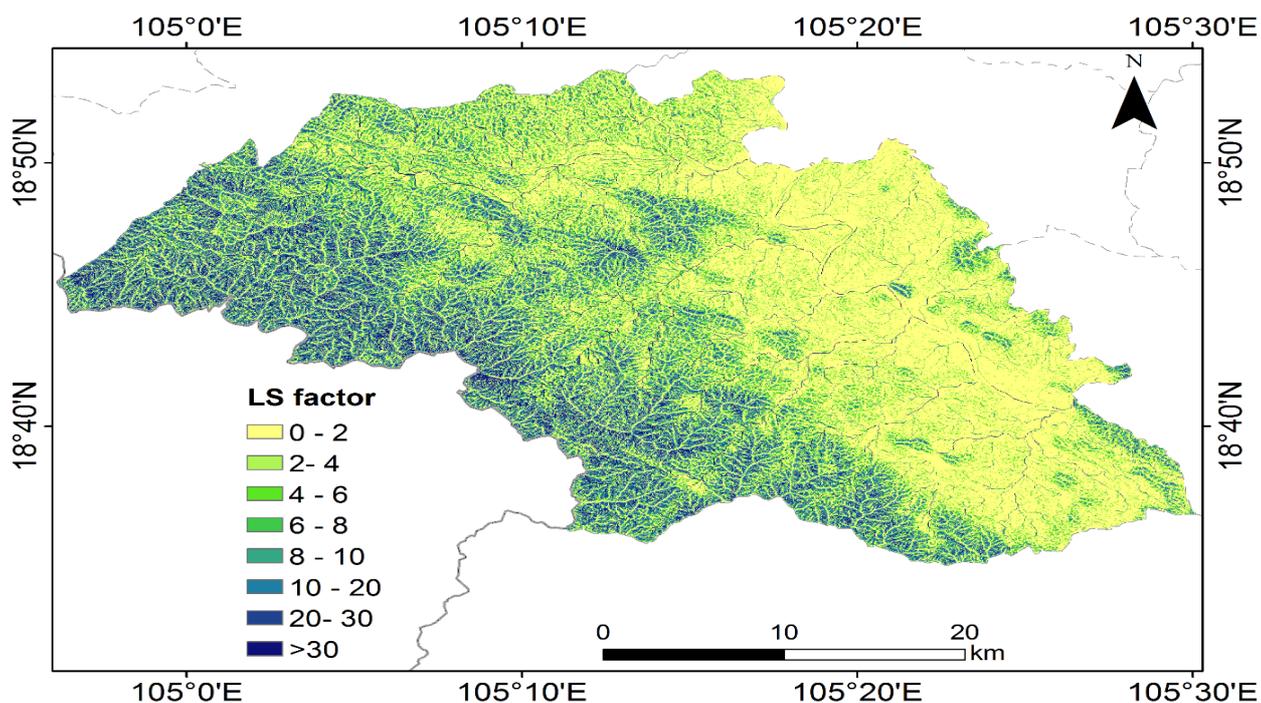


Рисунок 7. LS-коэффициент на исследуемой территории

Выявлено прямое влияние топографического фактора на развитие эрозионных процессов для сложнорельефных ландшафтов с крутыми склонами между антиклинальными складками Юго-Западных коммун: Тхань Ха, Тхань Тхуй, Нгок Лам, Тхань Сон, Хань Лам, Тхань Дык, и слабое - для ландшафтов долины реки Лам восточных областей: Тханьзынг, Тхань Йен, Тхань Тунг, Тхань Лонг, Тхань Зыонг, Суан Туонг, Во Лиет, Тхань Луонг, Нгок Шон.

