

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ/AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH, PHOTOGRAMMETRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1>

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ С УЧЕТОМ ПРИРОДНЫХ И ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Научная статья

Чинь К.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0002-6752-0388;

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Ханой, Вьетнам

* Корреспондирующий автор (quochuy9xnb[at]gmail.com)

Аннотация

Моделирование изменений в землепользовании является мощным инструментом для оценки факторов изменений и прогнозирования землепользования. Целью статьи является прогнозирование изменений в землепользовании в 2029 году в округе Зяотхюи, Нам Динь, на основе применения модели изменения земель — LCM (Land Change Modeler). Модель изменения земель — LCM использует комбинацию искусственной нейронной сети и модели CA-Markov. Данные, используемые в модели, включают: данные о землепользовании за 2005, 2013, 2021 годы, геоморфологические данные, почву, расстояние до береговой линии, изменение плотности населения, изменение количества домохозяйств, расстояние до дорог. Искусственные нейронные сети используются для определения вероятностей пространственного перехода типов землепользования. Далее результаты модели искусственной сети будут введены в модель CA-Markov для количественного прогнозирования землепользования. Точность прогноза модели изменения земель — LCM на 2021 год с коэффициентом каппа 0,8570 доказывает, что модель имеет высокую надежность. Результаты прогнозирования изменения землепользования с 2021 по 2029 год имеют следующие характеристики: жилая застройка увеличивается с 5556,95 га до 5777,48 га, в основном в районах с высокими колебаниями плотности населения и количества домохозяйств и концентрируясь вблизи основных дорог района; площадь аквакультуры увеличится с 3480,23 га до 3945,4 га, а площади рисовых полей значительно сократятся.

Ключевые слова: землепользование, прогнозирование землепользования, модель изменения земель, CA-Markov, искусственная нейронная сеть.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR FORECASTING LAND USE CHANGES, TAKING INTO ACCOUNT NATURAL AND DEMOGRAPHIC FACTORS

Research article

Trinh Q.^{1,*}

¹ ORCID : 0009-0002-6752-0388;

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Hanoi, Vietnam

* Corresponding author (quochuy9xnb[at]gmail.com)

Abstract

Land use change modelling is a powerful tool for assessing change factors and predicting land use. The aim of this article is to predict land use changes in 2029 in the district of Xuân Thủy, Nam Định, based on the application of the Land Change Modeler (LCM) model. The LCM model uses a combination of an artificial neural network and a CA-Markov model. The data used in the model includes: land use data for 2005, 2013, and 2021, geomorphological data, soil, distance to the coastline, changes in population density, changes in the number of households, and distance to roads. Artificial neural networks are used to determine the probabilities of spatial transitions between land use types. The results of the artificial network model will then be entered into the CA-Markov model for quantitative land use forecasting. The accuracy of the LCM land change model forecast for 2021, with a kappa coefficient of 0.8570, proves that the model is highly reliable. The results of the land use change forecast for 2021 to 2029 have the following characteristics: residential development will increase from 5,556.95 ha to 5,777.48 ha, mainly in areas with high fluctuations in population density and number of households and concentrated near the main roads of the district; aquaculture area will increase from 3,480.23 ha to 3,945.4 ha, while rice field areas will decrease significantly.

Keywords: land use, land use forecasting, land change model, CA-Markov, artificial neural network.

Введение

Изменение землепользования играет важную роль в изменении окружающей среды и способствует глобальным изменениям. В настоящее время, вместе с развитием страны, земля все больше и больше меняется в соответствии с потребностями общества. Округ Зяотхюи, Намдинь — это территория с относительно сильными колебаниями землепользования. Общая тенденция изменения землепользования в округе за последние годы заключается в том, что земли, отведенные под рис и сельскохозяйственные культуры, сокращаются и переводятся в жилые земли и земли аквакультуры. Причин такого изменений много, включая как природные, так и социально-экономические факторы. Для выявления причин изменений в землепользовании необходимо понимать как то, как люди принимают решения в области землепользования, так и взаимодействие природных и социальных факторов, влияющих на эти решения.

Поэтому изучение и прогнозирование изменений в землепользовании считается одним из важных исследований, помогающих менеджерам и планировщикам принимать решения по устойчивому землепользованию.

