

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ АССИМИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ..¹

Н.В. Белотелов, Ф.В. Логинов

В статье описывается агентная модель, формализующая ассимиляционный процесс в стране население, которой принадлежит к разным культурам. В модели учитываются: демографические процессы, интенсивности межкультурных контактов, глубина культурной памяти. Взаимодействие между агентами происходит посредством взаимодействия двух случайно выбранных агентов с нейронной сетью, имеющих модифицированную архитектуру Long-short term memory. Проведен ряд имитационных экспериментов

Ключевые слова: имитационная модель, демографический процесс, ассимиляционный процесс, нейронная сеть.

Введение

Интенсивно возрастающие миграционные процессы в мире приводят к значительным изменениям в «культурном ландшафте» регионов, порождая в ряде случаев проблемы межкультурных взаимодействий. Математическая формализация неизбежных ассимиляционных процессов, которые естественным образом связаны с миграционными процессами является чрезвычайно сложной, но актуальной задачей. В статье предложена агентная модель межкультурных взаимодействий, в которой сделана попытка получения оценки динамики изменения «культурного ландшафта» с учетом демографических характеристик, особенностей взаимодействия между разными

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-010-00423).

культурами, глубиной культурной памяти, а также интенсивностью взаимодействия между субъектами.

Под культурным взаимодействием подразумевается передача информации одного индивида другому. Все люди говорят на своем "языке", где "язык" - определенная система знаков и символов, обмениваясь которыми происходит передача информации. Примером обмена может служить взаимодействие двух агентов, имеющих разные языки: при попытке что-либо объяснить один агент произвольно будет использовать язык жестов, указывая, например, направление. Язык жестов в данном контексте является пересечением систем символов и знаков всех людей, ибо понятен абсолютно всем людям. Следовательно, все агенты могут обмениваться информацией друг с другом, то есть пересечение языков любых двух агентов не пусто: $\forall x_i, x_j \in X, l(x_i) \cap l(x_j) \neq \emptyset$, где X - множество всех агентов, $l(x_i)$ - система знаков и символов i -го агента (далее "язык" или культурное состояние).

Описание модели.

Для формализации понятия «культура» (язык) в модели используется чрезвычайно упрощенная, с гуманитарной точки зрения схема описания «культуры». А именно, предполагается, что есть математический объект, описывающий характерное состояние агента, которое будем называть культурным состоянием агента. Имеет место изоморфизм языка, как "культурного состояния" агента, и элементом некоторого пространства, для определенности, обозначим его H . Считается, что все культурные состояния могут быть описаны определенной системой элементов пространства H . Причем предполагается, что все элементы данной системы являются векторами и что в нем существует ортогональный базис, который

формирует «базу культуры», то есть всякое культурное состояние есть вектор в этом пространстве.

Рассмотрим i -ую культуру как набор агентов с их культурными состояниями, тогда пространство культурных состояний для данной страны есть линейная оболочка L_i , натянутая на вектора состояний агентов i -ой культуры. Очевидно, что $\forall i: L_i \subset H$, при этом условии $\bigcup_i L_i = H$ вообще говоря, не выполняется. При изменении векторов состояний агентов, пространство культурных состояний также меняется. Данная структура позволяет рассматривать культуры, вообще говоря, как единый объект представляющий собой объединение культурных состояний агентов вместе с культурной памятью.

Исходя из всего вышесказанного, можно рассматривать элементы базиса пространства H как чистое состояние определенной культуры. Но, так как каждый агент обладает своим собственным состоянием, то необходимо определить подпространство как набор всех возможных состояний агентов в культуре. Для этих целей потребуем от пространства H наличия скалярного произведения. Скалярное произведение двух векторов культурных состояний позволяет ввести угол между ними, что дает возможность разбить наше пространство на подпространства около базисных векторов. Таким образом, через углы между культурными состояниями агента можно факторизовать исходное пространство на соответствующие каждой культуре подпространства. Определенное объединение культурных состояний формирует культуру. Это объединение будем осуществлять следующим образом. Вектора, находящиеся в определенном конусе, который характеризуется определенным углом, будем считать принадлежащим определенной культуре.

После описанной выше факторизации пространства необходимо описать само взаимодействие. Предлагается использовать следующую модель взаимодействия между агентами. Предполагается, что есть выборка из N размером n векторов (из общества выбирается n агентов, которые будут взаимодействовать друг с другом, правило выбора на данном момент предполагается случайным). Выбирается: Ψ_i, Ψ_j - два культурных состояния, соответствующие выбранным агентам, которые будут взаимодействовать друг с другом. Под взаимодействием мы понимаем определенное изменение векторов культурных состояний, которое будет описано далее.

