

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Фылым жаршысы: пәнаралық = Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина: междисциплинарный. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2025. -№ 4 (128). - Р.148-158. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

[doi.org/10.51452/kazatu.2025.4\(128\).2058](https://doi.org/10.51452/kazatu.2025.4(128).2058)

УДК 636.083:528.9(574)

Переводная расширенная статья

Моделирование пространственно-временного распределения плотности пастбищного скота в Казахстане на основе машинного обучения

Кусаинова М.Д.^{1,2} , Коллуро В.³ , Джон Р.^{3,4} , Чен Дж.^{3,4} , Нұрғали Н.Д.¹ ,
Жаппарова А.А.¹ 

¹Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан

²Казахстанско-Немецкий университет, Алматы, Казахстан

³Университет Южной Дакоты, Вермиллион, США

⁴Университет штата Мичиган, Восточный Лансинг, США

Автор-корреспондент: Кусаинова М.Д.: maira.kussainova@kaznaru.edu.kz

Соавторы: (1: ВК) venkatesh.kolluru@coyotes.usd.edu; (2: РД) ranjeet.john@usd.edu
(3: ДЧ) jqchen@msu.edu; (4: НН) nn11@alfred.edu; (5: АА) aigul.zhapparova@kaznaru.edu.kz

Получено: 16.12.2025 **Принято:** 23.12.2025 **Опубликовано:** 30.12.2025

Аннотация

Предпосылки и цель. Казахстан обладает одним из крупнейших пастбищных фондов в Центральной Азии, но эффективное управление этими территориями затруднено из-за нехватки пространственно-детализированных данных о размещении скота. Рост численности мелкого рогатого скота и лошадей, а также давление на пастбищные экосистемы требуют новых подходов к мониторингу. Целью исследования является моделирование пространственно-временного распределения плотности пастбищного скота в Казахстане за 2000-2019 годы с высоким разрешением (1 км²) с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest).

Материалы и методы. В качестве исходных данных использовались районные статистические показатели по численности овец, коз и лошадей, а также 13 социально-экологических факторов. Алгоритм Random Forest применялся для построения годовых карт плотности скота. Пространственные переменные включали климатические, вегетационные, демографические и инфраструктурные характеристики. Валидация модели проводилась по метрикам R2, RMSE и MAE с различными конфигурациями обучающих и тестовых выборок.

Результаты. Разработаны точные карты плотности скота, выявлены «горячие точки» пастбищной нагрузки на юге и юго-востоке Казахстана. Наибольшую точность показала модель с буфером 10 км и выборкой 90:10. Обнаружены значимые тенденции роста плотности скота по результатам анализа Манна-Кендалла и уклона Сенна.

Заключение. Полученные пространственно-временные данные позволяют применять их в управлении пастбищами, аграрной политике, экологическом мониторинге и зооветеринарном планировании. Разработанная методика может быть адаптирована для других регионов с аналогичными условиями.

Ключевые слова: пространственное моделирование; скотоводство; машинное обучение; Казахстан; пастбища; ГИС.

Введение

Животноводство в Казахстане является одним из ключевых видов землепользования, особенно в засушливых и полузасушливых зонах, охватывающих большую часть территории страны. Отрасль играет важную роль в обеспечении продовольственной безопасности, занятости сельского населения и устойчивом использовании природных ресурсов. Согласно последним

данным, в стране насчитывается свыше 20 млн овец и коз, а численность лошадей превышает 3,5 млн голов [4, 5]. Рост спроса на животноводческую продукцию в странах Центральной Азии, включая Казахстан, сопровождается увеличением антропогенной нагрузки на пастбища. Пастбищные экосистемы выполняют критически важные функции – поддержание плодородия почв, накопление органического углерода [1], предотвращение эрозии и обеспечение биоразнообразия. Однако чрезмерный выпас, климатические изменения и фрагментация ландшафтов ведут к деградации земель [2], снижению продуктивности и потере экосистемных услуг [3].

Более 70% земель Казахстана подвержены риску опустынивания. При этом официальная статистика по поголовью скота доступна лишь на уровне районов, что ограничивает возможность пространственно точного мониторинга. Глобальные продукты, такие как Gridded Livestock of the World (GLW), используют агрегированные административные данные и обладают низким пространственным разрешением (10 км), что затрудняет их применение в условиях высокой гетерогенности [6].

В этих условиях особенно актуально создание высокоточных карт плотности скота с разрешением 1 км², которые позволяют отслеживать пространственные и временные изменения, идентифицировать зоны перегрузки и оптимизировать управление пастбищами. Для этого целесообразно использовать современные методы машинного обучения и пространственного анализа, интегрируя экологические и социальные факторы.

Целью настоящего исследования является построение пространственно-временной базы данных плотности мелкого рогатого скота и лошадей на территории Казахстана за 2000–2019 годы с применением модели Random Forest (RF) и официальной статистики на уровне районов для поддержки аграрной политики, оценки пастбищной нагрузки и планирования ветеринарных и ресурсных мер. В качестве предикторов использовались климатические, вегетационные, демографические, инфраструктурные и топографические данные.