В последние годы ученые разработали теорию ГИС-моделей для исследований изменений в землепользовании. ГИС-моделирование является эффективным инструментом для изучения изменений в землепользовании благодаря своей способности интегрировать идентификацию изменений в землепользовании с факторами, влияющими на эти изменения [1]. Моделирование землепользования помогает ученым выдвигать гипотезы и отвечать на следующие вопросы:

- 1) какие географические и социально-экономические факторы влияют на изменение землепользования;
- 2) какие виды землепользования изменение затрагивает;
- 3) насколько быстро меняется землепользование?

Разработанные модели изменения землепользования играют важную роль в объяснении и прогнозировании изменений в землепользовании.

Изменения в землепользовании (LUC) были широко оценены во многих регионах мира. В Африке расширение сельскохозяйственных угодий из-за быстрого роста населения признано основным фактором изменения характера землепользования [2]. Во многих развитых странах, включая Европу и США, вплоть до начала XIX века наблюдалась массовая вырубка лесов из-за расширения сельского хозяйства и индустриализации [3]. Динамика урбанизации и роста городов часто связана с демографическими факторами, в основном в развивающихся странах [4]. Движущая сила изменения землепользования тесно связана с чрезмерной эксплуатацией природных ресурсов. Проблемы естественной изменчивости, такие как изменение климата, состояния почвы и топографических особенностей, также стали причиной изменений в землепользовании [5]. Таким образом, интеграция природных и человеческих факторов в динамику LULC стала важной проблемой для эффективного землепользования во всем мире. Оценка изменений в сфере землепользования и природных ресурсов и их факторов, имеющих прямые последствия для природной среды и человеческого общества, находится в центре внимания современных научных исследований ученых.

Существует множество моделей, используемых для моделирования и прогнозирования изменений в землепользовании, например, CA (клеточные автоматы), Geomod, Clue, LCM (модель изменения земель). В данном исследовании используется модель изменения земель (LCM) для прогнозирования будущего использования земель в округе Зяотхюи. LCM в основном использует метод MLP-ANN-CA-Markov. Эта модель эффективна благодаря соответствующей калибровке и способности моделировать широкий спектр типов земного покрова. LCM оценивает изменения в землепользовании за два разных периода, выявляет изменения, визуализирует их и представляет результаты с использованием различных карт и графиков [2].

Методы и принципы исследования

2.1. Исходные данные

Исходные данные, использованные в исследовании, включают карты состояния землепользования за 2005, 2013 и 2021 годы; природные факторы включают рельеф, почву, расстояние до береговой линии, расстояние до дорог; демографические факторы включают изменения плотности населения и изменения количества домохозяйств за два периода 2005–2013 и 2013–2021 годов. Все данные используемые в модели должны быть стандартизированы в соответствии с форматом данных программного обеспечения Terrset и обобщены в таблице 1.

Данные о землепользовании в разное время, как показано в Таблице 1 выше, получены при поддешифрированы спутниковых снимков Sentinel 2 и Landsat с системой аннотаций, включающей 7 объектов (жилая застройка, земли аквакультуры, рисовые поля, солончаки, пустующие земли, мангровые леса и водные поверхности).

Таблица 1 - Данные, использованные в исследовании

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.1>

№	Входные данные	Формат	Количество строк, столбцов	Количество столбцов
1	Состояние землепользования 2005 г.	Целое число	522	877
2	Состояние землепользования 2013 г.	Целое число	522	877
3	Состояние землепользования 2021 г.	Целое число	522	877
4	Геоморфология	Целое число	522	877
5	Почва	Целое число	522	877
6	Расстояние до дорог	Целое число	522	877
7	Расстояние до береговой линии	Целое число	522	877
8	Изменения	Целое число	522	877

№	Входные данные	Формат	Количество строк, столбцов	Количество столбцов
	плотности населения			
9	Изменения количества домохозяйств	Целое число	522	877

2.2. Метод исследования

Модель изменения земель (LCM) представляет собой интегрированную модель, включающую искусственную нейронную сеть и модель СА (Марковскую модель). Модели изменения землепользования помогают прогнозировать и предоставлять сценарии будущих изменений землепользования. Весь процесс моделирования прогноза землепользования в 2029 году для района Зяотхюи, Нам Динь, показан на рисунке 1.