В работе [1] в качестве межкультурного взаимодействия использовалось матричное уравнение, описывающее изменение распределения агентов между культурами. Недостаток подобного подхода заключается в том, что такой подход не позволяет в полной мере учесть изменение «культурного ландшафта» в межкультурном взаимодействии. В данной работе в качестве модели взаимодействия предлагается описывать изменение состояний отдельных агентов. Для этого в качестве модели взаимодействия между агентами использовать модифицированную архитектуру Long-short term memory [2] нейронной сети. Под классической LSTM нейронной сетью подразумевается рекуррентная нейронная сеть, внутри которой хранится память о предыдущих культурных состояниях, взаимодействовавших с сетью.

Количество входов нейронной сети есть размерность вектора культурного состояния, а количество нейронов сети равно шесть умноженное на размерность вектора культурного состояния агента. а память сети хранится в коэффициентах весов нейронов e_{ij} . Процесс обучения есть процесс обратного распространения ошибки. Предполагается, что для обучения сети достаточно определенного числа шагов, которое опреде-

ляется эмпирически - оценкой размера набора данных для обучения.

Для весов нейронов вводятся квадратные матрицы: E_1 (сигмоидный слой) E_2 (тангенциальный слой). Далее от аффинного преобразования культурных состояний взаимодействующих агентов (берется сигмоида для E_1 и гиперболический тангенс для E_2) берется произведение Адамара [3] и прибавляется случайная величина равная вектору нормального распределения $N(0, 0, 5)$. Полученные векторы суммируются и умножаются на константу "восприятия" взаимодействия. Итоговый вектор культурного взаимодействия представляется как взвешенная сумма вектора до взаимодействия и полученный из взаимодействия вектор.

Вышеописанное можно записать следующим образом: пусть есть Ψ_i, Ψ_j - векторы культурного взаимодействия, тогда векторы после взаимодействия будут иметь следующий вид:

$$\Psi_i^* = \alpha \Psi_i + (1 - \alpha) * C_1 * [\tanh(E_1(\Psi_i \circ \Psi_j)) * N(0, 0, 5) + \sigma(E_2(\Psi_i \circ \Psi_j)) * N(0, 0, 5)]$$

$$\Psi_j^* = \alpha \Psi_j + (1 - \alpha) * C_2 * [\tanh(E_1(\Psi_i \circ \Psi_j)) * N(0, 0, 5) + \sigma(E_2(\Psi_i \circ \Psi_j)) * N(0, 0, 5)]$$

где $\sigma(\vec{x})$, $\tanh(\vec{x})$ применены к вектору, то есть действие функции на вектор сводится к покомпонентному векторному действию, а $\Psi_i \circ \Psi_j$ - обозначает произведение Адамара [4].

В работе константы C_1 и C_2 предлагается брать равными 1. Данные формулы логично вытекают из предположения о сохранении влияния агентов друг на друга при взаимодействии: влияние не должно полностью замещать текущее состояние агента, а лишь должно незначительно его изменять. Отсюда итоговое состояние есть линейная комбинация предыдущего

состояния и состояния взаимодействия – выходного вектора из нейронной сети..

Данная структура позволяет сохранять память о взаимодействии языков и видоизменять вектор культурного состояния в рамках пространства H вплоть до изменения «базы культуры» - базисного вектора характерного для данной страны: при изменении культурного состояния вектор изменяется не только по абсолютной величине, но и по углу. Однако в нашем пространстве H угол – есть мера близости к «базам культур». Таким образом, можно говорить, что агент изменил свою «базу», если угол между его вектором культурного состояния к какой-либо новой «базе» меньше, чем к старой.

Изменение культурного состояния в общем случае невозможно производить описанным выше образом без рассмотрения такого явления как "культурная память". Для формализации понятия «культурная память» рассмотрим объект $\Omega_i \in H$, характеризующий культурную память i -го агента. Подразумевается, что в $\Omega_i \in H$ содержатся все вектора культурных состояния за определенное предыдущее число тактов. Предполагается, что на каждом шаге культурного взаимодействия для агента добавляется его исходное (до взаимодействия) состояние, т.е. $\psi_i \in \Omega_i$ на каждом шаге, и забывается состояние, которое было у агента определенное число тактов по времени назад, назовем это число тактов глубиной культурной памяти. Также вводится параметр управления - энергия взаимодействия E , которая вводится как константный множитель, который увеличивает модуль вектора культурного состояния агента. Этот параметр характеризует возбужденность культурного состояния в момент межкультурного взаимодействия. Изменение величины потока энергии влечет за собой более интенсивное изменение векторов культуры, характеризующих агентов.