Предлагаемая работа представляет собой научную адаптацию англоязычной статьи, опубликованной в журнале *Scientific Data* [6]. В отличие от оригинала, русскоязычная версия дополнена: (1) интерпретацией результатов в контексте аграрной политики Казахстана; (2) уточнением пространственных особенностей пастбищного землепользования в административных границах; (3) адаптацией терминологии и формата к требованиям отечественных изданий. Также представлены предложения по применению модели в зоосанитарном планировании и управлении пастбищами. Публикация осуществляется с согласия правообладателей в рамках лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International.

Материалы и методы

Объектом исследования в данной работе выступают пастбищные угодья Казахстана, которые занимают значительную часть территории страны и играют ключевую роль в обеспечении кормовой базы для животноводства (рисунок 1). В условиях роста поголовья МРС и лошадей, особенно после 2000 года, актуальными становятся вопросы пространственного распределения скота и устойчивого управления пастбищами. В условиях ограниченной доступности открытых данных о размещении скота на уровне сельских населённых пунктов и усиливающегося антропогенного давления на пастбища, особенно важно создание сетевых карт плотности скота с высокой пространственной детализацией. Для построения такой базы использовались официальные статистические данные о численности овец, коз и лошадей по районам за 2000–2019 годы, предоставленные Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Модель RF использовалась для того, чтобы распределить данные о численности скота по территории с шагом 1 км², учитывая социальные и экологические условия. В качестве обучающей выборки были выбраны 2000 населённых пунктов (по 10 на каждый район) с наибольшим населением, что позволило использовать их как прокси-точки размещения скота.

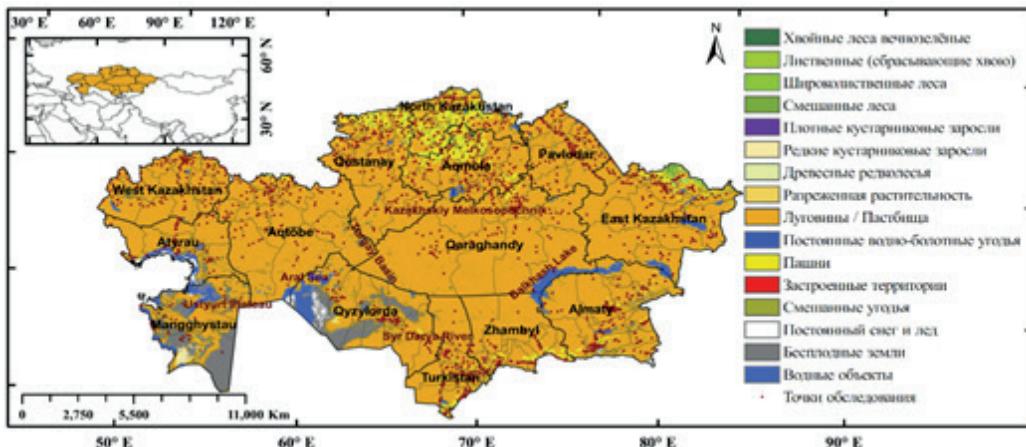


Рисунок 1 – Карта землепользования Казахстана (2020 г.) с точками выборки и границами [6]

Как видно из схемы на рисунке 2 и данных таблиц 1, всего в модели использовались 13 предикторов (переменных), отражающих продуктивность растительности (NPP – чистая первичная продуктивность; LAI - листовой индекс площади), климатические условия (осадки, температура, солнечная радиация), рельеф, плотность населения, ночное освещение и удалённость до воды и поселений.

Таблица 1 – Список предикторов, использованных в модели RF, с указанием источника, пространственного разрешения и единиц измерения

№	Название переменной	Источник данных	Пространственное разрешение	Единицы измерения
1	NPP (чистая первичная продуктивность)	MODIS MOD17A3HGF	1 км	гС/м ² /год
2	LAI (листовой индекс площади)	CHELSA / FLDAS	500 м	м ² /м ²
3	Осадки (Precipitation)	CHELSA / FLDAS	1 км / 10 км	мм/год
4	Температура (Temperature)	CHELSA / FLDAS	1 км / 10 км	°C
5	Радиация (Solar radiation)	FLDAS	10 км	Вт/м ²
6	VPD (дефицит давления пара)	FLDAS	10 км	кПа
7	Влажность почвы (Soil moisture)	FLDAS	10 км	м ³ /м ³
8	Глубина снежного покрова (Snow depth)	FLDAS	10 км	мм
9	Высота (Elevation)	SRTM / GMTED2010	1 км	м
10	Расстояние до поселений	OSM, Bing, Google, Yandex (вручную)	-	км
11	Плотность населения	WorldPop	1 км	чел/км ²
12	Ночное освещение	DMSP/OLS или VIIRS	1 км	световой поток (отн. ед.)
13	Расстояние до воды	JRC Global Surface Water	30 м / 300м	км

Пространственные данные получены из открытых международных источников (MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; CHELSA – Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas; FLDAS – Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System; WorldPop – World Population datasets; DMSP – Defense Meteorological Satellite Program) и агрегированы с использованием платформы Google Earth Engine (GEE). Особое внимание уделялось корректной геолокации населённых пунктов – с верификацией по спутниковым снимкам и национальной переписи.