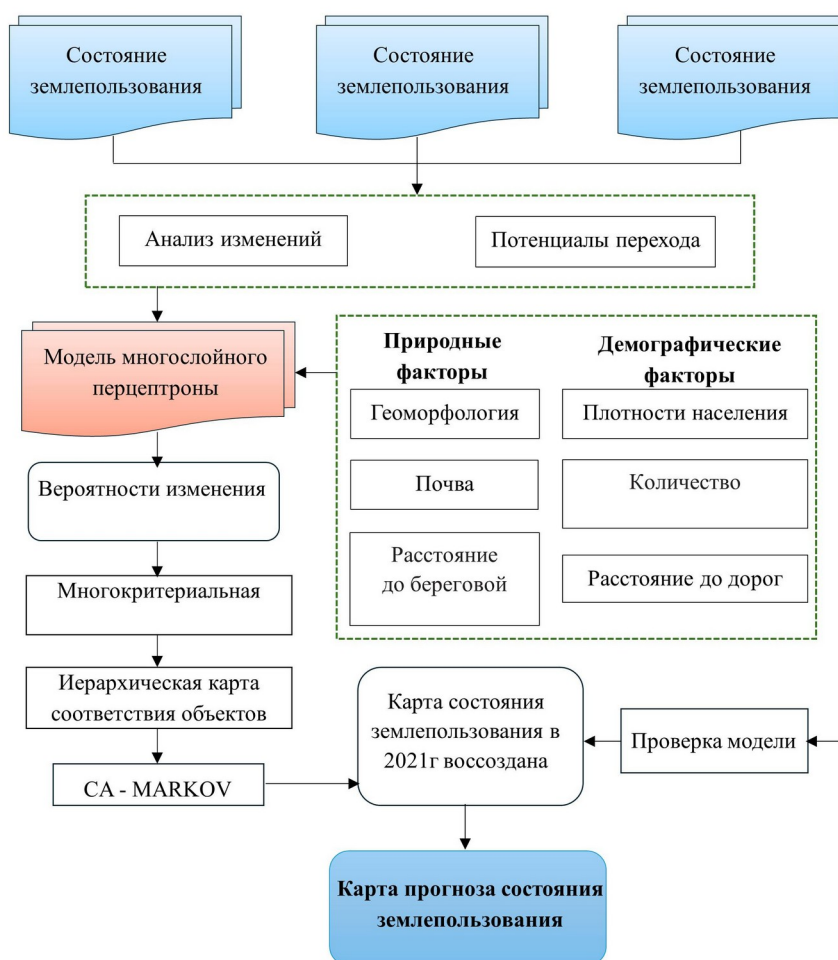


Рисунок 1 - Общая схема методики проведения исследования прогноз изменений землепользования
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.2>

2.2.1. Искусственные нейронные сети в расчете потенциала преобразования землепользования

Конечным результатом является модель изменений в землепользовании, предназначенная для понимания и определения изменений земного покрова, а также для составления требований к охране окружающей среды, необходимость которой вызвана этими изменениями. Существует несколько методов моделирования потенциала перехода, но исследования показывают, что ANN является самым эффективным [6]. В данном исследовании используется искусственная сеть MLP-ANN. Нейронные сети можно понимать как сложную математическую формулу для преобразования входных данных (прошлый статус землепользования, природные факторы) в желаемые выходные данные (например, будущее землепользование) [7]. MLP использует алгоритм обратного распространения ошибки, который широко применяется в моделях нейронных сетей [8], [9]. Модель сети многослойного перцептрона показана на рисунке 2.

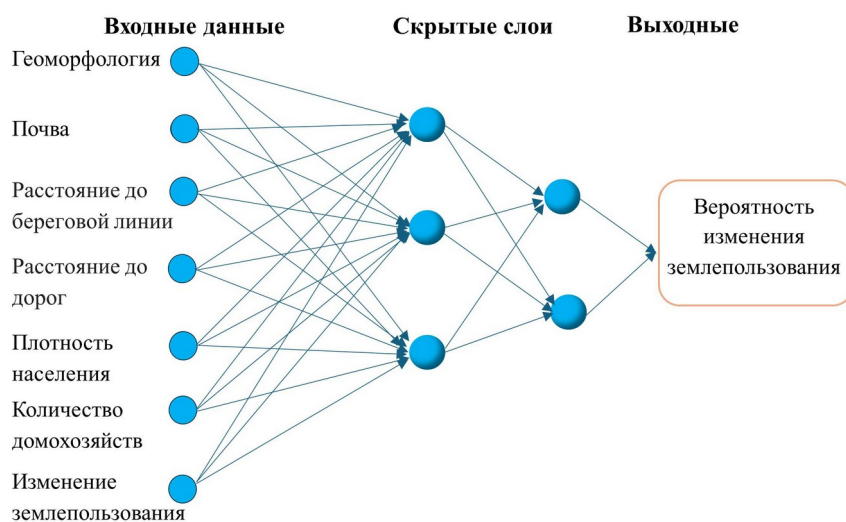


Рисунок 2 - Диаграмма искусственной нейронной сети при определении вероятности изменения землепользования
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.3>