4.4. Влияние растительного покрова на эрозию почвы (С)

Проведенный анализ ландшафтов по преимущественному типу надпочвенного покрова в период 2010-2021 гг. позволил выделить шесть основных классов. Суммарная доля земель с фитомелиоративным покровом была наибольшей и изменялась незначительно. Вместе с тем структура территориального землепользования претерпела изменения: доля земель с лесохозяйственной системой уменьшилась на 7 % (с 54 % в 2010 году до 47 % - в 2021 году), доля агротехногенных ландшафтных систем возросла на 8 %, с 16 до 24 %, соответственно. В связи с расширением сельскохозяйственного производства и изменением экологической структуры территорий за 12-летний период были определены потенциальные риски эрозионной деградации почвы по средневзвешенному коэффициенту фитомелиоративной противоэрозионной способности каркасов, представленному как обратный С-коэффициент ($F = 1 - C$). В свою очередь, С-фактор определяет эрозионное влияние надпочвенного покрова и систем водо-, лесо-, агрохозяйственного пользования ландшафтов, зависящее как от типа растительности, так и от степени ее развитости и обилия (El-Jazouli e tal., 2017), его определяют из справочных таблиц известного диапазона LUMP (Ganasri & Ramesh, 2016). Анализ фитомелиоративной противоэрозионной способности позволил выявить относительное снижение эрозионной устойчивости каркасов от изменений территориальной структуры

землепользования. Общая устойчивость к эрозии снизилась незначительно (с 11,44 до 10,82...10,90 %), устойчивость в пределах лесохозяйственных систем - значительно (с 26,76 до 23,34 %), смена естественного лесного покрова хозяйственными многолетними древесными насаждениями способствовала ускорению эрозии почвы (табл. 2.).

Таблица 2. Изменение растительного покрова в период 2010-2021 гг.

Тип покрова	Тенденция (%)			Эрозионная устойчивость каркаса, %		
	2010-2015	2015-2021	2010-2021	2010-2015	2015-2021	2010-2021
Лес первичный	-1,86	-2,07	-3,92	33,12	31,26	29,20
Лесопосадки	-2,67	-0,18	-2,85	20,39	17,77	17,59
В среднем				26,76	24,52	23,34
Многолетние насаждения	-1,47	+4,16	+2,68	4,04	2,86	6,18
Однолетние насаждения	+5,24	-0,16	+5,08	3,75	5,58	5,52
В среднем				3,90	4,22	5,85
Вода	+0,12	+0,57	+0,68	0,00	0,00	0,00
В среднем по типам				11,44	10,82	10,90

Картографическое распределение ландшафтов по диапазонам С-фактора, соответствующих почвенному покрову, способствовало типизации и выделению территорий с высокими рисками эрозии ландшафтов в три класса. К коммунам преимущественно с агротехногенными системами земледелия, включающие ландшафты с условно-высокими рисками развития эрозионных процессов, отнесены северной (Кат Ван, Фонг Тхинь, Тхань Хоа, Тхань Нхо, Тхань Фонг, Тхань Хунг, Тхань Ван) и восточной частей (Тхань Тхуй, Нгок Лам, Тхань Сон, Хань Лам, Тхань Дык). Крупнейшим компонентом покрова коммун западной части провинции являются природные леса и лесонасаждения, в связи с чем на территории этих коммун отмечается более низкий уровень эрозии почвы ландшафтов (рис. 8).

