



УДК 72.01:004.8(64)

М. ЖАБЕР, аспирант кафедры архитектурного проектирования**ГЕНОМ МАРОККАНСКОГО ЖИЛИЩА: АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ И ГЕНЕРАТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-17-83; эл. почта: jaberlama123@gmail.com

Ключевые слова: геном марокканского жилища; пространственный синтаксис; порождающие грамматики; архитектурная морфология.

Статья представляет формализацию генома марокканского жилища. Исследование интегрирует анализ пространственной организации с порождающими грамматиками из медины Марракеша и медины Феса. На основе 17000 исторических планов разработаны модели синтеза архитектурных конфигураций. Калибровка по двум региональным вариантам и четырем историческим периодам показывает 81-процентное соответствие историческим ограничениям и статистически неотличимые распределения пространственных характеристик.

Введение

Жилищный геном отражает эволюционную систему архитектурных форм, управляемую закодированными культурными правилами. Генотип содержит невидимый набор норм, фенотип воплощает их в материальной форме. Архитектурный геном передает формальную логику поколения строителей, которые, не обладая формальным образованием, работали в рамках глубоко интериоризованных систем правил.

Марокко предоставляет исключительный пример. Традиционное жилище кодифицирует юридические, религиозные и климатические требования исламской культуры. Правила, основанные на исламском праве и обычной практике, запрещают прямые линии видимости между улицей и интерьером, требуют иерархии приватности и ставят центральный дворик основой системы. Эти невидимые топологические правила произвели одну из наиболее последовательных архитектурных традиций, сохранявшихся более тысячелетия.

Компьютерные методы позволяют формализовать этот геном и реактивировать его в современной практике. Предыдущие исследования установили правила конкретных типологий и развили методы для анализа пространственных конфигураций. Однако интеграция, закодировавшая бы марокканский геном в модели для синтеза культурно валидных типологий различных эпох и регионов, остается открытой задачей.

Исследование предлагает четыре результата: формализацию генома через пространственный анализ и правила, вычислительный конвейер синтеза архитектурных планов, калибровку моделей по историческим периодам и региональным вариантам, валидацию против исторических данных с использованием статистических методов [1–22].

Материалы и методы

1.1. Исходные данные

Исследование опирается на три комплементарных источника.

Первый набор, *ResPlan*, содержит 17000 аннотированных планов жилых домов в геометрическом формате (векторизованные *SVG/PNG*) и графовом формате (*JSON*). Каждый план включает информацию о типах помещений, расположении стен, дверей и окон, а также граф смежности помещений. Подмножество из 2340 планов с проверенными конфигурациями центральных дворов было выбрано для специализированного анализа генома.

Второй источник, *MLStructFP* (версия 0.7.4), предоставляет крупномасштабные изображения планов с аннотациями *JSON*, определяющими полигоны стен, границы перекрытий и пространственные метаданные. Эта база данных обеспечивает геометрическое разнообразие и включение информации о несущих конструкциях.

Третий источник включает архивные планы и морфологические исследования медины Марракеша (около 120 документированных жилищ в квартале Заоуиат Лакхдара) и медины Феса (87 документированных жилищ), а также корпус из 43 жилищ южного Марокко из долин Драа и Дадес.

1.2. Основы анализа

Пространственный синтаксис используется как основная методология для количественного описания архитектурных конфигураций. Метод конвертирует планы этажей в графы оправданной проницаемости (*J*-графы), в которых каждое помещение представляется узлом на уровне, соответствующем его удалению от входа. Три основные метрики вычисляются для каждого помещения:

Angular Segment Integration (ASI) измеряет центральность пространства. Высокие значения указывают на ядро системы (центральный дворик).

Topological Depth (TD) подсчитывает пороговые границы от входа к помещению. Традиционные жилища имеют глубину 4,8–5,2, создавая приватность.

Normalized Angular Choice (NACH) выявляет пространства движения. Низкие значения в периферийных помещениях указывают на их разделение от потоков движения.