Дополнительно вводится параметр открытости для каждой культуры θ_i , описывающий долю агентов, участвующих во взаимодействии, принадлежащих рассматриваемой культуре, которые готовы взаимодействовать с другими агентами, не обязательно чужой культуры. Необходимость введения данного параметра обусловлена разной степенью интеграции культур в глобальное взаимодействие.

Величина $\mu \in [0,1]$ характеризует образованность агента. Предполагается, что чем выше образованность, тем выше восприимчивость влияния других людей:

$$\begin{cases} \psi_i = \psi_i + \mu \psi_i^* \\ \psi_j = \psi_j + \mu \psi_j^* \end{cases}, \text{ где } \psi_i^* \text{ и } \psi_j^* \text{ определены выше.}$$

При описании демографического процесса в модели делаются следующие предположения:

- Агенты полностью разных культур не могут образовать потомство. ($(\psi_i * \psi_j) = 0$ - скалярное произведение их векторов культурного состояния есть ноль).
- Вводится коэффициент рождаемости для каждой культуры η_i . Аналогично вводится коэффициент η_i смертности.

Обязательным элементом агента при демографическом процессе является возраст Age и показатели рождаемости и смертности в стране. Также введем параметр характеризующий фертильность культуры p_i . Введение данного параметра обусловлено разным восприятием семейных ценностей каждой культурой.

Случайным образом выбирается число агентов, равное сумме долей агентов по рождаемости, возраст которых не

превышает заданных рамок $Age \in (a, b)$. Далее выбранные агенты делятся парно случайным образом. Рассматривается бернуллеваткая случайная величина $\xi \sim Be(p_i)$, где p_i - вероятность рождения нового агента в данной паре. В случае разных культур, выбирается как наименьший среди представленных в паре. При $\xi = 1$ создается новый агент, с культурным состоянием одного из родителей-агентов, выбранных случайно, а также небольшим нормальным шумом (вектором из стандартного нормального распределения). Отдельно стоит отметить, что новому агенту частично передается культурная память: случайно выбираются фиксированное число векторов из Ω_i, Ω_j , где i, j - индексы агентов в группе.

Процесс смерти в описываемой модели предлагается взять следующим: выбирается доля агентов по коэффициенту смертности, независимо от культур. Далее рассматривается бернуллеваткая случайная величина $\xi \sim Be(p_d)$, где p_d - вероятность смерти агента, где $p_d = p_d(Age)$ - зависит от возраста.

Имитационные эксперименты

Описанная выше модель культурного взаимодействия была программно реализована.

Для проведения имитационных экспериментов задавались: начальная численность людей по культурам – $\{\psi_{ij}\}_{i=1}^{N_j}$ совокупность векторов культурных состояний агентов, участвующих во взаимодействии; коэффициенты рождаемости и смертности $\eta, \tilde{\eta}$, границы репродуктивного возраста a, b , а также "глубина памяти" мощность множества векторов культурных состояний агентов.

турных состояний $|\Omega_i|$). Около базисных культур, под которыми мы понимаем фактор – объекты пространства H генерируются вектора со стандартным нормальным отклонением для каждого агента. Первым этапом взаимодействия идет демографический процесс, следом за ним - процесс культурного взаимодействия, и далее процесс перераспределения агентов по культурам посредством вычисления угла между культурным состоянием.

В вычислительных экспериментах в качестве культурного пространства рассматривалось векторное пространство R^{100} . Группа людей X представлена как набор агентов, принадлежащих трем разным культурам с численностями агентов: $\{500, 1500, 3000\}$, с глубиной памяти равной $|\Omega_i|=50$. При инициализации культурная память считалась пустой. Доля людей взаимодействующих по культурам эквивалентна $\theta_i = 0.1$, это означает, что культуры в равной степени взаимодействуют друг с другом. Параметр фертильности для всех культур $p=1$. Коэффициент рождаемости и смертности $\eta, \tilde{\eta}$ равны 0.065. Часть экспериментов рассматривалась без учета демографического процесса.