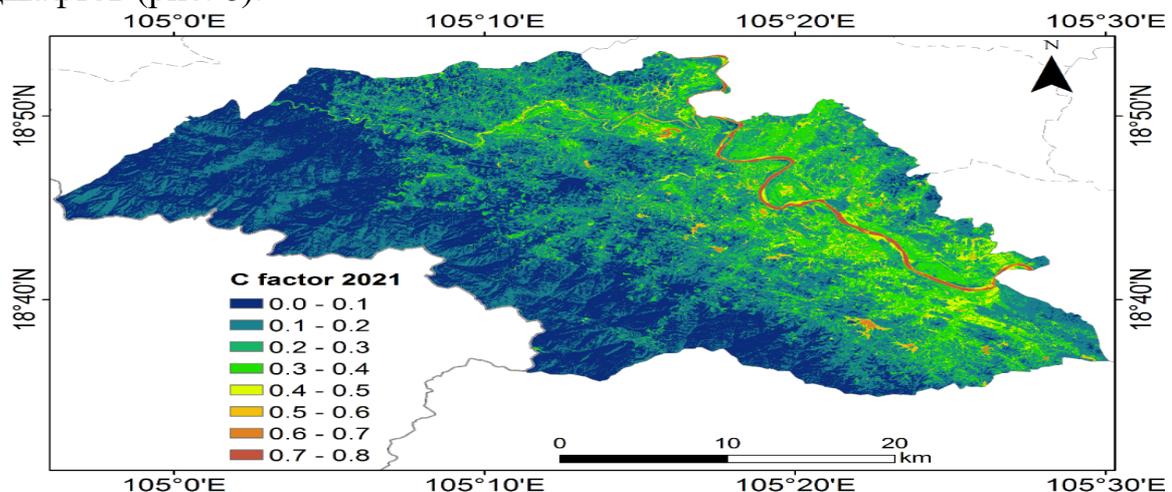


Рисунок 8. Картография распределения С-фактора

4.5. Антропо-агротехногенный фактор эрозии почвы (P)

P-фактор определяет соотношение потерь почвы вследствие развития и интенсификации земледелия на сложнорельефных ландшафтах, эффективности применяемого комплекса противоэрозионных мер. Соответственно, для территорий, где приняты оптимальные решения по сохранению почвы от смыва, ограничивающие объем, скорость стока и способствующие отложению наносов на поверхности склона, обычно наблюдаются минимальные P-значения. Анализ значимости фактора позволил определить типизацию ландшафтов, выделить территории на Западе и Юге, где оценивается наибольший вклад фактора в развитие эрозионных процессов, и отметить постепенное уменьшение доли его влияния к Востоку и Юго-востоку (рис. 9).