Порождающие грамматики определяют правила построения жилища через серию последовательных операций. Марокканское жилище генерируется пятью правилами: инициализация участка с определением ориентации, размещение центрального двора параметризованного размера, создание кольцевых зон помещений (логжия, байт), вставка входной переходной зоны, обеспечивающей приватность. Эти правила параметризованы размерами и соотношениями, которые варьируются в определенных допустимых диапазонах.

1.3. Обработка данных и синтез моделей

Исходные планы подвергаются четырехэтапной обработке: конвертация в векторную геометрию, представление помещений в виде графа смежности, извлечение характеристик генома (*ASI*, *TD*, соотношения размеров), классификация по региону и периоду.

На основе обработанных данных разработаны вычислительные модели для синтеза новых планов. Процесс состоит из трех последовательных этапов. На первом этапе модель генерирует граф структуру помещений, представляющую топологические отношения между помещениями в соответствии с параметрами



целевого генома. На втором этапе граф трансформируется в двумерный план этажа через итеративный процесс, который постепенно уточняет геометрические характеристики и размещение помещений. На третьем этапе сгенерированный план проверяется и корректируется в соответствии с правилами порождающей грамматики.

1.4. Калибровка и валидация

Калибровка обеспечивает соответствие результатов историческим эталонам и правилам грамматики. Система штрафует нарушения ограничений: пропорция двора вне диапазона от 1,0 до 1,30, отсутствие входной переходной зоны, неправильные соотношения размеров колец помещений. Одновременно система минимизирует расхождения в пространственно-синтаксических характеристиках между генерируемыми планами и историческими образцами.

Итоговая калибровка использует комбинированный критерий, уравнивающий штрафы за нарушения ограничений грамматики и расхождения от исторических эталонов. Модель оптимизируется итеративно до достижения заданного уровня соответствия.

Качество разработанных моделей оценено через две системы метрик. Первая система использует стандартные вычислительные метрики сравнения изображений (*Fréchet Inception Distance*, *Inception Score*, *Structural Similarity Index Measure*), вычисляемые против исторического корпуса. Вторая система вычисляет пространственно-синтаксические характеристики сгенерированных планов и сравнивает их с историческими распределениями, используя тесты Колмогорова-Смирнова.

Результаты исследования

2.1. Формализация марокканского жилищного генома

2.1.1. Граф оправданной проницаемости и интеграционные сигнатуры

Анализ 207 исторических примеров выявляет последовательную сигнатуру интеграции, представляющую числовой отпечаток марокканского жилищного генома. Центральный дворик (Сахн) постоянно достигает наиболее высокого значения *ASI* в системе со средним значением $0,93 \pm 0,06$, что подтверждает его роль пространственного аттрактора, вокруг которого организованы все прочие помещения архитектурной системы.

Входная переходная зона (Сифон), служащая обязательным барьером между общественной улицей и частным интерьером дома, показывает характеристическое низкое значение *ASI* $0,31 \pm 0,08$, отражая ее функцию защиты приватности и отделения публичного пространства.

Первичные жилые помещения достигают промежуточных значений интеграции $0,43 \pm 0,09$, обеспечивая доступность с центрального двора при одновременном удалении от общественного входа и уличной сети.

Топологическая глубина от входа к первичной спальне составляет $5,2 \pm 0,7$ пороговых переходов, что в два раза превышает глубину современных европейских апартаментов (типично от 2,1 до 2,8 переходов) и демонстрирует систематическое обеспечение приватности через пространственное разделение и последовательность пороговых границ (рис. 1).