В первом эксперименте исследовалось влияние наличия глубины памяти, описанной выше, на ассимиляционные процессы в отсутствии демографического процесса.

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ АССИМИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

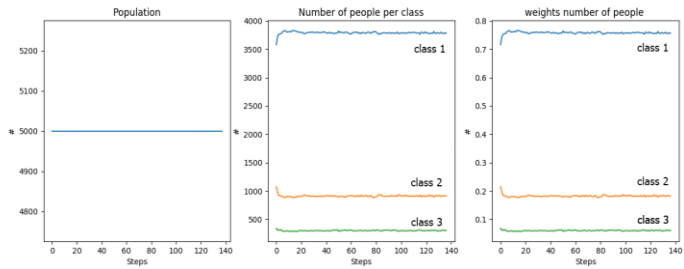


Рисунок 1. На данном графике представлены результаты моделирования динамики со стандартной глубиной памяти $|\Omega_i|=50$. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

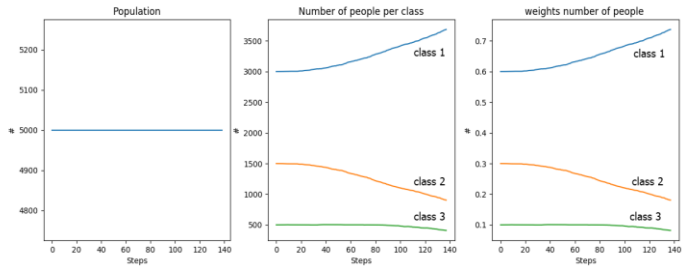


Рисунок 2. На данном графике представлены результаты моделирования динамики со стандартной глубиной памяти $|\Omega_i|=0$. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

Как можно видеть, при наличии глубины памяти - ассимиляции агентов между культурами почти не происходит, однако при отсутствии памяти можно видеть, что большая по численности культура ассимилирует в себя больше агентов. Это объясняется тем, что все культуры взаимодействуют в равных долях, а это означает, что в абсолютных величинах

большая по численности культура будет чаще участвовать во взаимодействии и тем самым оказывать большее воздействие, по отношению к другим культурам.

Во втором эксперименте рассматривалось влияние коэффициентов фертильности p на демографические процессы при наличии глубины памяти.

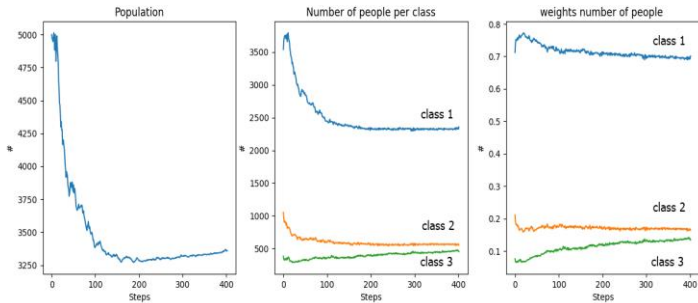


Рисунок 3. На данном графике представлены результаты для коэффициентов фертильности $p_i = \{1.0, 0.7, 0.5\}$. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).



Рисунок 4. На данном графике представлены результаты для коэффициентов фертильности $p_i = \{1.0, 1.0, 1.0\}$. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ АССИМИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Можно видеть, как ожидалось, что такая характеристика культуры, как фертильность, на примере культуры, обозначенной зеленой линией, позволяет культуре с низкой численностью, но с глубокой памятью и высокой фертильностью выживать среди более многочисленных культур.

В третьем эксперименте было проанализировано влияние "активности" культур θ .

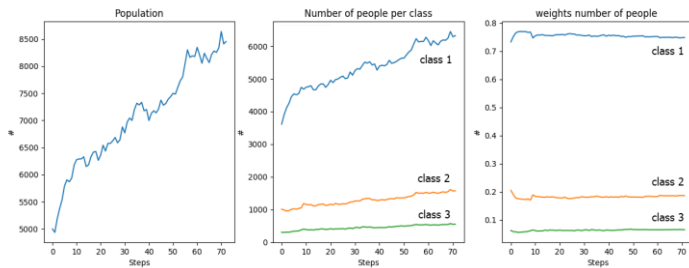


Рисунок.5 представлены результаты моделирования при одинаковых долях взаимодействия культур $\theta = 0.1$. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).