2.2.2. Цепь Markov и Cellular automata (CA)

Цепной анализ Маркова применяется в пространственном моделировании благодаря способности обеспечить матрицу вероятностей переходов (transition probability matrix) входных данных. При исследовании моделирования землепользования анализ цепи Маркова приведет к матрице, представляющей вероятность изменения одного типа землепользования на другой землепользования [10].

Прогноз изменение типов землепользования с течением времени в соответствии со следующим математическим уравнением:

$$Vt_2 = M * Vt_1$$

где:

M: Соотношение изменения типов землепользования за период сбора данных.

Vt₁: Площадь типа землепользования в первый момент

Vt₂: Площадь типа землепользования во второй момент

Cellular automata (CA) — это дискретная модель, изучаемая в теории вычислительных способностей, математике, физике, комплексной науке, теоретической биологии, моделях микроструктуры [11]. CA состоит из сетки равномерно расположенных ячеек (сетка может иметь много измерений), каждая ячейка имеет определенное количество состояний, таких как «включено» или «выключено». Для каждой ячейки набор соседних ячеек, относительно определенных этой ячейкой. Состояние ячеек определяется в каждом цикле на основе состояния соседних ячеек и таблицы правил. Чтобы лучше понять, мы можем рассмотреть простейшую форму CA, elementary cellular automata (ECA). ECA имеет одномерную сетку (форму линии) ячеек, каждая ячейка имеет значение 0 или 1, и правила полагаются только на значения соседей (левая ячейка, правая ячейка и сама ячейка) для определения найдите эту ячейку в следующем цикле.

Основные результаты

Процесс моделирования, показанный на рисунке 1, выполняется с двумя целями:

1. Проверить точность модели изменения земель (LCM) путем прогнозирования землепользования в 2021 году и последующего сравнения его с землепользованием в 2021 году, полученным из проверенных спутниковых снимков.
2. Прогноз будущего землепользования до 2029 года.

В процессе моделирования используются растровые данные, основанные на матрице преобразования Маркова, поэтому значение (состояние) каждого растра определяется его соседними растровыми ячейками через временные интервалы. Поэтому роль соседнего растра очень важна. Чтобы минимизировать искажения и длительную интерполяцию значений, алгоритм CA в сочетании с иерархическими картами соответствия типов землепользования позволяет ограничить процесс интерполяции определенными рамками, что повышает достоверность моделирования.

Иерархическая карта соответствия отражает градацию уровней пригодности от высокого к низкому для каждого типа землепользования в исследуемой местности. Оценка этих уровней осуществляется на основе ряда компонентных показателей и вероятности изменения землепользования, рассчитанных с использованием модели искусственной нейронной сети MLP-ANN. Например, для оценки пригодности жилой застройки учитываются такие факторы, как изменения плотности населения, изменения количества домохозяйств, расстояние до дорог.

Для проверки точности модели необходимо восстановить состояние землепользования на 2021 год по расчетным данным модели и сравнить его с фактическим состоянием, определенным на основе спутниковых снимков. Состояние землепользования в 2021 году прогнозируется с помощью модели LCM, показанной на рисунке 3. Достигнутая

точность прогнозирования на 2021 год составила 86% (см. рис. 4), что подтверждает высокую надежность предложенной модели для дальнейшего прогнозирования.

