
МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

МОДЕЛЬ СООБЩЕСТВ
С ДВУМЯ СПОСОБАМИ ВОСПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТА
(МОДЕЛЬ «КОЧЕВНИКОВ» И «ЗЕМЛЕПАШЦЕВ»)*

© 2017 г. Ф.А. Белоусов¹

Аннотация. В работе представлена модель взаимодействия двух типов цивилизаций, которые условно были названы «кочевниками» и «землепашцами». Каждый тип цивилизации характеризуется способом воспроизводства продукта, необходимого агентам обоих видов. Если землепашцы воспроизводят продукт, используя свои навыки, то кочевники ничего не производят, а только потребляют этот ресурс, который отбирают у землепашцев и других кочевников. Указанный продукт является основным источником конкурентной борьбы между агентами. Именно он служит главной причиной проявления агрессии одних агентов по отношению к другим. Кроме продукта, который воспроизводится землепашцами, есть еще и дикий ресурс, появляющийся на ареале в случайно определенных местах с заданной интенсивностью. По замыслу автора данная модель — это упрощенная модель древнего мира, в котором каждую из цивилизаций можно было причислить к одному из двух рассматриваемых типов. Типичными представителями цивилизации землепашцев являются цивилизации Междуречья, передней Азии, византийских и римских империй и т.д. Классическими примерами цивилизации кочевников выступают кочевнические цивилизации Великой степи. Модель реализована на базе агент-ориентированного подхода в программном комплексе AnyLogic. В работе проведен ряд экспериментов, в рамках которых изучено то, как изменяются характеристики сосуществования двух типов цивилизаций в зависимости от вариации отдельно взятых параметров. Важными параметрами модели, влияние которых изучалось, являются размер ареала обитания и темп роста дикого ресурса. На основе полученных данных проведен статистический и эконометрический анализ.

Ключевые слова: искусственные общества, агент-ориентированное моделирование, кочевники, землепашцы.

Классификация JEL: C63.

ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд работ, в которых человеческая цивилизация или более локальные цивилизации моделируются на основе принципов имитационного моделирования. Среди таких работ можно выделить хорошо известную сахарную модель (Epstein, Axtell, 1996). В этой модели была сделана попытка исследовать ряд социальных феноменов (торговля, миграция, войны, взаимодействие с окружающей средой, передача культуры, распространение болезней и популяционная динамика). В сахарной модели присутствуют агенты и некоторый ресурс — «сахар». В некоторых реализациях этой модели агенты кооперируются в классы (племена), но делают это не по принципу своего отношения к способу воспроизводства, а по принадлежности к коалиции.

Есть также работы, в которых некоторые реально существовавшие цивилизации изучались с помощью имитационного моделирования. Например, в (Heckbert, 2013) рассматривалась жизнь цивилизации майя с учетом географических, климатических и прочих особенностей.

К моделям подобного типа также относятся исследования, проведенные на суперкомпьютере в Барселоне с помощью высокопроизводительного программного обеспечения Пандора (Pandora) (Wittek, Rubio-Campillo, 2012, p. 355–362). Моделированию подверглись две группы — охотники

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-36-00338).

¹Федор Анатольевич Белоусов — научный сотрудник ЦЭМИ РАН, Москва; sky_tt@list.ru.

и собиратели (hunter-gatherer groups), обитавшие в северном Гуджарате (Индия)¹. Создатели модели постарались учесть географические и климатические особенности местности. Калибровка модели проводилась на основе археологических и антропологических данных. Были изучены вопросы, при каких условиях обе группы агентов сосуществуют, а при каких наблюдается исчезновение одной из групп. Также с помощью модели исследовалось влияние климата на характер взаимодействия охотников и собирателей.

Другой известный класс моделей, в которых сосуществуют, как минимум, два вида агентов (функционально различных), это модели типа «хищник – жертва» (Базыкин, 1985, глава 3). В этих моделях хищники охотятся за жертвами, которые являются для них источником пропитания. Однако эти модели описывают скорее дикую природу, нежели человеческое общество.