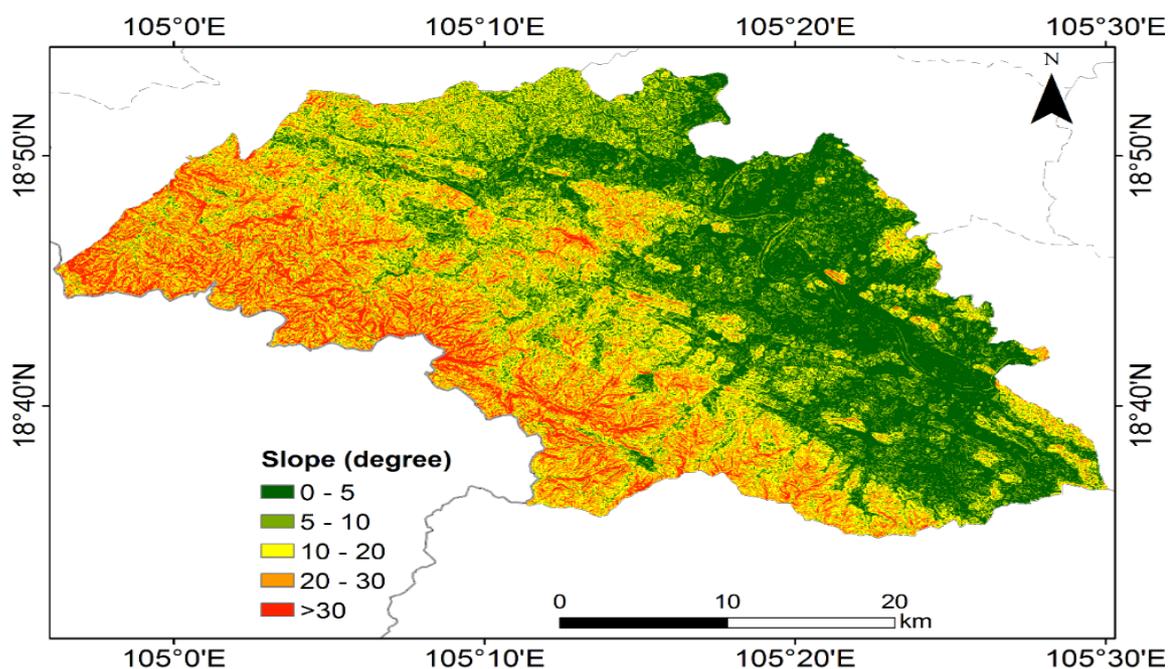


Рисунок 9. Картография распределения значений P-фактора

4.7. Потенциальные риски эрозии почв

Результаты 12-летних исследований позволили оценить потери почвы от водной эрозии в 25 тонн с 1 гектара в год в пределах варьирования показателя от 0 до 50 тонны на 1 гектар в год. Картографическое распределение потерь почв позволило установить, что развитие водно-эрозионных процессов отмечается на всей территории, что связано с текущими изменениями климатических условий и переходом от лесохозяйственных к агротехногенным системам землепользования. Вместе с тем, к ландшафтам с высокой и очень высокой степенью эрозии отнесено около 18 % территории. Районы с высокими уровнями развития водно-эрозионных процессов в основном расположены в Юго-западной и Северо-восточной частях, с преобладанием крутых склонов и высокой интенсивностью осадков. Восточная, Юго-восточная и Северо-западная части характеризуются умеренной степенью развитости эрозионных процессов, что связывается нами с преобладанием пологих склонов и меньшим уровнем интенсивности осадков (рис. 10).

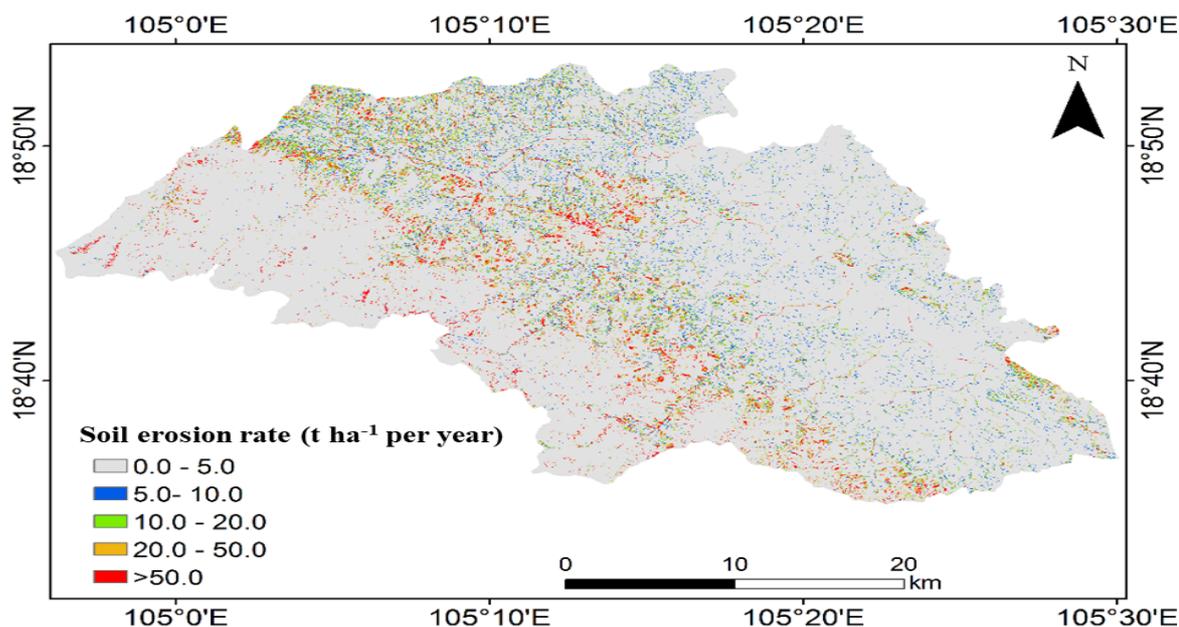


Рисунок 10. Карта эрозии почвы ландшафтов района Тхань Чуонг
4.9. Разработка мер по борьбе с эрозией почв

Землепользование на территории Центрального Вьетнама преимущественно на склоновых землях, занимающих до 80 % площади, они находятся под интенсивным влиянием климатических факторов, поэтому почвы и естественные фитоценозы подвергаются мощной антропогенной деградации. Предлагаем методологию оценки фитомелиоративной противоэрозионной эффективности многолетних лесотехнических насаждений на основе учета параметров анизотропии фитоценоза: плотности и фитомассы (количество деревьев и их образующей массы на единицу площади) насаждений, а также моделирования поверхностного стока с учетом количества, интенсивности и частоты осадков, почвоудержающей способности фитоценозов. При анализе фитомелиорирующей способности фитоценозов были выявлены положительные количественные связи организации растительных сообществ между числом деревьев, связанных с ними кустарников, системами залужения и внесения органических удобрений, включая сидерацию, и утилизацией атмосферных осадков для снижения интенсивности и скорости развития водно-эрозионных процессов. Нами была проведена разработка комплекса мер, направленных на совершенствование управления системами землепользования в отдельных хозяйствах и на всей территории распространения слабо-устойчивых к водной эрозии ландшафтов, в зависимости от иерархии и доли влияния факторов ее определяющих. На основе картографической модели *RUSLE* распределения ландшафтов по видам эрозионной активности установлены соответствующие им типы землепользований, отвечающие целевой функции баланса неуправляемых вкладов (климат, почва, рельеф) и управляемых (система землепользования, растительность) определяющих факторов. Классификация соотношения вкладов позволила определить 3 динамических класса *RUSLE*:

- 1) Территории устойчивого благополучия лесохозяйственных и агротехногенных систем землепользования, отвечающие условиям:

$C \times P / R \times K \times LS > 1$;

2) Территории относительного благополучия лесохозяйственных и агротехногенных систем землепользования, отвечающие условиям:

$C \times P / R \times K \times LS = 1$;

3) Территории неустойчивого благополучия лесохозяйственных и агротехногенных систем землепользования, отвечающие условиям:

$C \times P / R \times K \times LS < 1$.

На основании предложенной классификации каркасов землепользования были подготовлены рекомендации по разработке противоэрозионного комплекса и проведены оптимизации технологии сохранения почв и производства растениеводческой продукции.

Организация территории склонов, строительство траншей и насыпей. Проектирование системы террас на склонах для создания обрабатываемых площадей снижающих эрозионную силу водного потока. Конфигурация, площадь и размеры обрабатываемых площадей зависит от орографии, экспозиции, разбегов склона с разными уклонами. При наличии большого активного уклона ширина террасы должна составлять 3–4 м; при умеренном уклоне расстояние рекомендуется увеличивать до 5–6 м. В местах со средней мощностью плодородного слоя почв могут быть вырыты трассы вдоль контурных линий. Целью строительства траншей является как предотвращение вымывания почвы, так и уменьшение потока воды в цели увеличения агротехнически значимой доли утилизации и аккумуляции большого количества дождевой воды. Устройство системы траншея - насыпь проводят по горизонтали, траншею выкапывают глубиной около 30 см, ширину насыпи формируют около 50 см и высотой около 30 см (рис. 11.). В условиях пологой холмистой местности рекомендуется типизация в проектировании и организации территории склоновых земель, как эффективной системной меры предотвращения эрозии на обширных территориях. Позитивные результаты от проведения террасирования проявляются быстро, однако их строительство требует значительного вложения материальных и временных ресурсов.

Технологии производства продукции растениеводства на склоновых сельскохозяйственных землях (англ. Sloping Agriculture Land Technology - *SALT*). На основе комплексной технологии сохранения почв и производства растениеводческой продукции, объединяющих различные меры по сохранению почв, были проведена оптимизация типовых моделей *SALT* для агроклиматических и эколого-почвенных производственных условий с учетом систем землепользования.

В условиях землепользований на склоновых ландшафтах для многолетних насаждений рекомендуем применение оптимизированной модели *SALT 1*. В настоящее время чайные плантации на холмах высаживают по контурным линиям, но при этом в междурядьях не производят посев почвопокровных азотфиксирующих культур. С целью оптимизации для чайных плантаций, предлагают формирование уплотняющих кулис из быстрорастущих лесохозяйственных культур, соответствующих особенностям почвы. Кулисы необходимы для создания микроклимата, мульчирования рядов основной

культуры и для получения дополнительной плодосменной продукции - древесины.



Рисунок 11. Холмы с чайными плантациями вдоль контурных линий

Азотфиксирующие деревья высаживают двойными уплотненными рядами, при достижении саженцев 1 метра, ветки обрезают и укладывают их в приствольной полосе для формирования противоэрозионного мульчирующего покрова.

На территориях с преимущественно лесотехническим землепользованием, рекомендуют оптимизированную сельскохозяйственную модель *SALT 3*, где до 40 % земель отводят для ведения сельского хозяйства, объединяющие мелкомасштабные контурные лесонасаждения с производством дополнительной растениеводческой продукции. Таким образом, земли обеспечены эффективной защитой при большем разнообразии производства растениеводческой продукции. Эта модель также представляет собой координацию и расширение разумного планирования сельскохозяйственных культур, где особое внимание уделяется развитию лесов. Данную модель можно применять в одном хозяйстве с относительно большим земельным фондом (около 5 - 10 га) на многих типах местности или в нескольких домохозяйствах одновременно.