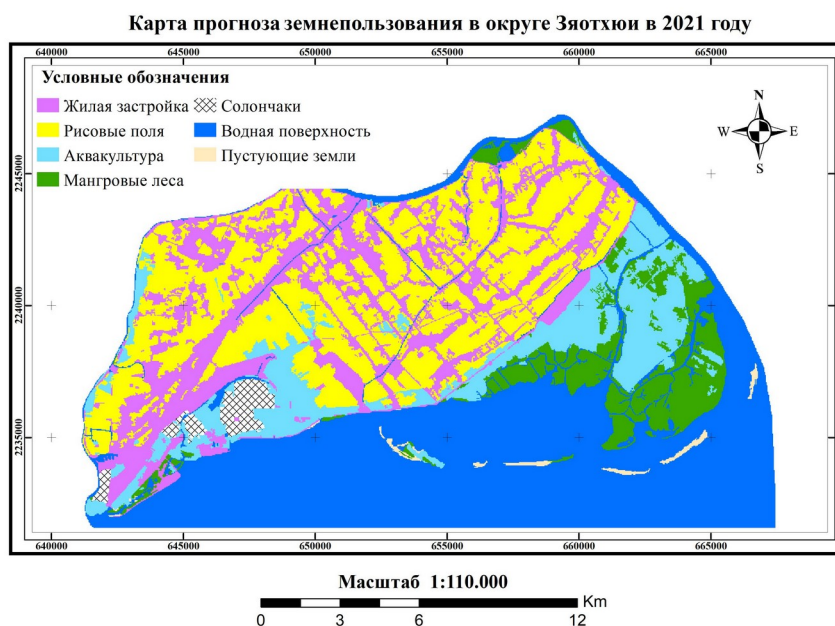


Рисунок 3 - Результат прогноза состояния землепользования 2021 г
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.4>

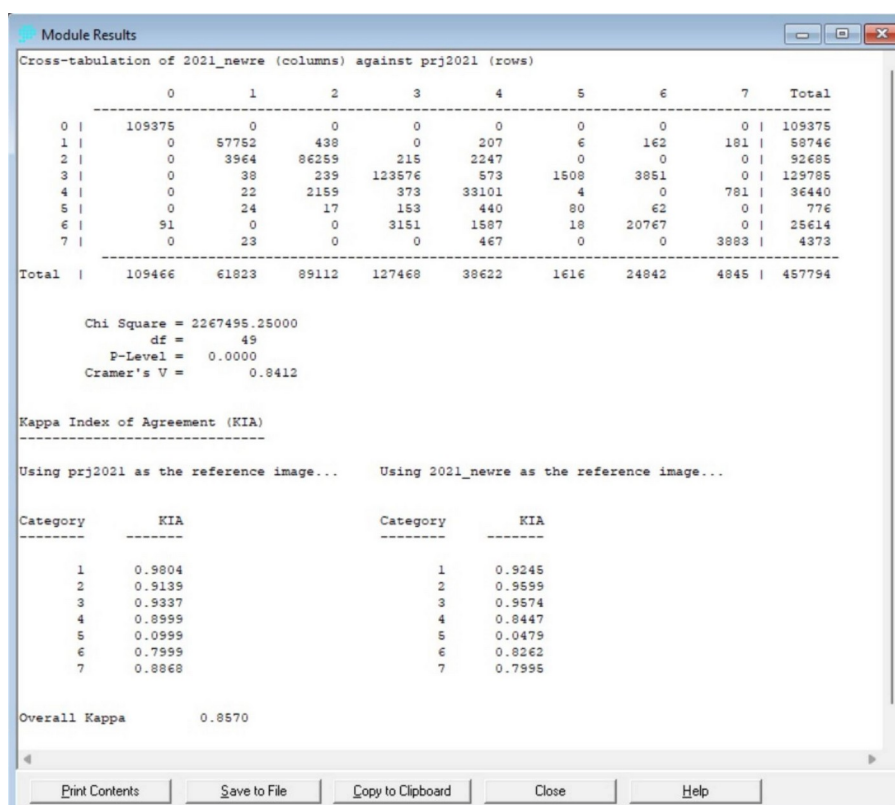


Рисунок 4 - Результат проверки точности модели прогнозирования землепользования LCM
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.5>

После того как мы определили надежность модели LCM в прогнозировании землепользования, мы можем приступить к созданию карты состояния землепользования в 2029 году (рисунок 5). На основе данных состояния землепользования 2021 года и состояния землепользования 2029 года, построенных по модели, с использованием программного обеспечения ArcGIS для наложения двух карт получена карта изменения землепользования за период 2021 – 2029 гг., представленная на рисунке 6. Площадь изменения типов землепользования показана в таблице 2



Рисунок 5 - Результат прогноза состояния землепользования 2029 г
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.6>

