АННОТАЦИЯ

на диссертационную работу по теме: «Оценка степени деградации почв юга Казахстана на основе данных дистанционного зондирования Земли и методов машинного обучения» на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D06102 – «Компьютерная инженерия» Атаниязовой Айсулу Саламатовны

Актуальность. Юг Казахстана – один из регионов, где сосредоточена основная часть агропромышленного потенциала страны. Однако в последние десятилетия процесс деградации почв усиливается из-за орошаемого земледелия и экстремальных климатических условий. В частности, такие проблемы, как засоление, эрозия и истощение органического вещества, снижают сельскохозяйственную продуктивность, нарушают баланс экосистемы и угрожают продовольственной безопасности. В этой связи быстрая и точная оценка уровня деградации почв имеет большое значение для эффективного управления природными ресурсами и планирования мероприятий по рекультивации земель. Традиционные методы мониторинга почв, включая полевые исследования, геоботанические оценки и лабораторный анализ образцов почвы, остаются научно обоснованными, но являются трудоемкими, занимают много времени и требуют значительных финансовых затрат. Кроме того, их пространственный охват ограничен, что затрудняет получение всеобъемлющей региональной картины динамики деградации. На больших и неоднородных территориях, таких как южный Казахстан, опора исключительно на наземные наблюдения не позволяет оперативно и систематически отслеживать процессы деградации в различных пространственных и временных масштабах.

Технологии дистанционного зондирования позволяют проводить широкий спектр систематического и комплексного выявления изменений физико-химических свойств почв. Многоспектральные спутниковые и радиолокационные данные обеспечивают высокоточный мониторинг очагов засоления, динамики влажности и состояния растительности. Кроме того, широкое использование алгоритмов машинного обучения позволяет создавать современные, надежные методы прогнозирования и картирования деградации почв, а также выявлять скрытые закономерности в больших объемах данных дистанционного зондирования.

В случае Казахстана количество исследований в этой области ограничено и часто ограничивается региональным уровнем. Поэтому количественная оценка деградации почв в южных регионах Казахстана с использованием данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения имеет научное и практическое значение. Такие исследования будут способствовать улучшению состояния орошаемых земель, обеспечению устойчивого развития сельского хозяйства, а также совершенствованию национальных стратегий землепользования.

При этом Президент Республики Казахстан в своем Послании Народной Республике Казахстан к 2025 году подчеркнул необходимость управления сельскохозяйственными землями с использованием спутникового мониторинга и технологий искусственного интеллекта и поручил создать единую цифровую карту земельных ресурсов. Это подтверждает, что данная тема исследований является приоритетной на государственном уровне. В этой связи оценка степени деградации земель в южном Казахстане с использованием данных дистанционного зондирования и передовых методов машинного обучения является весьма актуальным исследованием, которое будет способствовать обеспечению эффективного использования земельных ресурсов, планированию мер по предотвращению деградации на научной основе и цифровой трансформации отрасли.

Целью исследовательской работы является разработка метода оценки и картирования степени засоленности сельскохозяйственных почв южного Казахстана на основе интеграции полевых измерений с данными дистанционного зондирования.

Задачи исследования:

1. Анализ исходных данных и отбор участков исследования с учетом природных, климатических и хозяйственных условий;
2. Сбор и предварительная обработка данных дистанционного зондирования: получение радиолокационных спутниковых снимков Sentinel-1 (поляризации VH и VV) и оптических снимков Sentinel-2 для выбранных участков;
3. Разработка и обучение моделей машинного обучения для оценки засоленности почв;
4. Оценка точности моделей и сравнительный анализ их эффективности;
5. Составление карт засоленности почв на основе анализа пространственно-временных закономерностей с использованием географических информационных систем (ГИС) для оценки уровня засоленности, с комбинированием спектральных индексов и результатов машинного обучения.

Методы исследования: стандартные статистические методы корреляционного анализа дистанционно-региструемых параметров дистанционного зондирования (NDSI, SI и др.) и наземной информации, методы классификации и регрессии спутниковых данных.

Предмет исследования: текстурные признаки и спектральные индексы, извлекаемые из данных дистанционного зондирования Земли, алгоритмы машинного обучения для численного и пространственного моделирования деградации почв.

Объект исследования: Почвенный покров южных регионов Казахстана и процессы его деградации

Научная новизна полученных результатов: Разработан метод оценки степени засоленности почв на основе геофизических измерений

поверхности Земли и данных дистанционного зондирования среднего и высокого пространственного разрешения.

Положение, выносимое на защиту: Разработан метод численного прогнозирования степени засоленности почв (электропроводности) с разрешением ~10 м на основе данных радара Sentinel-1, оптических данных Sentinel-2 и алгоритмов машинного обучения, откалиброванных с помощью наземных измерений. Комбинация радиолокационных, оптических, рельефных и температурных данных повысила точность картирования засоленных участков примерно на 15% по сравнению с традиционными спектральными индексами.

Практическая значимость исследования: разработанный метод основан на открытых спутниковых данных и пригоден для непосредственного использования в агрорекультивационных и экологических системах мониторинга Казахстана. Карты засоления, полученные с помощью интегрированного метода спутниковых данных, позволяют точно оценивать мелиоративное состояние сельскохозяйственных земель, своевременно выявлять засоленные и деградированные участки. Такой подход облегчает принятие решений, направленных на эффективное планирование ирригационных и дренажных систем, повышение продуктивности почв и рациональное использование природных ресурсов.