В работе (Макаров, Бекларян, Белоусов, 2014, с. 1385–1395) в рамках агент-ориентированной парадигмы авторы анализировали вопросы выживаемости популяции, в которой были представлены процедуры осваивания ресурса, размножения, а также борьбы за ресурс. Там же была отмечена необходимость изучения более сложной модели, в которой агенты разделены на группы в зависимости от своего отношения к воспроизводству ресурса («кочевники» и «землепашцы»), что перекликается с взглядом на развитие человеческой цивилизации, который был предложен в (Тоинби, 1991).

Согласно взгляду А. Тоинби на развитие человеческой цивилизации в истории человечества принципиально выделяется два типа сообществ. Первый тип сообществ условно называется «землепашцами», в основе его деятельности лежит переработка первичного ресурса и создание дополнительного продукта (прибавочной стоимости) за счет инфраструктурных преобразований и структурных усложнений внутри социума. Второй тип сообщества, условно называемый «кочевники», потребляет первичный ресурс, а дополнительный продукт получает за счет изъятия его у землепашцев. Классическими примерами цивилизации землепашцев выступали цивилизации Междуречья, передней Азии, византийских и римских империй и т.д. Классическими примерами цивилизации кочевников выступают кочевнические цивилизации Великой степи. Вместе с тем даже на заре истории эти цивилизации не существовали в чистой форме. В цивилизации землепашцев были маргинальные группы кочевников в виде ростовщиков. Внутри этой цивилизации с этической точки зрения данная маргинальная группа воспринималась как антипод установившимся нормам и, соответственно, осуждалась и отвергалась социумом. В цивилизации кочевников также существовали маргинальные группы с земледельческим укладом – это группы, занимавшиеся бахчеводством. В цивилизации кочевников они также служили как антипод установившимся нормам и также осуждалась и отвергалась социумом. На заре истории представители этих двух типов цивилизаций сосуществовали изолированно, но при этом взаимодействовали друг с другом.

В работе сделана попытка с помощью построенной агент-ориентированной модели изучить взаимодействие двух описанных типов цивилизаций – кочевников и землепашцев. Землепашцы в рамках своей деятельности помимо первичного ресурса занимаются как увеличением его урожайности, так и его переработкой. Это форма воспроизводства лежит в основе жизнедеятельности землепашцев, и в частности выступает регулятором воспроизводства самой популяции землепашцев.

Кочевники потребляют первичный природный ресурс, не занимаясь какой-либо деятельностью по воспроизводству дополнительного ресурса. Весь недостающий ресурс они отбирают у окружающих их сообществ землепашцев, а также и кочевников.

В модели задается правило изменения уровня здоровья, связанное с потреблением ресурса, а также механизм репродуцирования популяций. Описана процедура агрессии кочевников по отношению к окружающим его особям. Изучается динамика такого сообщества в зависимости от различных характеристик ареала обитания, в частности от размера и плодородности ареала.

Насколько известно авторам, на данный момент не существует работ, в которых была бы сделана попытка создать модель человеческого общества как взаимодействие цивилизаций

¹ Подробнее см. <http://simulpast.imf.csic.es/index.php/methodology/case-study/37-cs1>.

кочевников и земледельцев. Модель, представленная в работе, выполнена в программном продукте AnyLogic.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель состоит из трех компонент: это особи (агенты), взаимодействующие друг с другом, ареал (территория) их обитания и ресурс (еда), который появляется на ареале по определенному правилу. Модель характеризуется множеством параметров (величин, не меняющихся в процессе каждого из прогонов модели) и переменных (которые меняются в процессе прогона модели). Рассмотрим каждую компоненту.