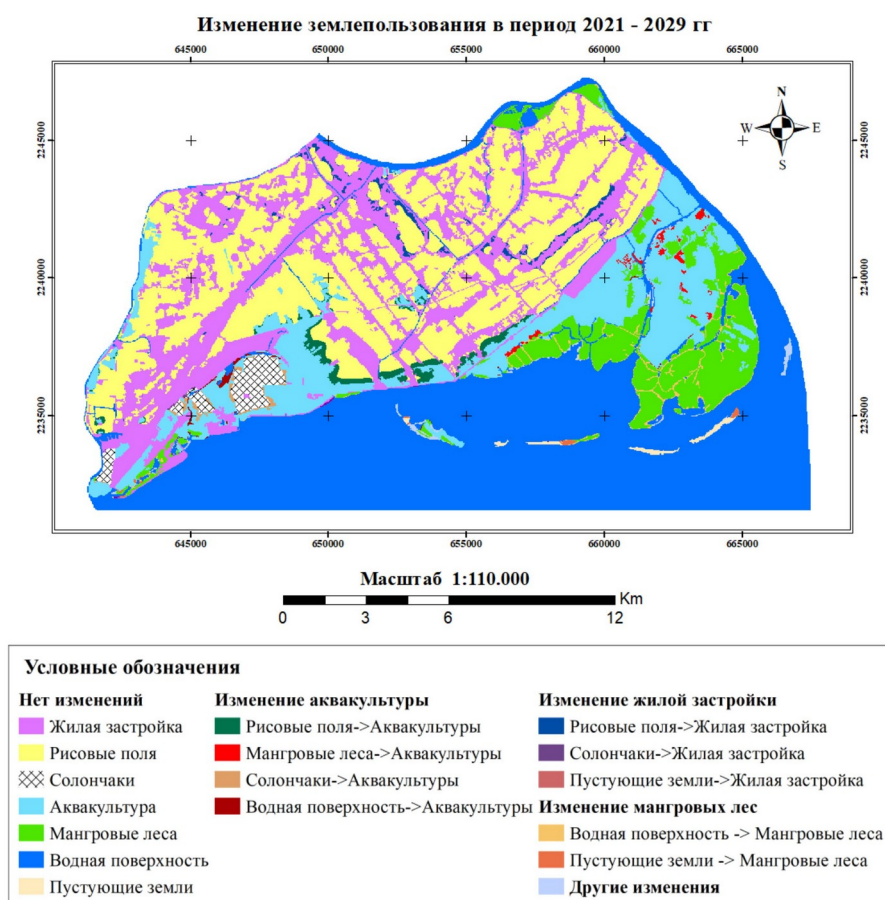


Рисунок 6 - Изменения типов землепользования на период 2021-2029 гг
DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.7>

Таблица 2 - Матрица изменений между видами землепользования в период 2021–2029 гг

DOI: <https://doi.org/10.60797/GEO.2025.4.1.8>

	Жилая застройка	Рисовые поля	Солончаки	Аквакультура	Водная поверхность	Мангровые леса	Пустующие земли	Сумма 2021
Жилая застройка	5556,95	0	0	0	0	0	0	5556,95
Рисовые поля	182,25	7574,83	0	264,6	0,45	0	0,18	8022,31
Солончаки	26,55	0	350,1	61,4	0	0	0	438,05
Аквакультура	6,96	0	0	3473,3	0	0	0	3480,23
Водная поверхность	0	0	0	47,7	11266,59	162,32	0	11476,61
Мангровые леса	0	0	0	79,82	60,57	2090,7	0	2231,04
Пустующие земли	4,77	0	0	18,6	29,7	22,05	69,03	144,15
Сумма 2021	5777,48	7574,83	350,1	3945,4	11357,31	2275,1	69,21	

Из приведенной выше статистической таблицы следует, что: прогнозы показывают, что площадь жилых застройки, земель аквакультуры и мангровых лесов увеличится. Между тем площади рисовых полей сократятся.

- Жилая застройка: результаты модели представляют собой прогнозы увеличения жилых застройки через площадь и пространство. Основываясь на результатах, показанных в таблице 2 и рисунке 4, мы видим, что площадь жилых застройки в Зяотхюи увеличивается с 5556.95 га в 2021 году до 5777.48 га в 2029 году, что соответствует уменьшению площади рисовых земель и солёных земель. Поскольку результаты модели в значительной степени зависят от входных переменных, таких как изменение плотности населения, изменение количества домохозяйств и расстояние до дорог, то жилая застройка сосредоточена в области недалеко от основного районного дороги. Кроме того, площадь застройки увеличивается и в коммунах с сильными колебаниями плотности населения и количества домохозяйств.

