

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОЧВЕННОЙ ЭРОЗИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ ГИС

Бахриев Мухаммад Бахтиёр угли, ассистент, кафедра геодезии и геоинформатики, Каршинский инженерно-экономический университет.

Сафаров Файзали Саминкулович, старший преподаватель, кафедра геодезии и геоинформатики, Каршинский инженерно-экономический университет.

Аннотация: Исследование прогнозирует почвенную эрозию в Шахрисабзском районе до 2030 года на основе пространственных факторов, обработанных в ArcMap. Пространственные связи смоделированы методом линейной регрессии. Результаты выделяют зоны риска и служат научной основой управления земельными ресурсами.

Ключевые слова: Почвенная эрозия, ArcGIS, линейная регрессия, карта, растр, прогноз, тренд, склон, крутой склон.

SPATIAL PREDICTION OF SOIL EROSION USING GIS-BASED LINEAR REGRESSION

Muhammad Bakhriyev Bakhtiyor o‘g‘li, Assistant, Department of Geodesy and Geoinformatics, Karshi State University of Engineering.

Shahzod Asadov Umidillevichi, Assistant, Department of Geodesy and Geoinformatics, Qarshi State University of Engineering.

Abstract. The study predicts soil erosion in Shahrisabz district up to 2030 using spatial factors analyzed in ArcGIS Desktop. Spatial relationships are modeled through Linear regression. Results define erosion-risk zones and support land management decisions.

Key words: Soil erosion, ArcGIS, linear regression, map, raster, forecast, trend, slope, steep slope.

1. Введение

Рельеф Шахрисабзского района характеризуется гористой и пересечённой местностью, что усиливает пространственную неоднородность процессов почвенной эрозии. Природные факторы — количество осадков, крутизна склонов, состав почвы — в сочетании с антропогенной нагрузкой формируют сложные пространственные взаимодействия, влияющие на динамику деградации земель. Кратко- и среднесрочное прогнозирование этих процессов имеет важное значение для обеспечения экологической устойчивости и повышения продуктивности сельского хозяйства.

Инструменты геоматического анализа позволяют картировать факторы, влияющие на эрозионные процессы, а также выявлять долгосрочные тенденции изменений на уровне каждого пикселя. Линейная регрессия служит эффективной моделью для описания устойчивой линейной динамики процессов ландшафта на период 5–20 лет.

Прогнозирование годовой почвенной эрозии в Шахрисабзском районе необходимо для поддержания экологической стабильности. Ввиду горного характера территории эрозионные процессы здесь выражены особенно интенсивно. На них влияют природные (осадки, уклон склонов, тип почвы) и антропогенные факторы (землепользование, агротехника).

Выделение зон наибольшего риска позволяет планировать и реализовывать меры по предотвращению эрозии, такие как лесомелиорация, контурное земледелие и внедрение устойчивых культур [1].

2. Материалы и методы

Линейная регрессия является оптимальным инструментом для анализа геопространственных данных. В ГИС-наборах все элементы взаимосвязаны, а регRESSIONНОЕ моделирование помогает выявлять эти отношения [2,4].

По данным Esri, регрессионный анализ позволяет моделировать, анализировать и исследовать пространственные связи, а также выявлять причины наблюдаемых закономерностей [3]. Например, с его помощью можно объяснить повышенные значения эрозии в определённых районах или рост осадков в других регионах. Кроме того, регрессионные модели применяются для прогнозирования пространственных тенденций [5,6].

Многие ландшафтные процессы — антропогенная нагрузка, интенсификация сельского хозяйства, вырубка лесов, изменения гидрологического стока — демонстрируют почти линейный характер динамики в пределах 5–20 лет. Если временной ряд за 2016–2024 годы демонстрирует устойчивую тенденцию, линейная модель является наиболее простым и согласованным способом её описания [3,8].

Поскольку линейная модель является экономной, её удобно интерпретировать при научном анализе и подготовке управленческих рекомендаций (наклон = годовое изменение). При наличии данных за 10 лет для каждого пикселя можно вычислить индивидуальный тренд, что полностью соответствует методологии растровой регрессии [7].

Регрессионная модель

Для каждого пикселя рассчитано уравнение:

$$E(t) = at + b$$

где:

- a** — среднегодовой темп изменения эрозии (угол наклона тренда),
- b** — начальный уровень (пересечение),
- E(t)** — интенсивность эрозии в момент времени t .

Эта модель отражает долгосрочную линейную динамику эрозии и представляет собой детерминированный подход, широко применяемый в геостатистических анализах [9,10].

Согласно принципам математической статистики, коэффициент наклона (slope) рассчитывается по следующей формуле:

$$a = \frac{n \sum (t_i y_i) - \sum t_i \sum y_i}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2}$$

Эта формула применяется к каждому пикслю и учитывает следующее:

- ковариацию между значениями эрозии и временем,
- дисперсию временного ряда.

Таким образом, наклон (slope) представляет собой среднегодовую скорость изменения эрозии на уровне пикселя по всей области.

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum t_i}{n}$$

Этот параметр представляет собой вертикальное смещение линии тренда для каждого пикселя и является неотъемлемой частью расчёта прогноза на 2030 год.