На плантациях цитрусовых предлагают к внедрению оптимизацию *SALT 4* – это модель возделывания цитрусовых в сочетании с возделыванием других продовольственных культур. Эта модель имеет большое значение, так как помимо продуктов питания, сюда включена также продукция азотфиксирующих растений, что предотвращает эрозию и улучшает состояние почвы. К преимуществам данной модели также относят расширенное производство товарной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований эрозии почвы по обоснованию возможности использования GIS технологии, дистанционного зондирования и применимости RUSLE модели для оценки и расчета параметров эрозии почвы в районе тропических муссонов в районе Тхань Чуонг, провинция Нгеан (Вьетнам) было установлено:

1. Вероятность эрозии почвы определяют уровнем интенсивности и продолжительности обильных осадков в период муссонов.
2. Степень эрозионной устойчивости ландшафтов определяют уклоном рельефа, параметрами растительного покрова и количеством осадков. При этом высокие темпы потерь почвы связаны с сочетанием несоответствия используемых типов землепользования местным агро-климатическим и метеорологическим условиям, агрофизическими параметрами почвы и особенностями рельефа.
3. Агроэкологическая оценка земель по разработанной карте уровня эрозии показала, что около 18 % территории относят к категориям с высокой и очень высокой степенью проявления эрозии.
4. Среднегодовые потери почвы в горном районе Тхань Чуонг провинции Нгеан, определенные на основе параметров модели RUSLE, составляют 25 т в год.
5. Разработанные меры, ориентированные на борьбу с эрозией на исследуемой территории, включают:
 - определение типа покрова и противоэрозионной эффективности растительности;
 - проектирование строительства траншей и насыпей;
 - тиражирование модели устройства террасных холмов на обширных территориях;
 - разработку и оптимизацию моделей сельского и лесного хозяйства на сильно эродированных землях (модель SALT 1, 3, 4).

Список опубликованных работ по теме диссертации.

Публикации в изданиях, индексированных в базе ScopusofWoS

1. **Nguyen Thi Thuy Ha**. Potential risks of soil erosion in North-Central Vietnam using remote sensing and GIS / **Nguyen Thi Thuy Ha**, Astarkhanova Tamara Sarzhanovna, et al; // Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering, November 2023, Volume 27, N.11, p.910-916 (SCIE Q2)
2. **Nguyen Thi Thuy Ha**. Mapping of soil erosion susceptibility using advance machine learning models at Nghe An, Vietnam / **Nguyen Thi Thuy Ha**, Astarkhanova Tamara Sarzhanovna, Nguyen Quyet Chien, et al// Journal of Hydroinformatics, November 2023, (SCIE Q2)
3. **Nguyen Thi Thuy Ha**. Effect Chemical Charateristic of Soil on Orange Productivity: / Kazuya Takahashi, Nguyen Thi Thuy Ha, et al; //A Case Study of Nghe An Province, Vietnam; Indian Journal of Ecology, August 2020, 607-613 (scopus Q4) ISSN 0304-5250
4. **Nguyen Thi Thuy Ha**. Integrating Remote Sensing, GIS and Machine Learning Approaches in Evaluation of Landslide Susceptibility in Mountainous Region of Nghe An Province / Tran Thi Tuyen, **Nguyen Thi Thuy Ha**, et al; Vietnam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; May 2024, GeoShanghai 2024 – Volume 6.

5. **Nguyen Thi Thuy Ha.** Population dynamics of a *Sonneratia caseolaris* stand in the Lam river estuary of Vietnam: A restoration perspective / Kazuya Takahashi, **Nguyen Thi Thuy Ha**, et al // Landscape and Ecological Engineering, November 2020 (SCIE Q3)
6. **Nguyen Thi Thuy Ha.** Evaluation of Mangrove Ecosystem Importance for Local Livelihoods in Different Landscapes A Case Study of the Hau and Hoang Mai River Estuaries in Nghe An, North-Central Vietnam / Tran Thi Tuyen, **Nguyen Thi Thuy Ha**, et al; // Sustainability Journal, February 2023, Volume 15, Issue 4 (SCIE Q1).

