

ЛАГРАНЖЕВА МЕХАНИКА И ФИЗИЧЕСКИ-ОБОСНОВАННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИКИ МИГРАЦИИ**Захаров К.А. (ИТМО)****Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Бухановский А.В. (ИТМО)**

Введение. Основными целями современных государств, особенно в концепции умных городов, являются максимальная эффективность использования ресурсов, стимулирование использования возобновляемых источников энергии, повышение стандартов безопасности и охраны окружающей среды и использование возможностей искусственного интеллекта для обработки огромных объемов данных и управления городской инфраструктурой [2]. При этом ключевым ресурсом являются люди. Поэтому так важно изучать миграционные потоки, которые являются характеристикой развития населенных пунктов (сел, городов, регионов). Если из региона наблюдается большой отток граждан, значит в этом регионе недостаточно развиты, например, медицинские услуги, досуг, образование и т. д. Аналогично, если администрации хотят привлечь граждан в свои регионы, то необходимо понять, какие факторы способствуют положительному сальдо и какой прирост окажут те или иные программы развития регионов.

В данной работе на основе Лагранжевой механики построена динамическая модель, описывающая миграционный баланс для населенных пунктов. Также предложен подход к оценке факторов миграции, которые далее используется для объяснения функции внешнего воздействия в уравнении динамики через задачу регрессии. Помимо этого, для определения внешнего воздействия и подбора параметров уравнения использовался подход на основе физически-обоснованных нейронных сетей.

Основная часть. Большинство моделей миграции основано на макроэкономических показателях, что относится к макроуровню. Это не дает понимания процессов внутри сложной системы, которой является миграционная сеть, где узлы задают города, а ребра – дороги. Другой подход основан на агентных моделях, которые относятся к микроуровню и полагаются на эвристические предположения о поведении людей, которые как правило основаны на психологических шаблонах, не имеющих формальной обоснованности. Из современных подходов к определению динамики миграции можно выделить модели с физическим обоснованием. Схожесть социоэкономических процессов с физическими показало свою эффективность в эконофизике [1]. Данный подход может совмещать в себе макро и микроуровни, а также позволяет объяснить причины миграции.

В данной работе, для вывода уравнения динамики использовался подход, позволяющий интерпретировать социоэкономические процессы через призму физики – Лагранжева механика. Для большинства физических систем, зная Лагранжиан, можно вывести уравнение динамики через уравнение Эйлера-Лагранжа. Для этого необходимо знать кинетическую и потенциальную энергии. В нашем случае энергия интерпретируется как некоторые условия, которые мотивируют людей на перемещение. Единица измерения энергии зависит от целей изучения процессов миграции. Например, можно взять в качестве энергии – деньги. Мы рассматриваем более общий случай и задаем единицы измерения через математическую абстракцию. Обобщенными координатами в нашей системе являются сальдо для каждого населенного пункта. Поскольку каждая классическая физическая система требует задания скоростей, мы также задаем обобщенные скорости, которые обозначают степень изменчивости миграционного баланса. Таким образом, кинетическая энергия задается через квадратичную форму, а потенциальная энергия складывается из нескольких слагаемых.

Первое слагаемое, как и в гравитационной модели миграции, связано с расстояниями между населенными пунктами. Чем дальше расстояние, тем сложнее мигрировать. В нашем случае функция расстояния вычисляется через геодезические линии на сфере. Надо заметить, что функция расстояния является субъективным фактором и носит только условный характер

удаленности населенных пунктов.

Второе слагаемое связано с функцией схожести между населенными пунктами. В качестве такой функции мы взяли корреляцию между сальдо миграции. Миграция между схожими пунктами наиболее вероятна из-за меньшего стресса для людей и с более простой адаптацией к новому месту. Однако, можно рассмотреть подход, когда люди мигрируют в принципиально новые места, но данных, которые подтверждают это на сегодня недостаточно.

Также мы учитываем в потенциальной энергии функцию возраста, которая является гладкой функцией с концами равном 1 для «молодых» граждан и 0 для граждан больше некоторого порога. Такое предположение соотносится с эмпирическими данными, а именно молодые люди мигрируют чаще.

Последний компонент потенциальной энергии – это функция неоднородности. Данная функция определяет внешнее воздействие, которое вынуждает людей мигрировать. В качестве таких факторов могут выступать экономические или политические решения, а также степень развития региона и его финансирование.

Поскольку факторов миграции можно выделить большое количество, мы используем лишь одну функцию, которая агрегирует в себе суммарное воздействие извне. Для определения этой функции мы использовали физически-обоснованные нейронные сети. Такой подход включает в себя сопоставлении известных точек данных с решением, полученной нейронной сетью, а также на решении динамического уравнения с подбором оптимальной функции неоднородности. Сама нейронная сеть состоит из нескольких нелинейных блоков, а точки автоматического дифференцирования получаются из интерполяции исходных точек данных на заданном диапазоне. Качество аппроксимации исходных точек данных с решением уравнения динамики было проверено при помощи регрессионных метрик: коэффициента детерминации и среднеквадратического отклонения.

Далее, получив функцию неоднородности (правую часть уравнения динамики) для каждого населенного пункта, мы собрали большой массив социоэкономических данных [3]. Через эти данные мы построили регрессионную модель и тем самым объяснили возможные эффекты со стороны регуляторов на воздействие функции неоднородности, а в следствии на воздействие граждан для миграции. Объяснение влияния было основано на анализе чисел Шепли и сопоставлении эффектов сценарного моделирования с решением уравнения динамики. Проверка качества объяснения выполнялась на основе коэффициента детерминации со статистической значимостью на 200 запусках и составило 0.84.

Выводы. В рамках данной работы была построена динамическая модель миграции на основе Лагранжевой механики и физически-обоснованных нейронных сетей. Результаты могут быть полезны для построения прогнозов миграции, а также для объяснения миграционных эффектов через макроэкономические или социоэкономические признаки.

Список использованных источников:

1. Estola, M.; Dannenberg, A.A. Newtonian and Lagrangian mechanics of a production system. *Hyperion International Journal of Econophysics New Economy* 2016, 9, 7–26.
2. Hammoumi, L.; Maanan, M.; Rhinane, H. Characterizing Smart Cities Based on Artificial Intelligence. *Smart Cities* 2024, 7577, 1330–1345.
3. Zakharov, K.; Aghajanyan, A.; Kovantsev, A.; Boukhanovsky, A. Forecasting Population Migration in Small Settlements Using Generative Models under Conditions of Data Scarcity. *Smart Cities* 2024, 7, 2495–2513.