Научно-техническая значимость исследования: в результате исследования обоснован метод интеграции данных дистанционного зондирования для прогнозирования степени засоления почв с высокой пространственной точностью. Комбинирование радиолокационных (Sentinel-1) и оптических (Sentinel-2) данных с параметрами рельефа и температуры повысило возможность комплексной оценки процессов засоления. Доказана информативность радиолокационных микротекстурных характеристик (контраст, энтропия) на основе GLCM и определена их надежная связь с показателями электропроводности. Была исследована сравнительная эффективность линейных и ансамблевых методов машинного обучения, и установлено, что даже простые модели (Ridge) могут хорошо работать в условиях ограниченного объема данных.

Надежность научных результатов:

Надежность и достоверность полученных результатов подтверждаются тем фактом, что исследование основано на сочетании полевых измерений и независимых спутниковых данных, а также статистически воспроизводимых процедур проверки модели. В диссертации описан сбор 203 образцов почвы на основных тестовых участках. Электропроводность определялась в лаборатории с помощью цифрового измерителя с использованием стандартизированной подготовки образцов (соотношение почва:вода 1:5, отстаивание в течение 24 часов).

Достоверность методологического подхода повышается за счет открытости цепочки обработки спутниковых данных: использование данных Sentinel-1 SAR (режим IW, продукты GRD), стандартные этапы

предварительной обработки (удаление шума, радиометрическая калибровка, коррекция рельефа, отображение на картографическую проекцию) и создание набора признаков, включающего электропроводность, 16 текстурных признаков GLCM, температуру и параметры рельефа. Для расширения набора ковариат использовались данные о температуре поверхности (MODIS LST) и цифровая модель рельефа.

Статистическая достоверность результатов моделирования подтверждается процедурой множественной перекрестной проверки: в диссертации использовалась рандомизированная перекрестная проверка ShuffleSplit с разделением 80/20 и 200 повторениями для каждого регрессора.

Объединенный набор данных (для всех) показывает значения R^2 до 0,886 для Ridge и 0,859 для LightGBM, при этом RMSE и MAPE соответственно снижаются. Аналогично, для отдельных областей Ridge/LightGBM показывают хорошие значения (например, для Кунаева значения R^2 до 0,894 для Ridge и 0,864 для LightGBM). Эти результаты подтверждают обоснованность предложенного подхода «гетерогенные данные + регуляризация/градиентный бустинг» при ограниченной базе полевых наблюдений.

Что касается интерпретации и результатов валидации, в диссертации отдельно предлагается и используется подход к оценке доли признаков на основе аддитивных аннотаций Shapley (SHAP), который снижает риск моделирования «черного ящика» и повышает достоверность выбора признаков и архитектуры модели.

Связь темы с научно-исследовательскими программами:

Диссертационная работа выполнена в Институте информационных и вычислительных технологий в рамках программы ПЦФ на 2021–2023 годы, государственная регистрация № 0121РК00830 «Космический мониторинг и ГИС для количественной оценки засоленности почв и деградации сельскохозяйственных угодий Юга Казахстана».

Структура и содержание диссертации:

Диссертация состоит из введения, трех основных разделов, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 104 страниц, включая 43 рисунка, 23 таблиц, 40 формул. Список литературы включает 120 наименований.

Первый раздел посвящен обзору отечественных и зарубежных исследований по использованию радиолокационных и оптических данных при оценке засоления почв, а также применению машинного обучения на основе этих данных.

Второй раздел описывает оценку засоления почв на орошаемых территориях южного Казахстана с использованием разнородных данных, что является основным результатом диссертации.

Третий раздел посвящен анализу пространственно-временных закономерностей засоления и состояния растительности на исследуемых территориях на основе оптических данных.

Публикации по результатам исследования:

В международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

1. Amirgaliyev Y., Mukhamediev R., Merembayev T., Kuchin Y., Ataniyazova A. Remote sensing and machine learning algorithms to predict soil salinity in southern Kazakhstan // Discover Sustainability. – 2024. – Vol. 5. – Article 363. – DOI: 10.1007/s43621-024-00594-8.

2. Omarova P., Amirgaliyev Y., Kozbakova A., Ataniyazova A. Application of physics-informed neural networks to river silting simulation // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – Article 11983. – DOI: 10.3390/app132111983.

3. Omarova P., Yang T., Ataniyazova A., Kozbakova A., Yedilkhan D. Assessment of air quality in the urban environment taking into account vegetation and building geometry // Journal of Ecological Engineering. – 2026. – Vol. 27, No. 2. – DOI: 10.12911/22998993/211688.

В изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:

1. Амиргалиев Е., Атаниязова А., Мерембаев Т., Черикбаева Л., Касымова Д. Картирование засоленности почвы юга Казахстана на основе спутниковых изображений Sentinel-2 // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 132, № 3. – С. 194–205. – DOI: 10.52167/1609-1817-2024-132-3-194-205.

2. Амиргалиев Е., Амиргалиева С., Атаниязова А., Нарынов С., Бердибаев Р. Reinforcement learning как технология, позволяющая обеспечить непрерывный мониторинг обширных территорий // Вестник КазАТК. – 2024. – Т. 135, № 6. – С. 255–262. – DOI: 10.52167/1609-1817-2024-135-6-255-262.

3. Ataniyazova A., Merembayev T. Spatiotemporal assessment of soil salinity in irrigated agricultural lands of Kazakhstan using remote sensing // Journal of Problems in Computer Science and Information Technologies. – 2025. – Vol. 3, No. 3. – DOI: 10.26577/jpcsit2025332.

Также, по результатам исследовательской работы было зарегистрировано Свидетельство № 60555 о внесении информации в Государственный реестр прав на объекты, защищенные авторским правом, Республики Казахстан, на тему «Количественная оценка степени деградации почв с использованием машинного обучения и дистанционного зондирования Земли», выданное 4 июля 2025 года.