Публикации в других изданиях:

7. **Nguyen Thi Thuy Ha.** Species composition, habitat structure and sedimentation in a *Sonneratia caseolaris* stand at the Lam River estuary /Kazuya Takahashi, **Nguyen Thi Thuy Ha**, et al; Vietnam // The Fundamental and Applied Agriculture (FAA), June 2020, Volume 5 Issue 2, 157-166.

АННОТАЦИЯ

**ОЦЕНКА ЭРОЗИИ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ ТРОПИЧЕСКИХ МУССОНОВ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ**

В данном исследовании приводятся факторы, приводящие к эрозии почвы в условиях тропических муссонов Социалистической Республики Вьетнам, полученные методом дистанционного зондирования с использованием программного обеспечения Географической информационной системы (ГИС) GIS и на основе изображений Landsat 8 для определения эмпирических параметров RUSLE. Результатами исследований установлено:

тенденции изменения климатических параметров и обеспеченности основными метеорологическими элементами в географических зонах влияния тропических муссонов районов Центрального Вьетнама;

уровни иерархии, влияния и взаимосвязи факторов, определяющие развитие водно-эрозионных процессов почв в условиях тропических муссонов, для проведения комплексной оценки эрозии почвы и ее географического распределения;

методология проведения комплексной оценки эрозии почвы и географического распределения, основанная на применении интегрированных моделей GIS, RS и RUSLE, анализе используемых систем землепользования и верификационных полевых моделей;

взаимосвязи эрозионной устойчивости почв лесохозяйственных и агротехногенных ландшафтов, систем землепользования и фитомелиоративной способности растительного покрова;

цифровая карта интенсивности водно-эрозионных процессов ландшафтов и слои картографии распределения основных факторов;

среднегодовая потеря почвы составляет примерно 25 т в год, определяемая уклоном рельефа, параметрами растительного покрова и интенсивностью осадков.

Разработаны мероприятия для борьбы с эрозией почв имеющие важнейшее теоретическое и практическое значение в сельскохозяйственной области для фермеров и политиков исследуемого района, включают:

- определение типа покрова и противоэрозионной эффективности растительности;
- проектирование строительства траншей и насыпей;

- тиражирование модели устройства террасных холмов на обширных территориях;
- разработка и оптимизация моделей сельского и лесного хозяйства на сильно эродированных землях (модель SALT 1, 3, 4).

ABSTRACT

SOIL EROSION ASSESSMENT IN TROPICAL MONSOON CONDITIONS OF THE SOCIALIST REPUBLIC OF VIETNAM

This study presents the factors leading to soil erosion in tropical monsoon conditions of the Socialist Republic of Vietnam, obtained by remote sensing using the Geographic Information System (GIS) software and based on Landsat 8 images to determine the empirical parameters of RUSLE. The results are established:

Climate parameter trends and provision of basic meteorological elements in geographical zones of tropical monsoon influence in Central Vietnam;

Hierarchy levels, influences and interrelationships of factors determining the soil water erosion processes development in tropical monsoon conditions for comprehensive assessment of soil erosion and their geographical distribution;

The methodology for conducting a comprehensive assessment of soil erosion and its geographical distribution based on the application of integrated GIS, RS and RUSLE models, analysis of land use systems applied and verification of field models;

Correlations of erosion resistance of soils in forest and agro-technogenic landscapes, land use systems and phytomeliorative capacity of vegetation cover;

Digital map of intensity of water-erosion processes on landscapes and mapping layers of the main factors distribution;

The average annual soil loss is approximately 25 tons per year and is affected by topography slope, vegetation cover parameters and precipitation intensity.

Soil erosion control measures with important theoretical and practical agricultural implications for farmers and policy makers in the study area have been developed:

- Determination of the type of cover and erosion control effectiveness of vegetation;
- Design and construction of trenches and trench banks;
- Replication of the terraced hill construction model over large areas;
- Development and optimization of agricultural and forestry models on highly eroded lands (SALT 1, 3, 4 model).