- Аквакультура: на основании результатов прогноза мы видим, что площадь земель аквакультуры в Зяотхюи увеличится с 3480.23 га в 2021 году до 3945.4 га в 2029 годах соответственно. В основном уменьшаются площади рисовых земель, мангровых лесов, водной поверхности и солончаки. Прогнозирование земель для аквакультуры в значительной степени зависит от почвенных условий, от переменного расстояния до дамбы, поэтому площадь преобразования от другого типа землепользования в аквакультуры также сосредоточена в районах, граничащих с внутренней и внешней частью дамбы Зяотхюи и происходит в области с высокой соленостью, на поверхности накапливается смесь рек, морей и болот. Преобразование области во внутренней части дамбы происходит в значительной степени в рисовые поля и солончаки, по той причине, что входом модели являются фактические события с 2013 по 2021 год в Зяотхюи — сильный переход рисовых полей, прилегающих к дамбе загрязнен засолением, поэтому это создает трудности для выращивания риса, а аквакультура приносит больше прибыли, чем производство соли и выращивания риса. Преобразование типа землепользования к аквакультуре вне дамб в основном происходит в области мангровых лесов, смешанных с аквакультурой.

Заключение

Результаты прогноза землепользования на 2029 год являются объективной прогнозной информацией, поскольку они основаны на фактической информации об использовании земель в прошлые периоды, а также на информации о демографических и природных факторах. Для модели изменения земель (LCM) индекс общей точности Каппа равен 0.86, что свидетельствует о высокой надежности модели. Результаты прогнозирования землепользования в районе Зяотхюи показывают, что площадь земли под застройку увеличивается за счет перехода из рисовых полей. Исходя из этого, ориентация планирования землепользования должна уделять внимание развитию жилой застройки, включающая в себя общественные работы, индустриальные парки, систему транспортной инфраструктуры. Однако это необходимо использовать экономно и эффективно.

Результаты прогноза землепользования на 2029 год показывают как количественное, так и детальное пространственное распределение. Эта информация полезна для корректировки планов планирования и землепользования на следующем этапе развития района Зяотхюи. Однако для разработки и корректировки разумного

плана землепользования требуется много другой информации, особенно информации о политике в исследуемой области.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Veldkamp A. Modelling land use change and environmental impact. / A. Veldkamp, P.H. Verburg // Journal of Environmental Management. — 2004. — № 72 (1-2). — P. 1–3.
2. Leta M.K. Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. / M.K. Leta, T.A. Demissie // Sustainability. — 2021. — № 13 (7). — P. 1–23. — DOI: 10.3390/su13073740
3. Wnęk A. National Level Land-Use Changes in Functional Urban Areas in Poland, Slovakia, and Czechia. / A. Wnęk, D. Kudas, P. Stych // Land. — 2021. — № 10 (1). — P. 1–16.
4. Riad P. Landscape transformation processes in two large and two small cities in Egypt and Jordan over the last five decades using remote sensing data. / P. Riad, S. Graefe, H. Hussein // Landscape and Urban Planning. — 2020. — Vol. 197. — DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103766
5. Serra P. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. / P. Serra, X. Pons, D. Saurí // Applied Geography. — 2008. — № 28 (3). — P. 189–209. — DOI: 10.1016/j.apgeog.2008.02.001
6. Shafizadeh-Moghadam H. Transition index maps for urban growth simulation: application of artificial neural networks, weight of evidence and fuzzy multi-criteria evaluation. / H. Shafizadeh-Moghadam, M. Helbich, A. Tayyebi // Environmental Monitoring and Assessment. — 2017. — № 189 (6). — P. 189–300. — DOI: 10.1007/s10661-017-5986-3
7. Azari M. Integrating Cellular Automata, Artificial Neural Network and Fuzzy Set Theory to Simulate Threatened Orchards: Application to Maragheh, Iran. / M. Azari, A. Tayyebi, M. Helbich // GIScience & Remote Sensing. — 2016. — № 53 (2). — P. 183–205. — DOI: 10.1080/15481603.2015.1137111
8. Girma H. Land Use Land Cover Change Modeling by Integrating Artificial-Neural-Network with Cellular Automata-Markov Chain Model in Gidabo River Basin, Main Ethiopian Rift. / H. Girma, Ch. Fürst, A. Moges // Environmental Challenges. — 2021. — № 6 (10). — P. 1–15. — DOI: 10.1016/j.envc.2021.100419
9. Gharaibeh A. Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. / A. Gharaibeh, A. Shaamala, R. Obeidat // Heliyon. — 2020. — № 6 (9). — P. 1–18. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05092
10. Нгуен В.Н. Разработка методики обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам многозональных космических съёмок dis.. ...Doctor of Sciences: 25.00.34 : защищена 2018-06-10 : утв. 2018-06-18 / В.Н. Нгуен. — Москва: 2018. — 110 с.
11. Сурков Ф.А. Применение формализма клеточных автоматов и марковских цепей к моделированию процессов, изучаемых с помощью космического мониторинга. / Ф.А. Сурков // Геоинформационные технологии и космический мониторинг. — 2019. — № 4. — С. 48–51. — DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-48-51