Модель RF была реализована в программной среде R версии 4.0.3 с использованием следующих библиотек: randomForest, caret, dplyr, mgcv, MLmetrics, trend, Kendall, SpatialEco, iml [7].

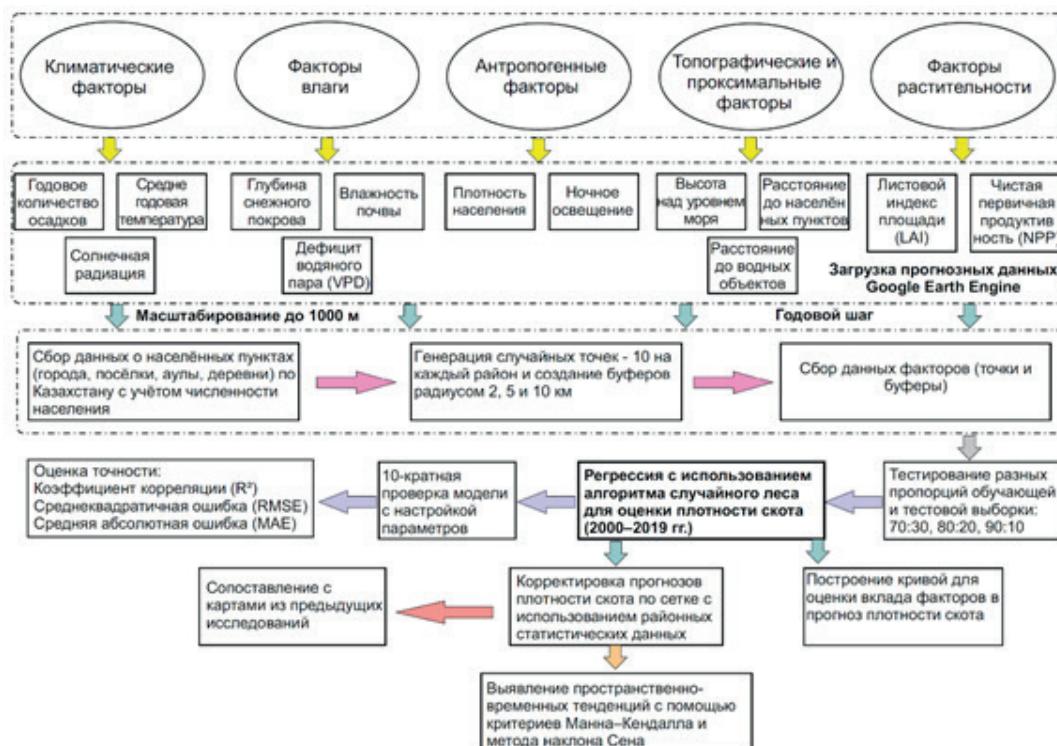


Рисунок 2 – Схема прогнозирования плотности скота в Казахстане (2000-2019 гг.)

Основные гиперпараметры модели: количество деревьев (ntree) варьировалось от 1000 до 3000 с шагом 500, в результате чего была выбрана наилучшая конфигурация по минимальному значению RMSE (среднеквадратичная ошибка); максимальная глубина – не ограничена (default); критерий разбиения – средняя абсолютная ошибка (MAE).

Для оценки качества модели использовалась 5-кратная кросс-валидация (k-fold cross-validation) с перемешиванием данных и фиксированным seed для воспроизводимости результатов. Модель изучалась и тестировалась с использованием буферных зон (2 км, 5 км и 10 км) и разных соотношений обучающей и тестовой выборки (70:30, 80:20, 90:10). Оптимальные параметры (буфер 5 км и 80:20) определялись по значениям R^2 (коэффициент детерминации), RMSE и MAE. Анализ тенденций изменения плотности скота проводился на уровне пикселей с применением критерия Манна–Кендалла и уклона Сена, а также с использованием анализа значимости переменных. Финальные карты Livestock Density Maps – карты плотности скота (LSKD) были откорректированы в пределах каждого района, чтобы обеспечить соответствие суммарных значений официальной статистике.

После получения предсказанных карт плотности МРС и лошадей на основе модели RF была выполнена корректировка этих данных для согласования с официальной статистикой. Необходимость этой процедуры обусловлена тем, что алгоритмы машинного обучения могут давать расхождения между суммарной плотностью скота на уровне района и фактическими значениями, представленными в сельскохозяйственной переписи. Корректировка осуществлялась

путём масштабирования значений на уровне каждого пикселя по следующей формуле: $Adj_i = P_i \times \left(\frac{O_j}{\sum P_j} \right)$. Где: Adj_i – скорректированное значение плотности для пикселя i ; P_i – исходное предсказанное значение для пикселя i ; O_j - общее количество голов скота, зафиксированное в официальной статистике для района j ; $\sum P_j$ -сумма всех предсказанных значений пикселей внутри района j . Масштабирование обеспечивает согласование суммарных значений модели с официальной статистикой по каждому району. Некорректные значения, возникающие при масштабировании, были приведены к нулю. Значения, превышающие верхний quartиль распределения в пределах района (экстремальные выбросы), были обрезаны (обрезка по пороговому значению). Это обеспечило реалистичное пространственное распределение, исключило искажения, связанные с переобучением модели, и повысило достоверность карт для прикладного использования.