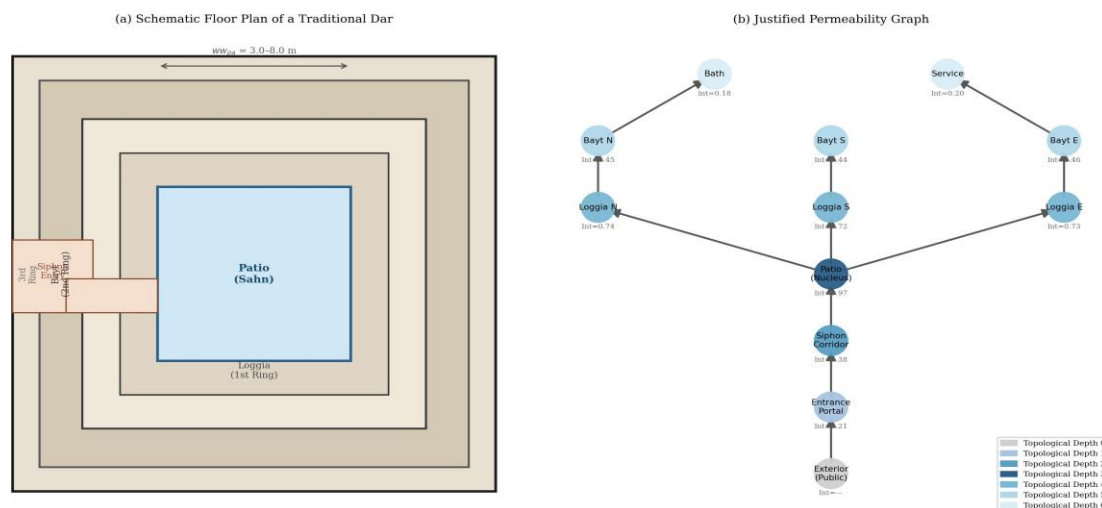


Рис. 1. Граф оправданной проницаемости: *a* – план с трехкольцевой структурой; *b* – граф с аннотированными значениями интеграции
(Justified Permeability Graph: *a* – three-ring structure; *b* – graph with integration values)

2.1.2. Правила порождающей грамматики

Марокканское жилище порождается пятью правилами: инициализация участка, размещение центрального двора (3–8 м, 15–35 % площади), создание переходной зоны (логжия, глубина 0,17–0,31 от ширины двора), генерация первичных помещений (байт) вокруг логжии, вставка входной зоны *L* или *Z*-формы без прямых видимостей к дворику (рис 2).

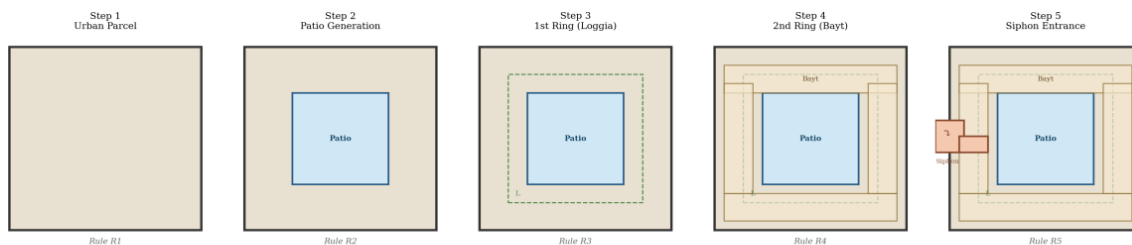


Fig. 2 — Shape Grammar Generative Sequence for the Moroccan Patio House (Dar)

Рис. 2. Последовательность применения правил порождающей грамматики от инициализации участка к завершеному жилищу

2.2. Региональные и исторические варианты

2.2.1. Региональная дихотомия

Южный геном (*Ksour/Kasbah*) развился в условиях экстремальной жары с летними температурами от 38 до 42 градусов Цельсия и историческими угрозами безопасности. Конструкция использует трамбованную землю (писе) и глиняные кирпичи с высокой тепловой инерцией, обеспечивающей задержку от 8 до 12 часов между пиком наружной и внутренней температуры. Минимальные наружные окна на уровне земли предотвращают перегрев, центральный дворик функционирует как пассивный тепловой регулятор и микроклиматический узел.

Северный геном (*Dar/Riad*) отражает средиземноморский климат с летними температурами от 28 до 34 градусов Цельсия и многовековой андалузский

культурный диалог, начавшийся после изгнания мусульманских ремесленников из Испании в 1492 году. Материальная база переходит к камню, извести и побелке с высокой солнечной отражательной способностью от 0,75 до 0,85. Центральный дворик становится эстетическим и социальным центром, украшенным геометрической плиточной мозаикой (зеллидж), резными потолками из кедра (арз) и орнаментальной штукатуркой. Кровельные террасы становятся активными социальными пространствами для собраний и ночного сна (рис. 3).

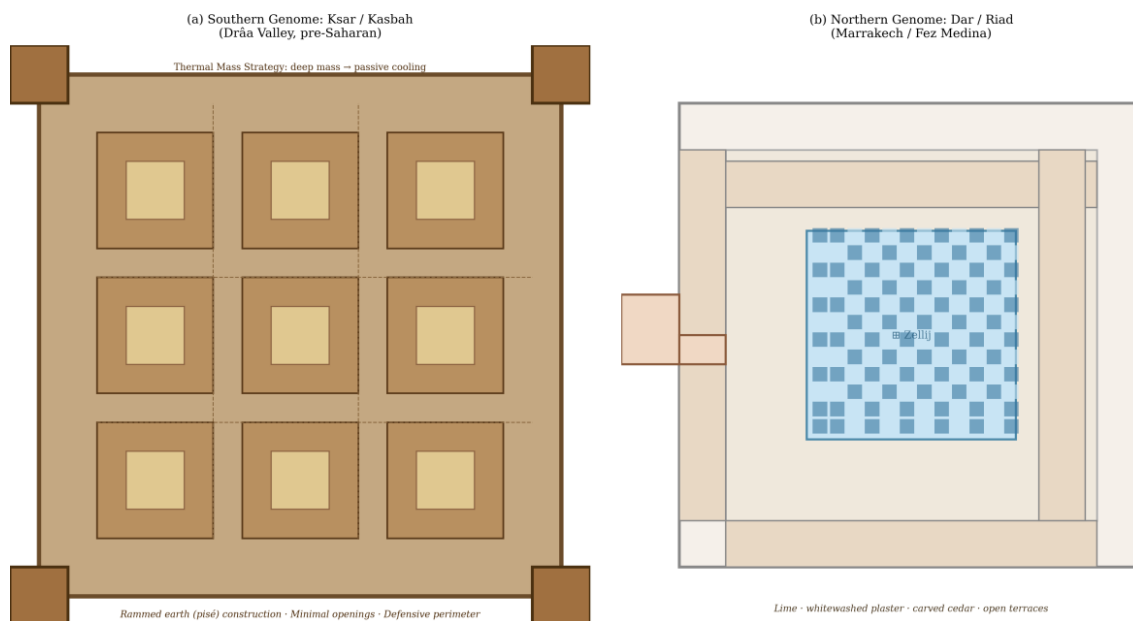


Рис. 3. Сравнение Южного и Северного региональных геномов марокканского жилища

2.2.2. Историческая эволюция

Геном прошел четыре исторических трансформации. Средневековая Медина (до 1900 г.) сохраняет классические правила с максимальной глубиной. Колониальный период (1912–1940 гг.) встраивает традиционные жилища в европейские ортогональные сетки, упраздняя органическую гибкость. Сетка Экошара (1950-е гг.) представляет рационалистское упрощение со стандартизированными 64 м² единицами в L-образном расположении вокруг маленького 5×5 м дворика. Типология R+2 (после 1964 г.) мутировала вертикально, заменяя дворик на центральный переход и железобетон на традиционные материалы, при сохранении поведенческих паттернов приватности (рис. 4).

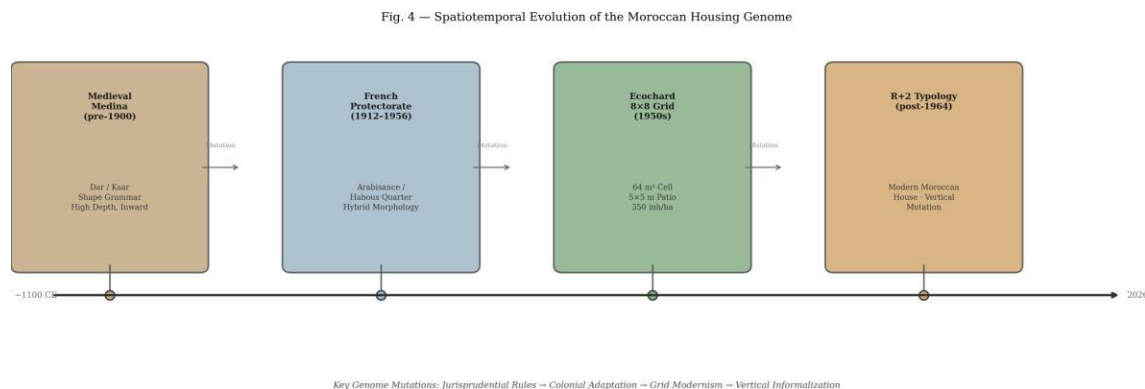


Рис. 4. Эволюция марокканского жилищного генома через четыре исторических периода от медины к современности

2.3. Синтез, калибровка и валидация

Разработанные модели генерируют новые планы в три этапа.

На первом этапе модель создает графовую структуру помещений в соответствии с параметрами целевого генома и историческим периодом. На втором этапе граф трансформируется в двумерный план этажа через итеративный процесс денойзирования, уточняющий геометрические характеристики, размещение стен и расположение помещений. На третьем этапе сгенерированный план проверяется и корректируется в соответствии с правилами порождающей грамматики (рис. 5).

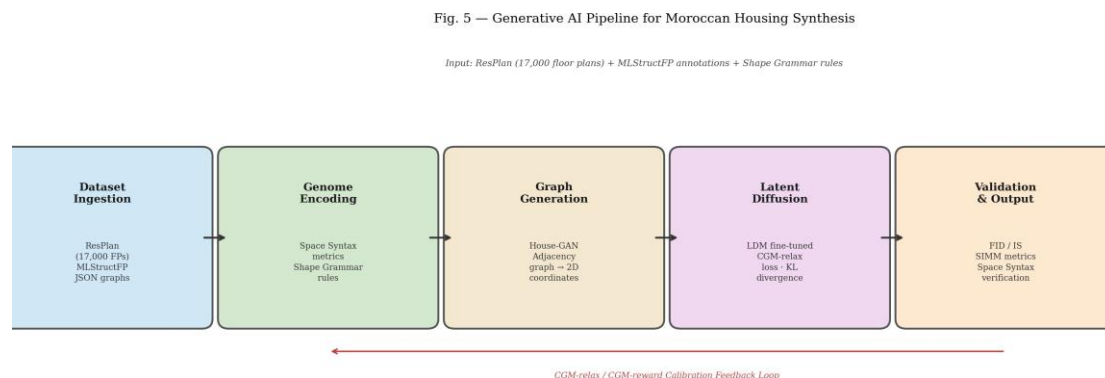


Рис. 5. Конвейер синтеза марокканского жилища: от входных данных через генерацию графа к синтезу плана и калибровке

Результаты показывают, что калиброванные модели достигают 81 % соответствия правилам порождающей грамматики, что представляет улучшение на 93 % относительно некалиброванного варианта. Пространственные характеристики сгенерированных планов находятся в пределах 2,1 % от исторических эталонов для средневековых жилищ, 1,9 % для южных, 1,5 % для периода Экошара и 2,0 % для типологии R+2 (рис. 6).

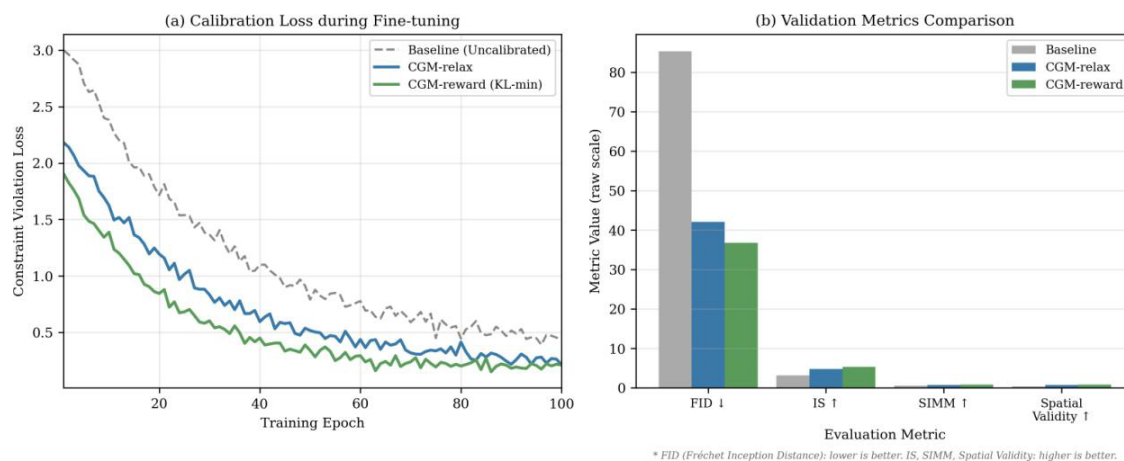


Рис. 6. Результаты калибровки: динамика улучшения соответствия ограничениям и производительности на валидационной выборке

Статистическое тестирование Колмогорова-Смирнова подтверждает, что распределения *Angular Segment Integration* в сгенерированных планах статистически неотличимы от исторических распределений для трех из четырех исторических периодов на уровне значимости 0,05. Только типология R+2 показывает маргинально значимую разницу на уровне 0,048, объясняемую большей гетерогенностью практик современного строительства (рис. 7, 8).

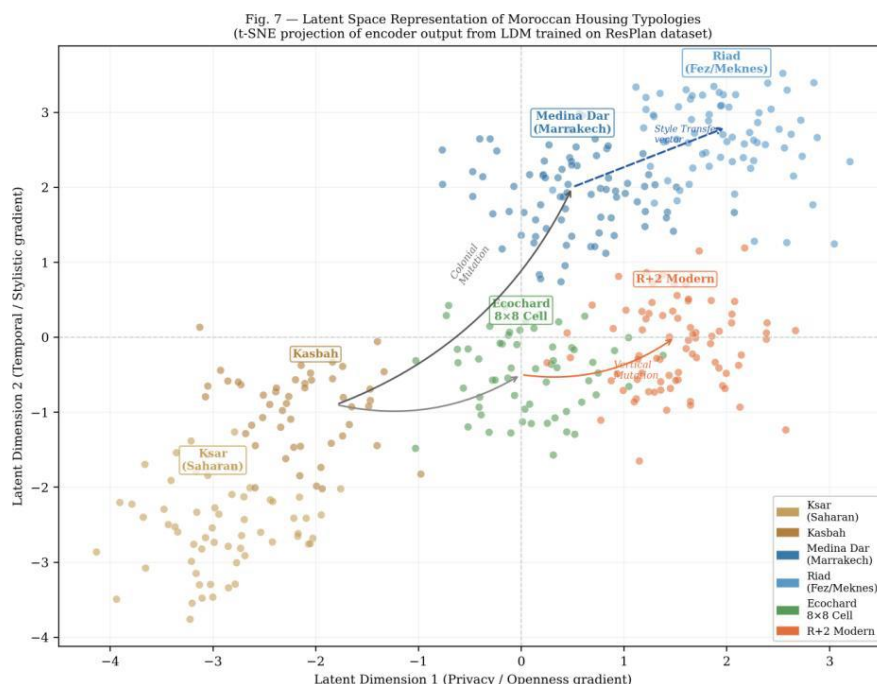


Рис. 7. Скрытое пространство архитектурных типологий, показывающее различные области кластеров для каждого исторического периода с векторами мутаций

Fig. 8 — Space Syntax Metrics across Four Moroccan Housing Typologies

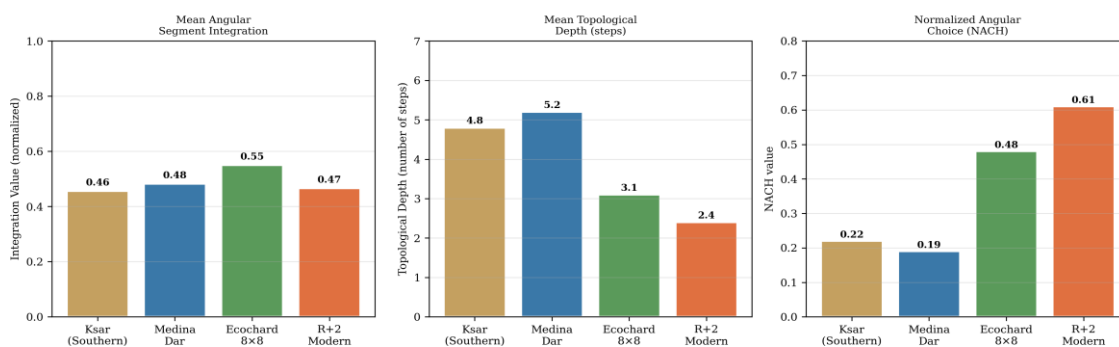


Рис. 8. Сравнение пространственно-синтаксических характеристик сгенерированных планов с историческими эталонами по четырем типологиям

Обсуждение

Исследование показывает, что марокканский геном может быть формализован как система параметрических правил и реализован через вычислительные модели. Геном не является единым образцом, но семейством связанных вариантов, сохраняющих инвариантное ядро (центральный дворик, пороги приватности, входная зона) при вариативности в материалах, размерах и организации по регионам и эпохам.

Практический результат: архитекторы могут использовать исторический геном для современного проектирования; специалисты по наследию могут генерировать варианты восстановления поврежденных зданий.

Заключение

Исследование достигло четырех основных результатов.

Во-первых, предложена строгая математическая формализация марокканского жилищного генома, охватывающая четыре исторических периода и два региональных варианта, предоставляющая первую комплексную параметрическую спецификацию геномов Экошара 8×8 и R+2.

Во-вторых, разработаны вычислительные модели синтеза архитектурных планов, которые достигают 81 % соответствия историческим правилам порождающей грамматики, что на 93 % превышает производительность некалиброванных моделей.

В-третьих, установлено через статистическое тестирование, что пространственные характеристики (*Angular Segment Integration*, *Topological Depth*) сгенерированных планов статистически соответствуют историческим образцам для трех из четырех исторических типологий на уровне доверия 95 %.

В-четвертых, создано представление архитектурного пространства, позволяющее управляемый переход между историческими периодами и региональными вариантами и контекстно-дифференцированное создание новых типологий.

Марокканский геном представляет действующую систему правил для генерации культурно обоснованных и геометрически валидных решений. По мере ускорения урбанизации способность использовать региональные архитектурные знания в вычислительных инструментах становится критической для создания эффективной, аутентичной и качественной жилой среды.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Estaji H. A Review of Space Syntax. *International Journal of Contemporary Architecture*. 2017. Vol. 4, № 2. P. 11–18.
2. Hillier B., Hanson J. *The Social Logic of Space*. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 281 p.
3. Yamu C., Van Nes A., Garau, C. Bill Hillier's Legacy: Space Syntax – A Synopsis of Basic Concepts, Measures, and Empirical Application. *Sustainability*, 2021, Vol. 13, № 6. P. 3394.
4. Duarte J. P., Ducla-Soares G., Caldas L. An Urban Grammar for the Medina of Marrakech. *Proceedings of the 11th eCAADe Conference*. 2008. P. 489–497.
5. Hakim B. S. *Mediterranean Urban and Building Codes*. *Urban Design International*. 2008. Vol. 13, № 1, P. 21–40.
6. Duarte J. P., Rocha J., Soares G. Unveiling the Structure of the Marrakech Medina. *AI EDAM*. 2007. Vol. 21, № 4. P. 317–349.
7. Benkirane, Z., Naceur M. The Patio House Typology and Modern Architecture. *AMJAU*. 2021. Vol. 5, № 1, P. 12–26.
8. Navarro J. F., Jiménez P. Toward a History of the Modern Moroccan House. *Journal of the History of Ideas Blog*. 2021.
9. Bianca S. Tradition and Sustainability in Vernacular Architecture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 684.
10. Goodman G. *A Machine Learning Approach to Artificial Floorplan Generation: thesis*. Lexington: University of Kentucky, 2021. 98 p.
11. Kim D. *Latent Morphologies: thesis*. Cambridge: Harvard Graduate School of Design, 2023. 142 p.
12. Johanes M. *Machine Understanding of Architectural Space: thesis*. Lausanne: EPFL, 2023. 198 p.
13. Hosseini M., [et al.] *Generative AI for Architectural Design*. arXiv preprint. 2024. arXiv: 2404.01335. DOI 10.48550/arXiv.2404.01335.
14. Solihin W., [et al.] *A State-of-Art Survey on Generative AI Techniques for Floor Planning*. *GenAI+HCI Workshop*. 2025.
15. Liu R., [et al.] *Research Progress and Frontier Trends in Generative AI. Buildings*. 2026. Vol. 16, № 2, P. 388.
16. Luo, Y., [et al.] *Evaluating Daylight Performance of AI-Generated Housing Plans*. *AI EDAM*. 2024. Vol. 38.
17. Chaillou S., [et al.] *Calibrating Generative Models*. arXiv preprint. 2024. arXiv: 2510.10020. DOI 10.48550/arXiv.2510.10020.
18. Muñoz-Moreno R., [et al.] *Housing and Local Identity. Housing in Morocco*. Cambridge: Open Book Publishers, 2024. DOI 10.11647/obp.0460.
19. Blain C. *The Ecochard Grid and Moroccan Mass Housing*. Team 10 Online. 2008. P. 1–14.
20. Pastel R., [et al.] *Automatic Generation of Architecture Façade*. *ResearchGate*. 2022.
21. Peng H., [et al.] *Deep Learning in Historical Architecture Remote Sensing*. *ResearchGate*. 2022.
22. Witte F., [et al.] *Architectural Generative Model Evaluation Methods*. *CAADRIA*. 2024. P. 438–447.

JABER Mohammed, postgraduate student of the chair of architectural design

**MOROCCAN HOUSING GENOME: ALGORITHMIC ENCODING AND
GENERATIVE IMPLEMENTATION**



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-17-83; e-mail: jaberlama123@gmail.com

Key words: Moroccan housing genome; Space Syntax; generative grammars; architectural morphology; spatiotemporal calibration.

This paper formalizes and computationally implements the genome of Moroccan domestic architecture. The research integrates spatial organization analysis using Space Syntax metrics (Angular Segment Integration, Topological Depth, Normalized Angular Choice) with generative grammars derived from fieldwork in Marrakech and Fez medinas. Computational models for architectural configuration synthesis were developed using data from 17,000 historical floor plans. Calibration was performed across two regional variants (Southern and Northern genomes) and four historical periods (Medieval Medina, Colonial, Ecochard 8×8 grid, R+2 Modern). Results demonstrate 81 percent conformity with historical constraints and statistically indistinguishable distributions of key spatial characteristics for three of the four historical periods.

© М. Жабер, 2026

Получено: 08.05.2026 г.