. Рисунок 6 Представлены результаты моделирования для долей культур $\theta_i = \{0.01, 0.05, 0.1\}$ соответствующие возрастающим по численности культурам. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

Как можно видеть из графиков, активность культуры позволяет меньшей по численности культуре распространить свое влияние на другие, большие по численности, но меньшие по активности.

В четвертом эксперименте было исследовано влияние потока энергии, а точнее его величины, внутри которого находились культуры на ассимиляционные процессы в отсутствии демографических процессов.

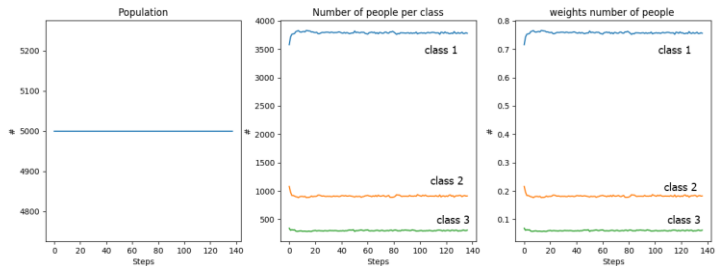


Рисунок 7. На данном графике представлены результаты для потока энергии $E = 0.5$ на каждом шаге. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

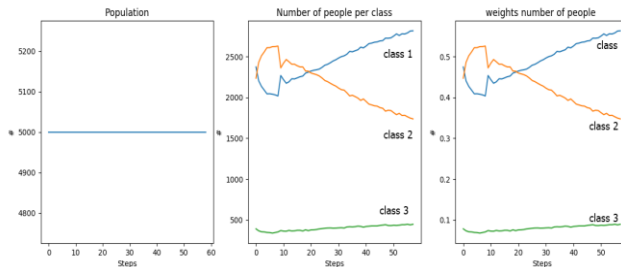


Рисунок 8. На данном графике представлены результаты для потока энергии $E = 500$ на каждом шаге. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ АССИМИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

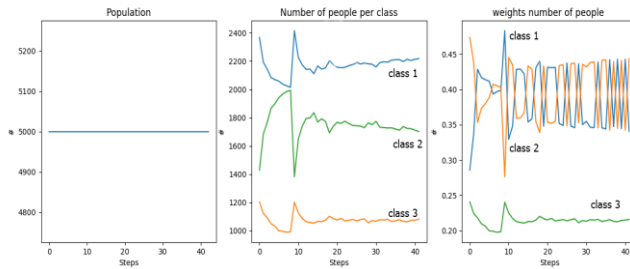


Рисунок 9. На данном графике представлены результаты для потока энергии $E = 5000$ на каждом шаге. На правом графике общая численность агентов, на следующем численности агентов по культурам, на левом доли культур (нормировано на единицу).

Как можно заметить, увеличение потока энергии в группы взаимодействующих культур приводит к стохастизации процесса изменения культуры индивида.

Заключение

Описанная выше модель ассимиляционных процессов позволяет проводить имитационные эксперименты с целью анализа влияния на них таких довольно сложно формализуемых понятий, как глубина памяти, интенсивность межкультурных взаимодействий, открытость культуры совместно с демографическими факторами. Все это представляет, безусловно, большой интерес. Модельные имитационные эксперименты показывают, что они поддаются интерпретации и не противоречат здравому смыслу. По-видимому, основной проблемой является интерпретация введенных математических понятий с помощью реальных данных и существующими в настоящее время гуманитарными представлениями о природе и эмпирических закономерностях, относящихся к процессам ассимиляции.

Л и т е р а т у р а

1. Белотелов Н.В., Логинов Ф.В. Моделирование миграции между странами с учетом образовательного процесса. // Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов, 2018. Т.33, №1(33), С. 183-190
2. M. Klapper-Rybicka, N. N. Schraudolph, J. Schmidhuber. Unsupervised Learning in LSTM Recurrent Neural Networks // In G. Dorffner, H. Bischof, K. Hornik, eds., Proceedings of Int. Conf. on Artificial Neural Networks ICANN'01, Springer. Vienna, 2001 - pages 684-691.
3. Horn, Roger A.; Johnson, Charles R. Matrix analysis. // Cambridge University Press, Cambridge, 2012.

Моделирование, декомпозиция
и оптимизация сложных динамических процессов

Подписано в печать 12.11.2015

Формат бумаги 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 6. Усл.-печ. л. 9

Тираж 120 экз. Заказ 23

Отпечатано на ротапринтах
в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук
119333, Москва, ул. Вавилова, 40