Данные значения, полученные в результате моделирования, были приведены в соответствие с официальными данными, что обеспечило точность распределения скота в пространственном выражении и возможность дальнейшего анализа тенденций.

Все результаты представлены в виде растров с пространственным разрешением 1 км² и времененным охватом 2000-2019 гг. База данных доступна для свободного скачивания в репозитории figshare, что делает её полезной для дальнейших исследований, планирования пастбищной нагрузки и оценки устойчивости агрокосистем.

Результаты и обсуждение

В результате применения модели RF были получены высокоточные оценки пространственно-временного распределения плотности овцы и козы (МРС) и лошадей по территории Казахстана с пространственным разрешением 1 км² за период 2000-2019 гг. На этапе валидации модели использовались различные сочетания пропорций обучающей и тестовой выборок (70:30, 80:20, 90:10), а также буферные расстояния от населённых пунктов (0, 2, 5 и 10 км).

Таблица 2 – Оценка точности модели RF при прогнозировании плотности МРС в 2015 году

Расстояние буфера	Кросс-валидация			Независимое тестирование		
	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
Те же точки						
70–30	70	0.49	17.29	84.17	0.48	20.93
80–20	65.3	0.59	16.74	87.21	0.29	19.29
90–10	68.96	0.63	17.08	50.29	0.21	14
Буфер 2 км						
70–30	52.22	0.51	13.4	62.96	0.7	12.35
80–20	61.09	0.51	14.46	22.98	0.59	8.65
90–10	57.13	0.54	13.13	20.33	0.68	8.38
Буфер 5 км						
70–30	49.55	0.6	11.26	30.2	0.33	7.09
80–20	45.63	0.62	9.9	35.77	0.25	7.9
90–10	44.07	0.6	9.3	35.67	0.38	7.22
Буфер 10 км						
70–30	21.11	0.62	5.84	11.13	0.79	4.74
80–20	19.45	0.67	5.4	12.68	0.73	4.94
90–10	17.53	0.76	4.87	11.75	0.82	4.74

Оценка точности проводилась с использованием метрик RMSE, MAE и R² – как для независимого теста, так и для кросс-валидации. Наилучшие результаты были достигнуты при буферном расстоянии 10 км и соотношении обучающей и тестовой выборок 90:10: в этом случае наблюдались минимальные значения RMSE и MAE, а также максимальное значение

R2, что указывает на высокую достоверность модели (таблица 2). Данные параметры были использованы для последующего моделирования плотности скота по всей территории страны во всех исследуемых годах.

Построенные карты показали устойчивые пространственные различия в размещении скота. Наибольшие значения плотности как мелкого рогатого скота, так и лошадей приходятся на юг и юго-восток страны, в частности на Туркестанскую, Жамбылскую и Алматинскую области. Средняя плотность отмечена в Северо-Казахстанской, Акмолинской и Западно-Казахстанской областях. Эти данные визуализированы на рисунке 3, где отчётливо видно, что плотность животных тесно связана с размещением населённых пунктов. На рисунке 4 представлена карта плотности МРС за 2015 год, рассчитанная на основе модели RF с оптимальными параметрами. Чёрные рамки обозначают шесть демонстрационных зон с увеличенными участками, отражающими характерные пространственные закономерности.

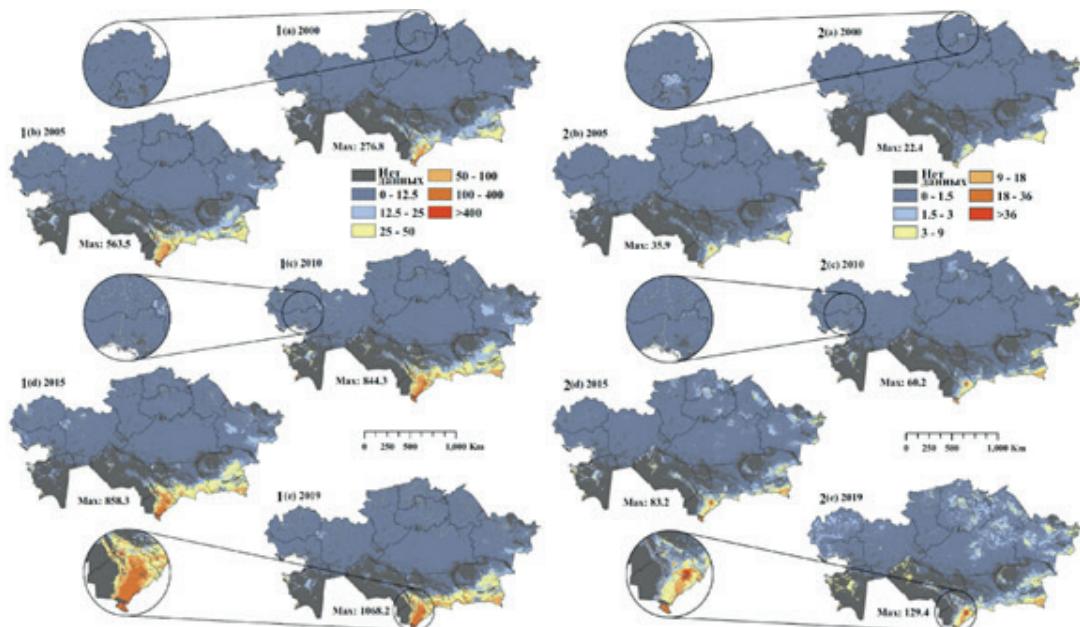


Рисунок 3 – Пространственное распределение оценочной плотности МРС (1а–1е) и лошадей (2а–2е) в Казахстане за 2000-2019 гг.