Время. Время в модели идет пошагово, период за периодом. В рамках каждого периода очередность ходов среди агентов определяется случайно. Каждый период модельного времени соответствует году.

Ареал (территория обитания). Ареал обитания представляет собой квадратную матрицу размерности $dim \times dim$. Каждая клетка этой матрицы может быть либо пустой, либо в ней может находиться один агент или 1 единица ресурса. Размерность $dim \in \mathbb{N}$, $dim > 0$ является параметром модели.

Ресурс (еда). Ресурс в модели может быть двух типов — дикий и культурный. Дикий ресурс может случайным образом появиться на любой пустой клетке, вероятность его появления определяется величиной $growth_rate \in [0, 1]$. Для всех пустых клеток этот показатель одинаковый и в процессе прогона модели не меняется, т.е. является параметром модели. Культурный ресурс может вырасти в результате целенаправленных действий земледельцев. Это происходит по определенному правилу, при выполнении некоторых условий.

По своим характеристикам дикий и культурный ресурсы не отличаются (кроме цвета — дикий является бледно-зеленым, культурный — ярко-зеленым). Если агент потребляет ресурс, занимая клетку, на которой он был расположен, то уровень здоровья агента *health* увеличивается на 1 единицу.

Агенты. Каждый агент может принадлежать к одному из двух типов — земледельцам или кочевникам. Каждый тип характеризуется своей моделью поведения, о которой говорилось во введении. Здесь будет более четко прописан алгоритм поведения обоих типов.

В модели все действие происходит на ареале, который представляет собой квадрат, состоящий из $dim \times dim$ клеток. Каждая клетка может быть либо пустой, либо содержать ресурс (дикий или культурный), либо заниматься кочевником или земледельцем. Каждый агент обладает рядом характеристик. Эти характеристики можно разбить на два класса — параметры (не меняются во время каждого прогона) и переменные (меняются во время прогона). К переменным относятся координаты агента (x и y), возраст агента (*life_period*), уровень здоровья (*health*), а также переменная, отвечающая за уровень голода агента (*hungry*), и переменная, отсчитывающая количество периодов после рождения последнего ребенка (*bear*). Параметрами агента являются предельный возраст агента (*life_bound*), пороговое значение *hungry_bound*, с помощью которого определяется, агент голоден или нет (если $hungry > hungry_bound$, агент считается голодным, в противном случае — нет), а также пороговое значение *bear_bound* (если $bear > bear_bound$, то агент готов к тому, чтобы родить еще одного агента). Таким образом, агенты живут на едином ареале и взаимодействуют друг с другом.

Все переменные и параметры агентов являются целочисленными. Перечислим их.

Переменные, характеризующие состояние агента:

(x , y) — координата местоположения агента; x и y — целые величины из отрезка $[1, dim]$; набор координат для каждой особи индивидуален, так как два и более агента не могут находиться на одной клетке ареала;

life_period — возраст агента, т.е. каждый следующий период она увеличивает значение на единицу;

hungry — уровень голода агента, т.е. сколько периодов агент не потреблял ресурс; в каждый новый период без ресурса эта переменная увеличивается на единицу;

health — уровень здоровья агента. Если агент не потребляет ресурс, то каждый период значение этой переменной уменьшается на 1 единицу; если потребляет — то увеличивается на 1 единицу. Если уровень здоровья становится отрицательным, то вне зависимости от остальных условий агент умирает;

bear — показывает, сколько периодов назад агент родил нового агента. В тот период, когда агент родил другого агента, значение этой переменной обнуляется и каждый последующий период, если он не рождает, ее значение увеличивается на единицу.

Параметры модели, относящиеся к характеристикам агентов:

life_bound — предельный срок жизни каждого из агентов, т.е. если переменная *life_period* становится равной *life_bound*+1, вне зависимости от остальных условий этот агент умирает. В модели этот параметр будет постоянен и равен 50;

bear_bound — пороговое значение для переменной *bear*. