

Клеточные автоматы в задаче моделирования роста городского населения

Скороходов А.С.
МГУ им. М.В. Ломоносова,
кафедра математических методов
прогнозирования, 417 группа
`s02200480@gse.cs.msu.ru`
Гуров С.И.
доцент, к. ф.-м. н.
МГУ им. М.В. Ломоносова
ф-т ВМК, кафедра ММП
`sgur@cs.msu.ru`

Аннотация

Клеточные автоматы (КЛА) - это модели, которые генерируют крупномасштабный паттерн из мелкомасштабных локальных процессов. КЛА используют сетчатую структуру в качестве поля для вычислений своих состояний. Последовательные состояния ячеек, расположенных на сетке, вычисляются в соответствии с набором правил. Переходы состояний зависят от состояния отдельных ячеек и состояния ячеек в локальной окрестности. Клеточные автоматы применяются в качестве подхода к моделированию во многих научных дисциплинах и используются в задаче моделирования живых процессов как один из наиболее популярных типов моделей для изучения пространственных процессов в динамике. В работе я обсуждаю основные области применения КЛА в моделировании живых процессов с акцентом на градостроительное моделирование.

1 Введение

Клеточные автоматы (КЛА) - это пространственно-временные дискретные системы, которые могут моделировать динамические сложные системы. На сегодняшний день известно множество проблемных областей, где были успешно применены КЛА.

Различные клеточные автоматы могут демонстрировать весьма разнообразное поведение, которое может быть адаптировано для целей обработки информации за счет выбора (а) закона изменения состояния элемента и (б) конкретного определения понятия "ближайшие соседи".

Клеточные автоматы (КЛА) - один из наиболее распространенных методов, используемых для моделирования процесса урбанизации. Городские модели на основе КЛА используют правила перехода для получения пространственных моделей роста городов и городской динамики с течением времени.

Город представляет собой типичную сложную систему, которая характеризуется свойством самоорганизации. Понимание процесса городского развития крайне важно при планировании городского развития и управлении устойчивым ростом. Процесс городского развития включает в себя множество действующих лиц, различные модели поведения и различную политику, что приводит к их пространственным и временным сложностям. Технология клеточных автоматов (КЛА) привлекает все больше внимания благодаря своей простоте, прозрачности и широким возможностям динамического пространственного моделирования.

В этой работе будет совершена попытка построения модели Клеточного Автомата симулирующего процесс развития города с ростом населения, вывод необходимых параметров, точно описывающих задачу.

2 Постановка задачи

Заданы: начальное заселение территории, расположение рек, транспортных магистралей, дорог и железнодорожного сообщения. Необходимо построить модель Клеточного Автомата моделирующую за N итераций рост города согласно базовым правилам распространения КЛА и их модернизации.

В работе будут рассмотрены две модели:

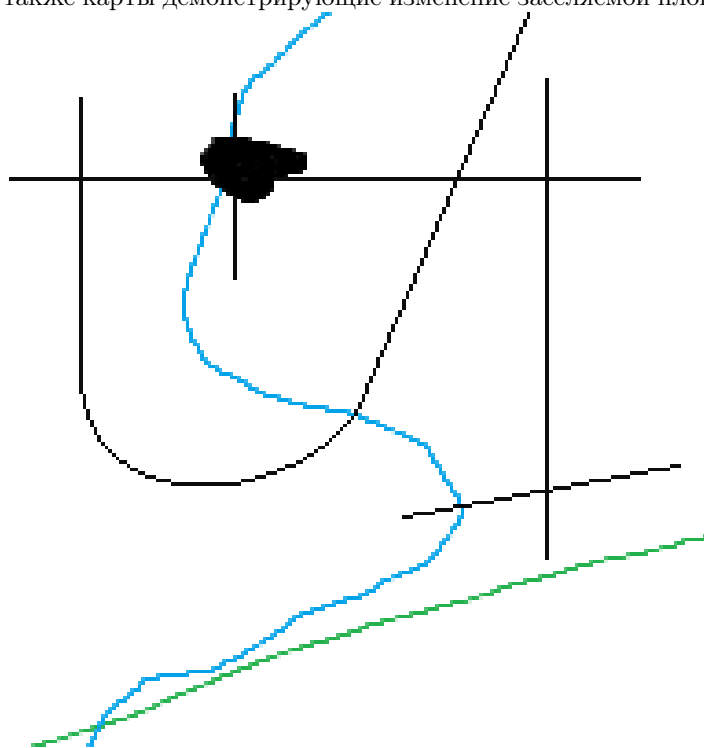
1) модель по большей части опирающаяся на базовый принцип клеточных автоматов, то есть вердикт о заселении той или иной клетки будет приниматься исходя из расположения соседних заселенных клеток, ближайших транспортных магистралей и жизненно необходимых ресурсов.

2) Усовершенствованная модель, сильно меньше опирающаяся на базовые правила КЛА, использующая только принцип окрестности и пошаговую смену состояния. В данной модели расстояние до ближайших дорог, рек и прочих необходимых инфраструктурных объектов используется не как пространственная характеристика, влияющая на конкретную клетку только если соседствует с ней, а как вещественный или бинарный признак. В результате каждая клетка на текущем ходу будет получать нечто вроде «престижа». Вердикт о заселении клетки определяется пороговой функцией. Это модель наиболее перспективна, поскольку позволяет добавлять сколько угодно новых признаков, представляющих те или иные объекты инфраструктуры, особенности ландшафта, ограничение на застройку и т.д.

3 Данные

Будет проведено по 2 эксперимента для каждой модели — базовой и продвинутой.

В первом случае была взята деревня Федьковка Невьянского городского округа Свердловской области — это локация будет рассматриваться в прошлое. Есть данные за несколько десятилетий об изменении численности населения, а также карты демонстрирующие изменение заселяемой площади.



(Рис. 1) Деревня Федьковка; Линии черного цвета - автомобильные дороги; Линии синего цвета - реки; Линии зеленого цвета - ЖД-пути; Скопления точек черного цвета - начальное заселение территории

Второй локацией выбран город Иннополис республики Татарстан — моделирование этого случая будет производиться в будущем, в качестве примера будет использован план развития города за какой-то промежуток времени.



(Рис. 2) Город Иннополис; Линии черного цвета - автомобильные дороги; Линии синего цвета - реки; Линии зеленого цвета - ЖД-пути; Скопления точек красного цвета - начальное заселение территории

4 Эксперименты

Проведем эксперименты на двух представленных населенных пунктах - на более сложном и более простом. Количество итераций клеточного автомата будем подбирать вручную - сопоставление одной итерации конкретному временному промежутку это отдельная задача, которую планируется решить в будущих работах.

Для замера качества будем использовать две метрики - обычную Accuracy как долю верно классифицированных ячеек клеточного автомата, Precision, Recall и F1.

4.1 Базовая модель

Разделим объекты на карте населенного пункта, на несколько групп - транспортные магистрали, ЖД сообщение, реки/водоемы, дома(т.е. заселенные

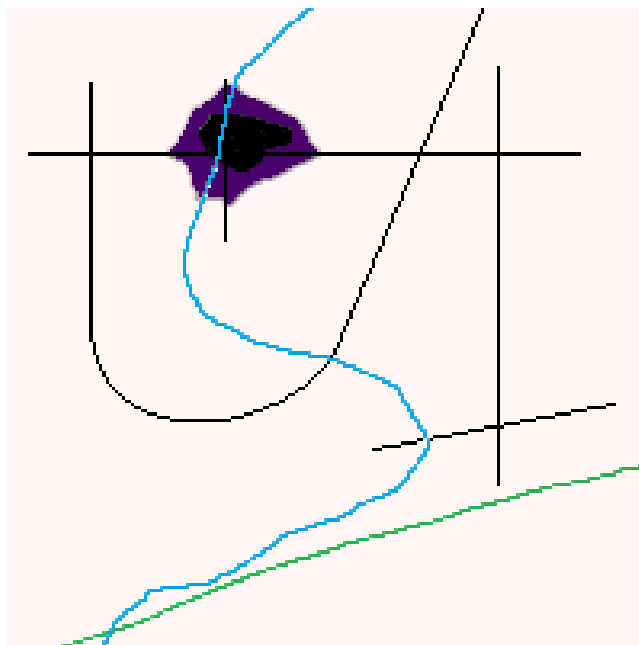
клетки). Их объединение - поле клеточного автомата. Клеточный автомат обновляет все свои ячейки каждый момент времени. Правила обновления ячеек выражаются правилами вида «если - то». Вот некоторые из них:

Если в окрестности Мура(8 ближайших соседних клеток с текущей) существуют три или более заселенных ячеек(закрашенных), **то** текущая ячейка переводится в класс заселенных(т.е. закрашивается).

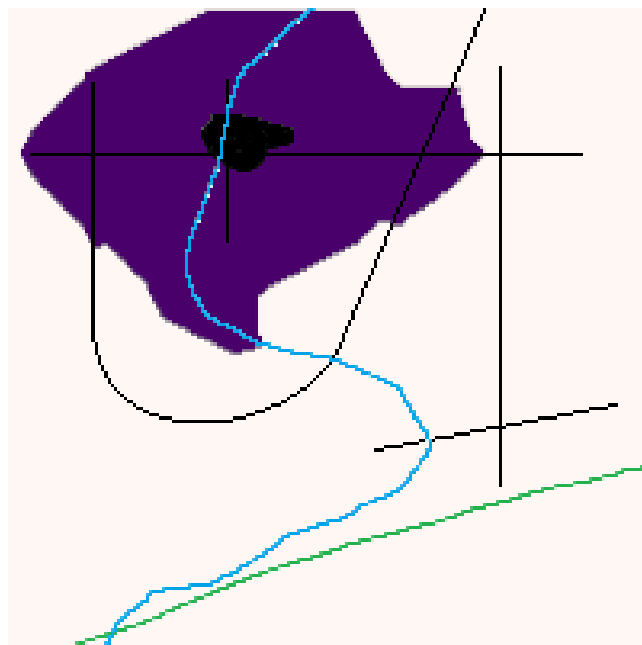
Если в окрестности Мура существуют хотя бы 2 заселенные ячейки и хотя бы 1 клетка реки, **то** текущая ячейка переводится в класс заселенных.

Если в окрестности Мура существует 1 заселенная ячейка и хотя бы 1 ячейка ЖД-путей, **то** текущая ячейка переводится в класс заселенных.

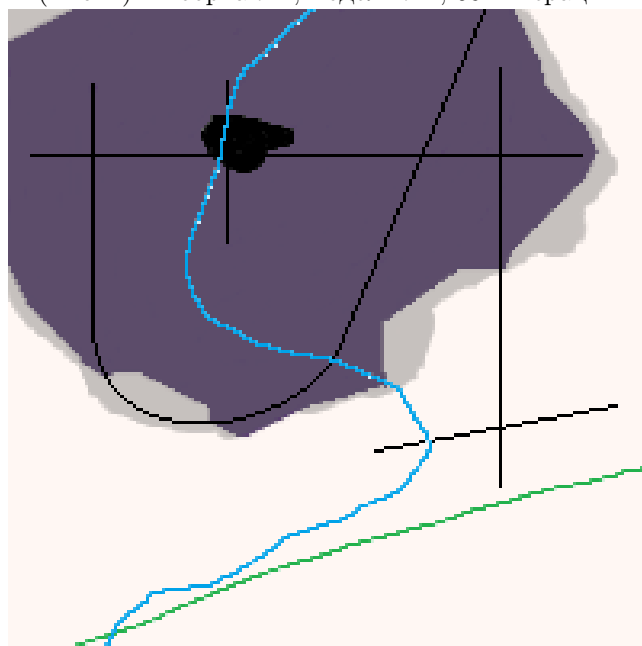
Рассмотрим на примерах последовательную работу первой, базовой модели.



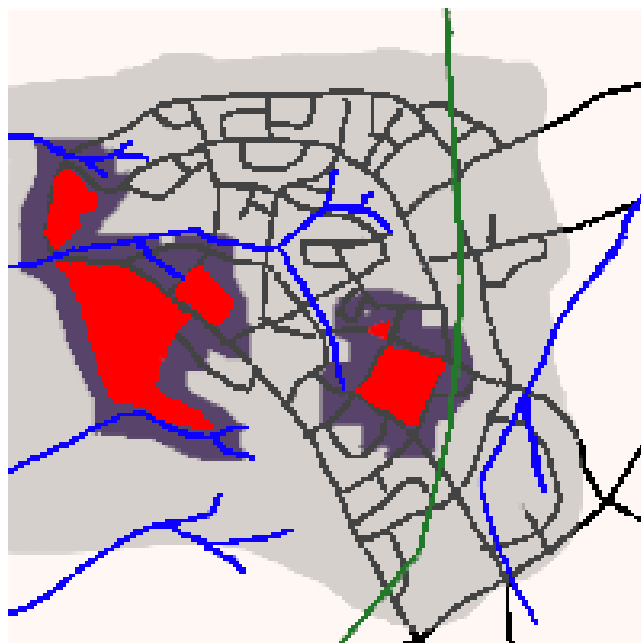
(Рис. 3) Выборка №1, модель №1, 10 итераций



(Рис. 4) Выборка №1, модель №1, 60 итераций



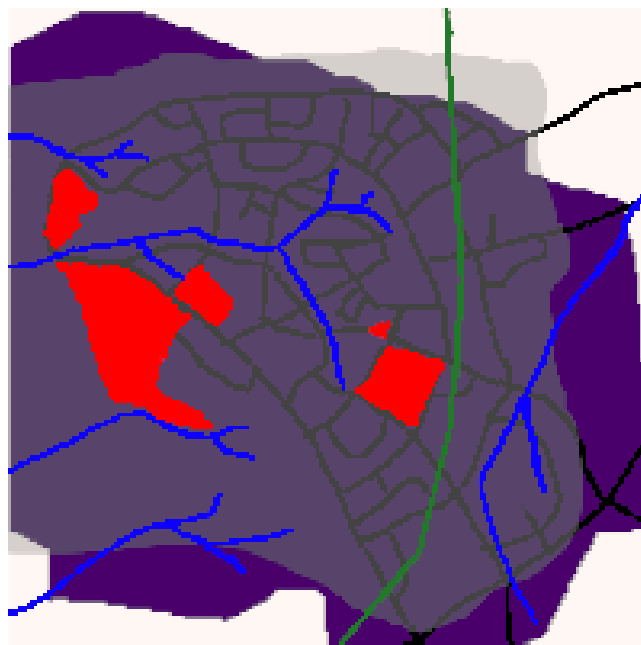
(Рис. 5) Выборка №1, модель №1, 100 итераций. Серым показано реальное заселение населенного пункта к последнему моменту времени.



(Рис. 6) Выборка №2, модель №1, 10 итераций



(Рис. 7) Выборка №2, модель №1, 30 итераций



(Рис. 8) Выборка №2, модель №1, 70 итераций. Серым показано реальное заселение населенного пункта к последнему моменту времени. Результаты замеров:

	Accuracy	Precision	Recall	F1
Выборка №1	0.94	0.99	0.88	0.93
Выборка №2	0.82	0.81	0.95	0.88

4.2 Улучшенная модель

Эта модель является усовершенствованием базовой - она наследует идею правил вида «если - то», но информацию о близкорасположенных точках интереса (автомагистрали, ЖД-пути, реки) интерпретирует не бинарно, а в виде вещественных признаков. В то же время улучшенная модель учитывает не только окрестность Мура, но и все остальные клетки поля, отступая от одно из концепций клеточных автоматов - принципа окрестности, который гласит, что на новое состояние конкретной ячейки могут влиять только ячейки из окрестности фиксированного размера.

Ячейки этого клеточного обновляются по следующему правилу:

$$S_{ij}^{t+1} = f(S^t, \Omega_{ij}^t, Mask, Shape),$$

где S^t - состояние поля КЛА в момент времени t , представляет собой матрицу размера $Shape$; Ω^i - функция подсчета соседей в заданной окрестности Мура; $Mask$ - бинарный слой, ограничивающий рост города в направлении чувствительных и охраняемых районов; $Shape = (200, 200)$ - размеры поля клеточного автомата.

$$Prestige_{ij}^t = Potential_{ij}^t * Mask * \Omega_{ij}^t,$$

где $Prestige_{ij}^t$ отражает условную привлекательность клетки для заселения; $Potential_{ij}^t$ отражает перспективы клетки исходя из различных факторов, например удаленность от центра.

$$Potential_{ij}^t = \sigma(w_1 * x_1 + \dots + w_k * x_k),$$

где x_i - вещественные признаки, отражающие информацию о клетке важную для принятия решения о ее заселении. Вот некоторые из признаков, которые были использованы в последующих экспериментах: расстояние до ближайших автомагистралей, рек, ЖД-путей, центра города, охраняемых зон, признак предпочтительного направления роста (в реализации модели он представляет из себя матрицу, каждый элемент которой является числом из отрезка $[0, 1]$, этот признак позволяет влиять на направление роста города) и т.д.; w_i - отнормированные веса этих признаков.

$$\Omega_{ij}^t = \frac{Moore_{ij}(n)}{n * n - 1},$$

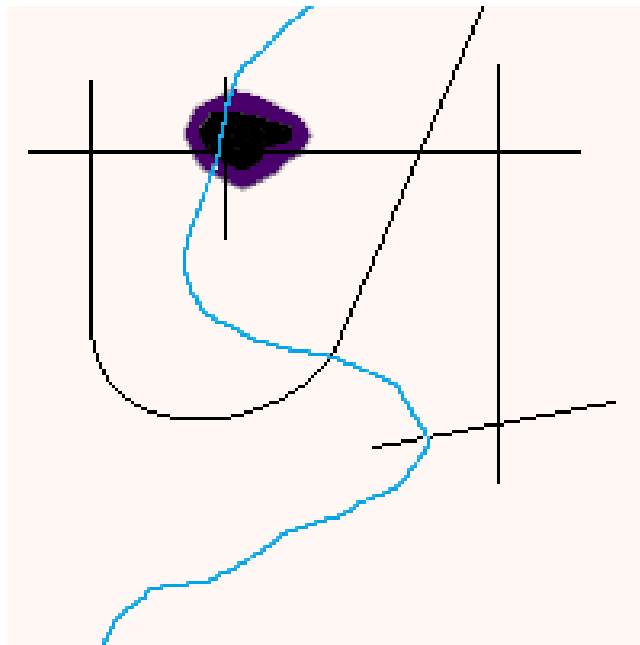
где $Moore_{ij}(n)$ - колличество заселенных ячеек в окрестности Мура для клетки в позиции (i, j) размера n .

В результате, состояние КЛА в момент времени $t + 1$ определяется следующим образом:

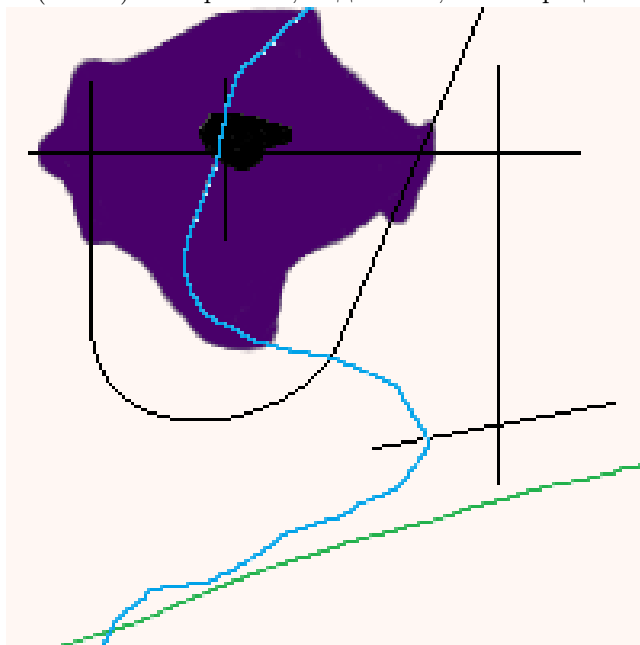
$$S_{ij}^{t+1} = \begin{cases} 1 & Prestige_{ij}^t > Q \\ S_{ij}^t & Prestige_{ij}^t \leq Q \end{cases}$$

где Q является гиперпараметром.

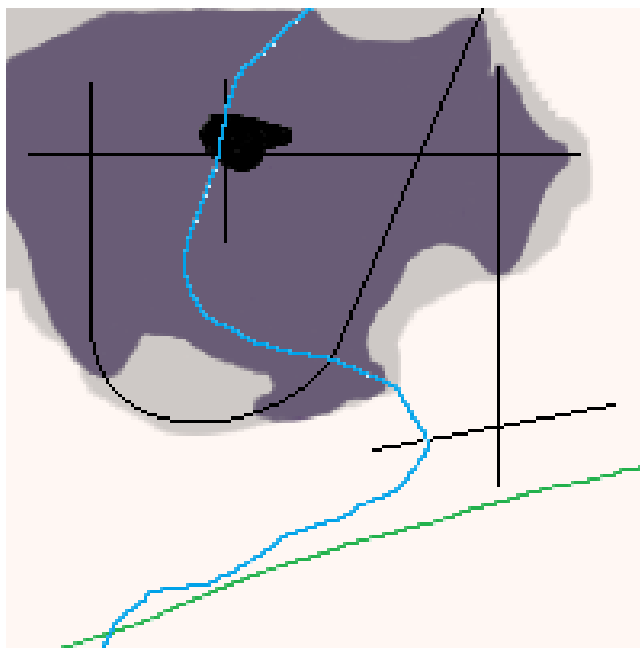
Рассмотрим на примерах последовательную работу усовершенствованной модели.



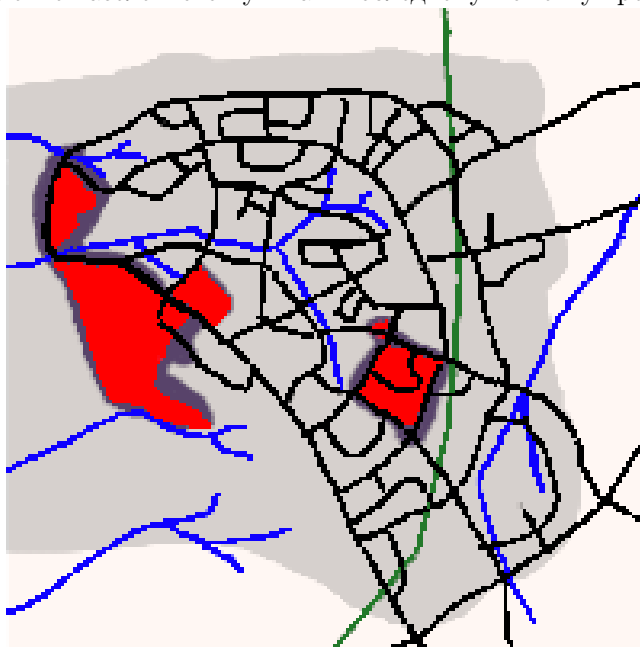
(Рис. 3) Выборка №1, модель №2, 10 итераций



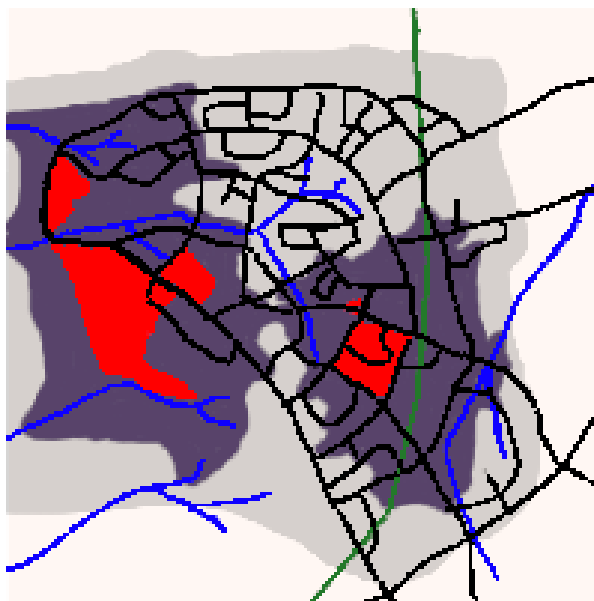
(Рис. 3) Выборка №1, модель №2, 60 итераций



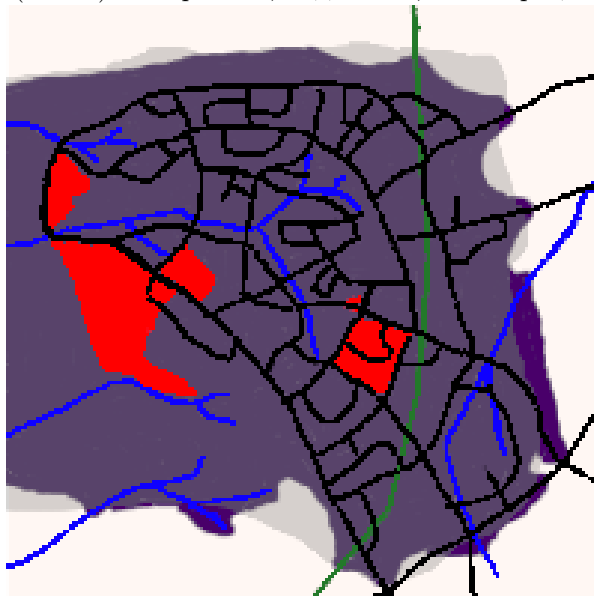
(Рис. 3) Выборка №1, модель №2, 100 итераций. Серым показано реальное заселение населенного пункта к последнему моменту времени.



(Рис. 3) Выборка №2, модель №2, 10 итераций



(Рис. 3) Выборка №2, модель №2, 40 итераций



(Рис. 3) Выборка №2, модель №2, 70 итераций. Серым показано реальное заселение населенного пункта к последнему моменту времени.
Результаты замеров:

	Accuracy	Precision	Recall	F1
Выборка №1	0.96	0.97	0.90	0.94
Выборка №2	0.95	0.94	0.97	0.96

4.3 Выводы

Как видно из демонстрации, обе модели качественно справляются с поставленной задачей, однако предпочтение стоит отдать второй модели, в силу более естественного характера роста автомата. Также к преимуществам второй модели стоит отнести простую модернизацию и больший простор для добавления новых признаков — в ее принцип заложено, что в принятии решения о распространении автомата доминирует именно множитель, в котором фигурируют признаки.

В дальнейшем планируется совершенствовать модель, наращивая количество признаков, или применить нейросетевой подход.

5 Источники

Stephen Wolfram. A New Kind of Science. 1959.

Л.А. Наумов. Разработка среды и библиотеки SAME&L для решения задач с использованием клеточных автоматов. 2003.

Е.С. Гуцина, О.А. Кувшинова. Метод клеточных автоматов в моделировании городских территорий. 2018.

И.М. Патракеев, А.А. Погорелов. Моделирование развития городских систем на основе теории однородных структур. 2013.

И. М. Патракеев. Геопространственные технологии в моделировании градостроительных систем. 2014.

Т.П. Васильева, Б.И. Мызникова, С.В. Русаков. О возможности моделирования процесса градообразования с помощью клеточных автоматов. 2011.

Jianquan Cheng. Cellular Automata Based Temporal Process Understanding of Urban Growth. 2002.

Fereydoun Naghibi, Mahmoud Reza Delavar, Bryan Pijanowski. Urban Growth Modeling Using Cellular Automata with Multi-Temporal Remote Sensing Images Calibrated by the Artificial Bee Colony Optimization Algorithm. 2016.