Красные рамки демонстрируют положение 7234 населённых пунктов, данные о которых были получены и откорректированы на основе различных геоинформационных источников – OSM, Bing, Google, Yandex, национальных переписей, административных карт и Wikipedia.

Анализ пространственно-временных тенденций с использованием критерия Манна–Кендалла и наклона Сенна выявил устойчивый рост плотности скота на большей части территории Казахстана в период с 2000 по 2019 год, особенно в южных (Туркестанская, Жамбылская) и северо-восточных (Павлодарская, Северо-Казахстанская, Акмолинская) областях. На рисунке 5 показаны значения коэффициента Tay Кендалла и уклона Сенна для МРС и лошадей. Отдельные локальные участки со слабо выраженным отрицательными трендами были зафиксированы в Карагандинской, Кызылординской, Алматинской и Актюбинской областях.

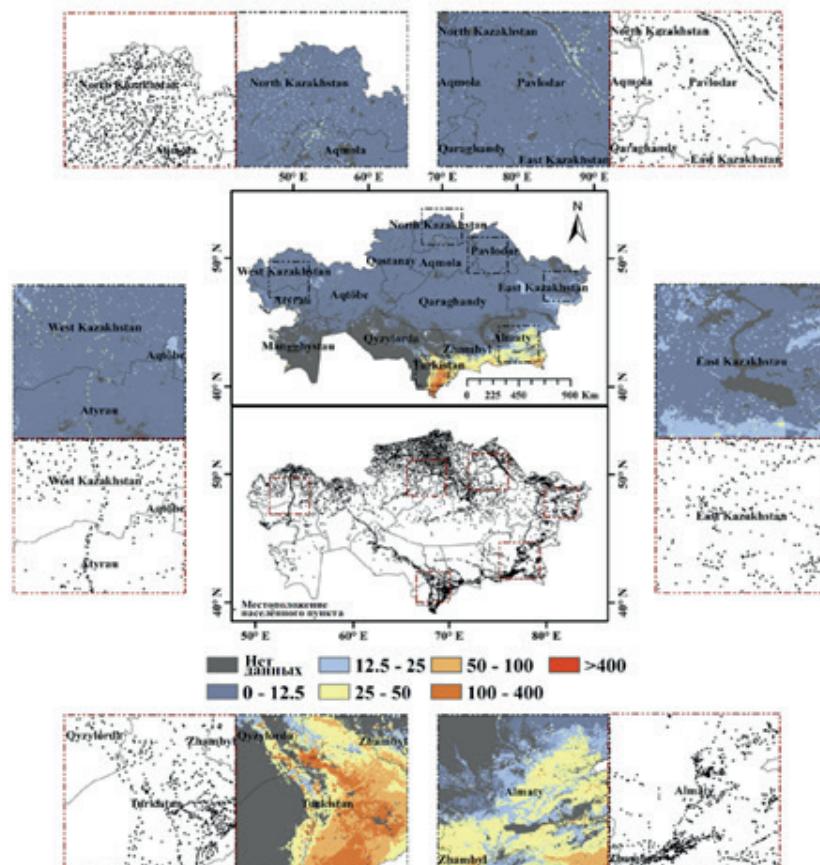


Рисунок 4 –Пространственное распределение оценочной плотности МРС в Казахстане за 2015 год по модели RF (вариант 90:10, буфер 10 км)

Такие зоны могут указывать на локальное сокращение пастбищной нагрузки или особенности ведения хозяйства. Для проверки достоверности полученных результатов модели плотности скота (LSKD) были сопоставлены с данными GLW за 2010 и 2015 годы, а также с картами интенсивности выпаса (off-take rate). Несмотря на совпадение общей пространственной структуры (с наибольшей плотностью в южных и юго-восточных регионах), модель продемонстрировала значительно более высокие значения плотности скота по сравнению с GLW. Например, максимальная плотность МРС по нашей модели составила 844,3 голов/км² (2010) и 858,3 голов/км²(2015), тогда как в GLW эти значения составили всего 167,5 и 164,6 голов/км² соответственно. Аналогично, для лошадей предельные значения в нашей модели достигали 60,2 (2010) и 83,2 (2015) голов/км², в то время как в GLW – только 7,4 и 6,6 голов/км² соответственно.