Список литературы на английском языке / References in English

1. Veldkamp A. Modelling land use change and environmental impact. / A. Veldkamp, P.H. Verburg // Journal of Environmental Management. — 2004. — № 72 (1-2). — P. 1–3.
2. Leta M.K. Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. / M.K. Leta, T.A. Demissie // Sustainability. — 2021. — № 13 (7). — P. 1–23. — DOI: 10.3390/su13073740
3. Wnęk A. National Level Land-Use Changes in Functional Urban Areas in Poland, Slovakia, and Czechia. / A. Wnęk, D. Kudas, P. Stych // Land. — 2021. — № 10 (1). — P. 1–16.
4. Riad P. Landscape transformation processes in two large and two small cities in Egypt and Jordan over the last five decades using remote sensing data. / P. Riad, S. Graefe, H. Hussein // Landscape and Urban Planning. — 2020. — Vol. 197. — DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103766
5. Serra P. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. / P. Serra, X. Pons, D. Saurí // Applied Geography. — 2008. — № 28 (3). — P. 189–209. — DOI: 10.1016/j.apgeog.2008.02.001
6. Shafizadeh-Moghadam H. Transition index maps for urban growth simulation: application of artificial neural networks, weight of evidence and fuzzy multi-criteria evaluation. / H. Shafizadeh-Moghadam, M. Helbich, A. Tayyebi // Environmental Monitoring and Assessment. — 2017. — № 189 (6). — P. 189–300. — DOI: 10.1007/s10661-017-5986-3
7. Azari M. Integrating Cellular Automata, Artificial Neural Network and Fuzzy Set Theory to Simulate Threatened Orchards: Application to Maragheh, Iran. / M. Azari, A. Tayyebi, M. Helbich // GIScience & Remote Sensing. — 2016. — № 53 (2). — P. 183–205. — DOI: 10.1080/15481603.2015.1137111

8. Girma H. Land Use Land Cover Change Modeling by Integrating Artificial-Neural-Network with Cellular Automata-Markov Chain Model in Gidabo River Basin, Main Ethiopian Rift. / H. Girma, Ch. Fürst, A. Moges // *Environmental Challenges*. — 2021. — № 6 (10). — P. 1–15. — DOI: 10.1016/j.envc.2021.100419
9. Gharaibeh A. Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. / A. Gharaibeh, A. Shaamala, R. Obeidat // *Heliyon*. — 2020. — № 6 (9). — P. 1–18. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05092
10. Nguen V.N. Razrabotka metodiki obnaruzheniya i prognozirovaniya zameshheniya vidov zemlepol'zovaniya na vodonepronitsaemy'e poverxnosti po materialam mnogoazonal'ny'x kosmicheskix s"yomok [Development Of A Method For Detection And Forecasting Substitution Of Land Use Types With Waterproof Surfaces Based On Multi-Zone Space Surveys] dis.....of PhD in Natural sciences: 25.00.34 : defense of the thesis 2018-06-10 : approved 2018-06-18 / B.H. Hryen. — Moscow: 2018. — 110 p. [in Russian]
11. Surkov F.A. Primenenie formalizma kletochny'x avtomatov i markovskix cepej k modelirovaniyu processov, izuchaemy'x s pomoshh'yu kosmicheskogo monitoringa [Application of the formalism of cellular automata and Markov chains to modeling processes studied using space monitoring]. / F.A. Surkov // *Geoinformation technologies and space monitoring*. — 2019. — № 4. — P. 48–51. — DOI: 10.23885/2500-123X-2019-2-4-48-51 [in Russian]