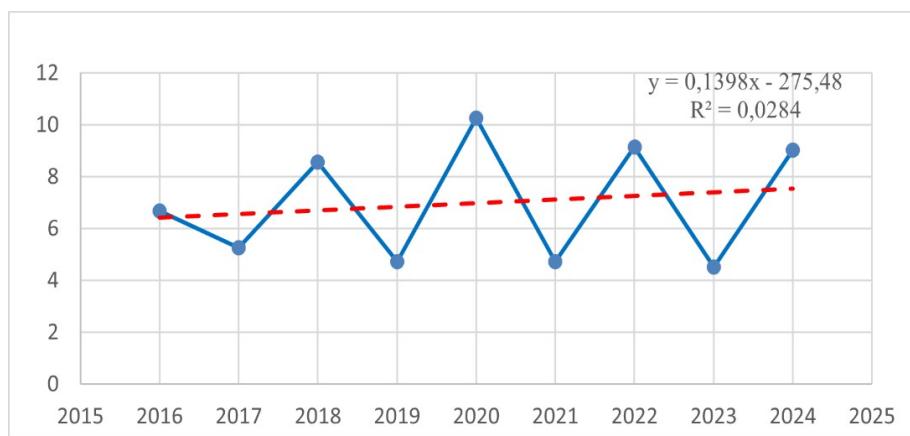


Рисунок 1. Линия тренда для отдельного пикселя

Используя возможности модуля ArcGIS Spatial Analyst:

Сумма годовых значений пикселей: $\text{sum_y} = \sum y_i$

Взвешенная по времени сумма: $\text{sum_ty} = \sum (t_y y_i)$

Обе суммы были получены в виде растровых слоёв. Значения каждого пикселя служат статистическим представлением его временного ряда. Растр наклона, основанный на этой сумме:

$$\text{Slope raster: } \mathbf{a(x,y)} = \frac{10 * \sum_{ty}(x,y) - 20195 * \sum_y(x,y)}{825}$$

$$\text{Intercept raster: } \mathbf{b(x,y)} = \frac{\sum_{ty}(x,y) - a(x,y) * 20195}{10}$$

где x и y представляют собой координаты растровых пикселей.

3. Результаты.

На основе регрессионно-растровой модели была построена пространственная прогностическая карта эрозии почв на 2030 год. Итоговая прогнозируемая поверхность демонстрирует расширение зон с крутыми уклонами и увеличение интенсивности уклонов в пикселях, находящихся под антропогенным воздействием.

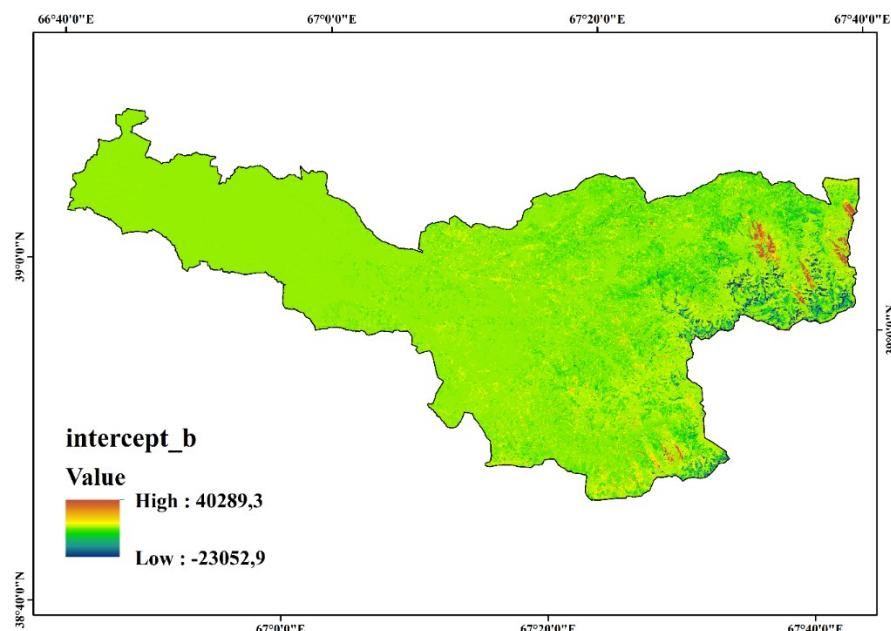


Рисунок 2. Пространственное распределение растра наклона

Используя модель линейной регрессии, значение для каждого пикселя на 2030 год было оценено по следующему выражению:

$$E_{2030}(x,y) = a(x,y) \cdot 2030 + b(x,y)$$

Однако, поскольку показатели эрозии почвы не могут быть отрицательными, был применён ограничивающий функциональный оператор, проецирующий отрицательные значения на ноль:

$$E_{2030}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} 0, & \text{if } a(x, y) \cdot 2030 + b \\ a(x, y) \cdot 2030 + b(x, y) & \end{cases}$$

Этот подход соответствует физической природе процесса эрозии и обеспечивает более точную практическую интерпретацию модели [8, 9].