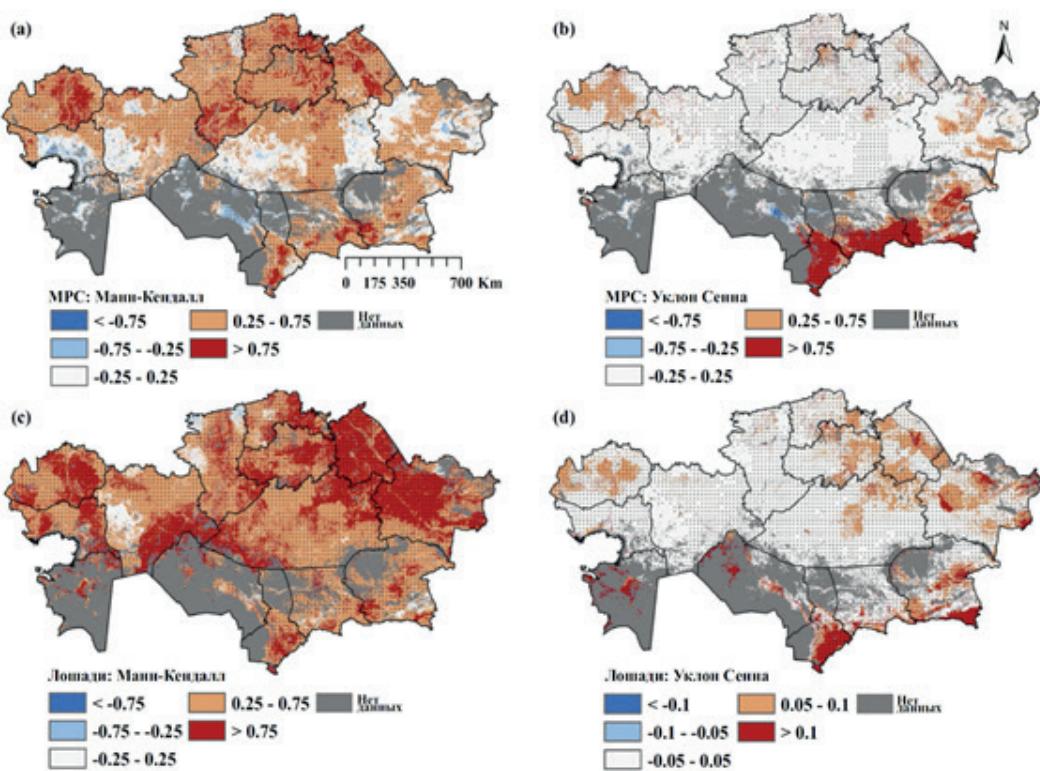


Рисунок 5 – Пространственное распределение коэффициента Тау Кендалла и уклон Сенна для MPC (а, б) и лошадей (с, д) за 2000–2019 гг. Точки показывают статистически значимые изменения ($p < 0.05$)

Это различие связано с тем, что в GLW использовались агрегированные данные первого уровня (областного), что ограничивает пространственную точность и приводит к заниженной оценке в условиях высокой неоднородности размещения скота. В отличие от GLW, предложенная модель учитывает районные данные и пространственные особенности на основе социально-экологических факторов, что обеспечивает более точное и детализированное распределение. Дополнительная валидация с помощью карт относительной нагрузки на пастбища (RSD) и данных о размещении ферм [7] подтверждает достоверность модели. Выявленные кластеры высокой плотности совпадают с регионами интенсивного животноводства и агропастбищной системы, тогда как зоны со средней плотностью соответствуют обработанным землям на севере и юге страны.

Особое внимание удалено влиянию социально-экологических факторов (SES). Наибольший вклад в прогнозирование плотности скота внесли: температура, плотность населения, расстояние до поселений, дефицит парциального давления пара, солнечная радиация и ночное освещение. Модель показала, что увеличение плотности населения и уменьшение расстояния до населённых пунктов коррелируют с ростом плотности скота. Кроме того, высокие уровни осадков и снежного покрова, наряду с умеренными температурами, способствуют лучшему обеспечению кормами.

Несмотря на высокую точность, модель имеет ряд ограничений: использовались усреднённые годовые данные без учёта сезонных миграций; местоположение скотоводческих хозяйств аппроксимировано по населённым пунктам; и не учитывались рабочие колодцы и временные базы, которые активно использовались в советский период.

Тем не менее, предложенный подход и разработанная база данных имеют значительный потенциал. Они могут быть использованы в целях устойчивого управления пастбищами, планирования водных и кормовых ресурсов, прогнозирования экологических рисков, а также при разработке национальных стратегий по сельскому хозяйству. В будущем рекомендуется расширить использование других алгоритмов машинного обучения, учитывать сезонность и различать типы хозяйств (аграрные, частные, личные), что позволит получить более полную картину плотности и распределения скота по стране.

Заключение

Настоящее исследование представляет собой первую попытку построения высокоточной, пространственно-временной базы данных плотности МРС и лошадей (LSKD) в Казахстане с разрешением 1 км² за период 2000-2019 годов. Используя модель RF и 13 социально-экологических предикторов, авторам удалось смоделировать и валидировать годовые карты плотности скота, отражающие реальную динамику животноводства в стране.

Результаты показали устойчивый рост численности скота по всей территории Казахстана, особенно в южных и юго-восточных регионах (Туркестанская, Жамбылская, Алматинская области), а также в ряде северных и западных регионов. Выявлены пространственные «горячие точки» высокой плотности скота, как правило, приуроченные к населенным пунктам, что подтверждает связь между плотностью населения, инфраструктурой и размещением скотоводческих хозяйств.

Трендовый анализ (Mann-Kendall и уклон Сенна) подтвердил значимые положительные тенденции в распределении плотности скота, а важнейшими факторами, влияющими на распределение LSKD, оказались температура, плотность населения, расстояние до населённых пунктов, уровень освещённости в ночное время и дефицит парциального давления пара.

Несмотря на определённые ограничения – отсутствие сезонной детализации, недоступность данных по фермам и колодцам, использование поселений в качестве прокси – полученные карты и методика являются важным вкладом в устойчивое управление пастбищными ресурсами Казахстана. Они могут быть использованы для оценки кормовой нагрузки, планирования водопользования, расчёта выбросов парниковых газов, зоосанитарного анализа и выработки государственной аграрной политики.

Дополнительно следует отметить, что дальнейшее улучшение точности пространственного моделирования может быть достигнуто за счёт использования официальных национальных источников данных. В частности, в Республике Казахстан накапливаются архивные материалы спутникового мониторинга пастбищ, проводимого АО НК «Қазақстан Фарыш Сапары», а также функционирует информационная система «Идентификация сельскохозяйственных животных» (ИС ИСЖ), администрируемая Министерством сельского хозяйства. Подключение этих ресурсов - при наличии доступа - позволит значительно повысить пространственную детализацию и актуальность моделей.

Таким образом, предложенная база данных и методологический подход обладают высокой воспроизводимостью и могут быть адаптированы для других регионов с аналогичной агроэкологической структурой. Они также обеспечивают научную основу для дальнейших междисциплинарных исследований в области сельского хозяйства, экологии, геоинформатики и продовольственной безопасности, а также могут быть полезны ветеринарным службам, сотрудникам научных институтов и специалистам в области дистанционного зондирования Земли.

Вклад авторов

МК: инициация исследования, адаптация оригинальной англоязычной статьи, подготовка русскоязычного текста, редактирование рукописи. ВК: разработка методологии, построение модели Random Forest, анализ данных, создание карт плотности. РД: пространственный анализ, статистическая обработка данных, участие в написании оригинальной версии статьи. ДЧ: интерпретация результатов, участие в обсуждении, проверка корректности расчетов. НН: картографическая визуализация и геоданные. АА: редакторская помощь, оформление статьи в соответствии с требованиями журнала.

Список литературы

- 1 1 Zhu, S., Chen, X., Zhang, C., Fang, X., Cao, L. (2022). Carbon variation of dry grasslands in Central Asia in response to climate controls and grazing appropriation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32205-32219. DOI: 10.1007/s11356-022-18542-2.

- 2 Муталипова, КК. (2024). Деградация пастбищных угодий в Республике Казахстан: причины и последствия. *Проблемы агрорынка*, 4, 245-254. DOI: 10.46666/2024-4.2708-9991.22.
- 3 Akhmedenov, K., Sergaliev, N., Makhambetov, M., Sergeyeva, A., Saparov, K., Izimova, R., Turgumbaev, A., Iskaliev, D. (2025). Integrated assessment of pasture ecosystem degradation processes in arid zones: A case study of Atyrau Region, Kazakhstan. *Sustainability*, 17(19), 8869. DOI: 10.3390/su17198869.
- 4 Бюро национальной статистики. (н.д.). (2024). *Публикации о сельском, лесном, охотничьем и рыбном хозяйстве*. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/340937/>
- 5 Inform.kz. (н.д.). (2024). *Казахстанское коневодство зашло в тупик*. <https://www.inform.kz/ru/kazahstanskoe-konevodstvo-zashlo-vtupik-3f4ad1>
- 6 Kolluru, V., John, R., Saraf, S., Chen, J., Hankerson, B., Robinson, S., Kussainova, M., Jain, H. (2023). Gridded livestock density database and spatial trends for Kazakhstan. *Scientific Data*, 10(1), 839. DOI:10.1038/s41597-023-02736-5.
- 7 Figshare. (2023). *Livestock density modeling code and data repository*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23528232>
- 8 Schettino, DN, Giannelli, C., Bosco-Lauth, AM, et al. (2021). Risk for African swine fever introduction into Kazakhstan. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 1-11. DOI:10.3389/fvets.2021.755558.

References

- 1 Zhu, S., Chen, X., Zhang, C., Fang, X., Cao, L. (2022). Carbon variation of dry grasslands in Central Asia in response to climate controls and grazing appropriation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32205-32219. DOI:10.1007/s11356-022-18542-2.
- 2 Mutualipova, KK. (2024). Degradaciya pastbischchnykh ugodiy v Respublike Kazakhstan: prichiny i posledstviya. *Problemy agrorynka*, 4, 245-254. DOI:10.46666/2024-4.2708-9991.22.
- 3 Akhmedenov, K., Sergaliev, N., Makhambetov, M., Sergeyeva, A., Saparov, K., Izimova, R., Turgumbaev, A., Iskaliev, D. (2025). Integrated assessment of pasture ecosystem degradation processes in arid zones: A case study of Atyrau Region, Kazakhstan. *Sustainability*, 17(19), 8869. DOI:10.3390/su17198869.
- 4 Byuro natsionalnoy statistiki. (n.d.). *Publikatsii o selskom, lesnom, okhotniche i rybnom khozyaystve*. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/340937/>
- 5 Inform.kz. (c.d.). (2024). *Kazakhstanskoe konevodstvo zashlo v tupik*. <https://www.inform.kz/ru/kazahstanskoe-konevodstvo-zashlo-vtupik-3f4ad1>
- 6 Kolluru, V., John, R., Saraf, S., Chen, J., Hankerson, B., Robinson, S., Kussainova, M., Jain, H. (2023). Gridded livestock density database and spatial trends for Kazakhstan. *Scientific Data*, 10(1), 839. DOI:10.1038/s41597-023-02736-5.
- 7 Figshare. (2023). *Livestock density modeling code and data repository*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23528232>
- 8 Schettino, DN, Giannelli, C., Bosco-Lauth, AM, et al. (2021). Risk for African swine fever introduction into Kazakhstan. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 1-11. DOI:10.3389/fvets.2021.755558.