Предложенный пиксельно-ориентированный регрессионный подход обладает следующими научными преимуществами:

- формирует динамическую модель, основанную на временных рядах, а не на статических картах;
- для каждого пикселя строится независимая математическая модель;
- наклон (slope) служит наиболее информативным показателем для определения тенденций увеличения или уменьшения эрозии;
- модель точно отражает внутренние ландшафтные вариации на уровне пикселя;
- реализация в среде ArcGIS обеспечивает воспроизводимость методологии.

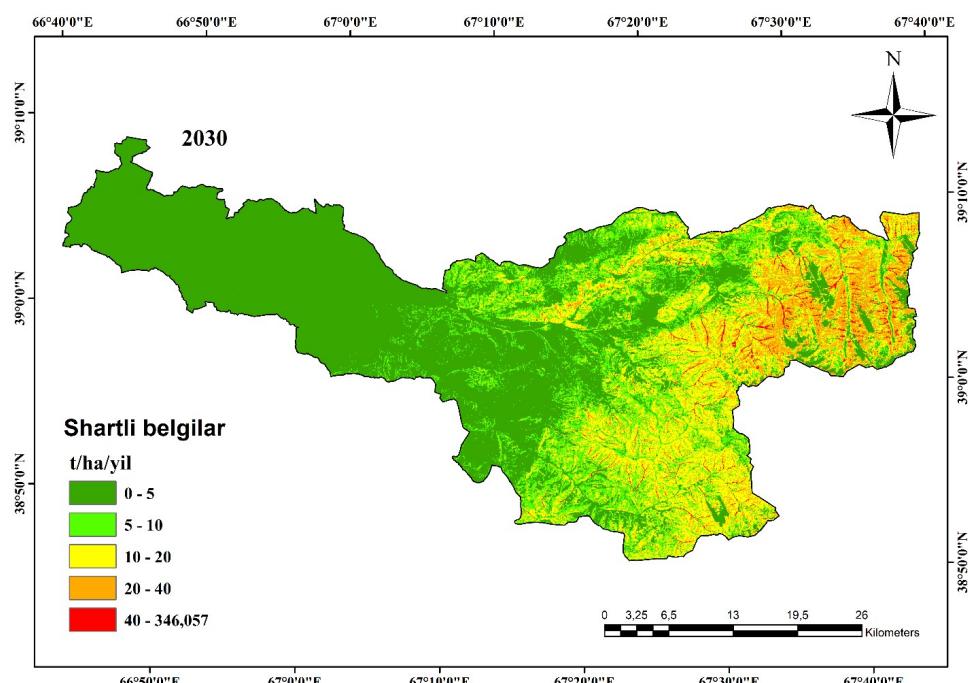


Рисунок 3. Карта эрозии почв на 2030 год

Прогнозируемая карта на 2030 год показывает средний уровень эрозии почв, равный 7,76 т/га/год.

Прогнозная карта эрозии на 2030 год была рассчитана с использованием пиксельно-ориентированной регрессионной модели, построенной на основе данных, собранных в период с 2016 по 2024 годы. Этот метод обеспечивает всесторонний пространственно-временной анализ процессов эрозии почв и обеспечивает высокую точность в оценке долгосрочной динамики деградации земель в изучаемой области.

Заключение

Прогнозируемые эрозионные поверхности на 2030 год указывают на среднегодовое изменение в размере 7,76 т/га/год по всему району. Это значение, рассчитанное на основе ежегодных пространственных регрессионных растровых наблюдений, отражает сохраняющийся высокий риск деградации земель на всей территории.

Эти слои были получены с использованием международных ГИС-платформ — ArcMap в составе ArcGIS Desktop и его аналитического расширения ArcGIS Spatial Analyst, — что демонстрирует воспроизводимость всех статистических и детерминистических расчётов. Это усиливает научную и методологическую обоснованность исследования и обеспечивает надёжную основу для применения аналогичного подхода в других горных или склонных к деградации регионах в будущем.

References:

1. Burrough, P.A., McDonnell, R.A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, 2015.
2. Goodchild, M.F., Parks, B.O., Steyaert, L.T. *Environmental Modeling with GIS*. CRC Press, 2018.
3. Wischmeier, W.H., Smith, D.D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. USDA, 1997.

4. Tomlin, C.D. Map Algebra: One Perspective. Environmental Systems Research Institute, 2016.
5. Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P. et al. Global assessment of soil erosion using open data. *Nature*, 2017, 7, 1–11.
6. Yasli, A., Baxriyev, M. Geomatics-based pixel-wise soil erosion trend assessment of mountainous agro-landscapes. *Journal of Geospatial Analytics*, 2024, 2(3), 45–60.
7. Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L.R. Modeling topographic potential for soil erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 1996, 10, 629–641.
8. Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A. et al. Soil erosion prediction (science and GIS integration). Springer, 2019.
9. Conway, D., Schipper, E.L.F. Adaptation to climate change in agricultural systems. *FAO Climate Reports*, 2021.
10. Esri. Regression analysis for spatial modeling and trend surface generation in GIS. Technical White Paper, 2023.