Машиналық оқыту негізінде Қазақстандағы жайылымдық мал тығыздығының кеңістіктік-уақыттық таралуын модельдеу

Кусаинова М.Д., Коллурұ Б., Джон Р., Чен Дж., Нұрғали Н.Д., Жаппарова А.А.

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Қазақстан – Орталық Азиядағы ең ірі жайылымдық қорлардың біріне ие ел, алайда бұл аумақтарды тиімді басқару малдың орналасуына қатысты кеңістіктік тұргыда нақтыланған деректердің жетіспеушілігінен қындық туғызуда. Ұсақ мүйізді мал мен

жылқылар санының өсуі, сондай-ақ жайылым экожүйелеріне түсетін қысым мониторингтің жаңа тәсілдерін талап етеді. Зерттеудің маңаты – 2000-2019 жылдар аралығында Қазақстан аумағында жайылымдық мал тығыздығының кеңістіктік-уақыттық таралуын 1 km^2 жоғары ажыратымдылықпен Random Forest алгоритмін қолдана отырып модельдеу.

Материалдар мен әдістер. Бастапқы дерек ретінде қой, ешкі және жылқылардың аудандық деңгейдегі реңми статистикалық көрсеткіштері, сондай-ақ 13 әлеуметтік-экологиялық фактор пайдаланылды. Random Forest алгоритмі жыл сайынғы мал тығыздығы карталарын құру үшін қолданылды. Кеңістіктік айнымалылар климаттық, өсімдік жамылғысы, демографиялық және инфрақұрылымдық сипаттамаларды қамтыды. Модельді валидациялау үшін R^2 , RMSE және MAE көрсеткіштері әртүрлі оқыту және тестілеу жиынтықтары конфигурацияларымен есептелді.

Нәтижелер. Мал тығыздығының дәл карталары әзірленіп, жайылымдық жүктеменің «ыстық нүктелері» Қазақстанның оңтүстігі мен оңтүстік-шығысында анықталды. Ең жоғары дәлдік 10 км буфер мен 90:10 пропорциялы үлгілеу кезінде байқалды. Манн-Кендалл және Сен еңстігі әдістері бойынша мал тығыздығының өсу үрдістері анықталды.

Қорытынды. Алынған кеңістіктік-уақыттық деректер жайылымдарды басқару, аграрлық саясат, экологиялық мониторинг және ветеринарлық жоспарлау салаларында қолдануға жарамды. Әзірленген әдістеме үқсас жағдайдағы басқа аймақтарға бейімделе алады.

Кілт сөздер: кеңістіктік модельдеу; мал шаруашылығы; машиналық оқыту; Қазақстан; жайылымдар; ГИС.

Modeling the Spatiotemporal Distribution of Livestock Grazing Density in Kazakhstan Using Machine Learning

Maira D. Kussainova, Venkatesh Kolluru, Ranjeet John, Jiquan Chen, Nursultan D. Nurgali, Aigul A. Zhapparova

Abstract

Background and Aim. Kazakhstan possesses one of the largest pasture resources in Central Asia, yet effective management of these lands is hindered by the lack of spatially detailed livestock distribution data. The growth in the number of small ruminants and horses, along with increased pressure on pasture ecosystems, necessitates new monitoring approaches. The objective of this study is to model the spatiotemporal distribution of pasture livestock density in Kazakhstan from 2000 to 2019 at a high spatial resolution (1 km^2) using the Random Forest algorithm.

Materials and Methods. District-level livestock statistics for sheep, goats, and horses were used along with 13 socio-ecological variables. The Random Forest algorithm was applied to generate annual livestock density maps. Spatial variables include climatic, vegetative, demographic, and infrastructural factors. Model validation was performed using R^2 , RMSE, and MAE metrics with various training and testing sample configurations.

Results. Accurate livestock density maps were developed, and “hotspots” of pasture pressure were identified in the southern and southeastern regions of Kazakhstan. The model with a 10 km buffer and 90:10 data split showed the highest accuracy. Significant increasing trends in livestock density were revealed using Mann-Kendall trend test and Sen’s slope.

Conclusion. The resulting spatiotemporal data can be applied in pasture management, agricultural policy, ecological monitoring, and veterinary planning. The developed methodology can be adapted for other regions with similar conditions.

Keywords: spatial modeling; livestock; machine learning; Kazakhstan; pastures; GIS.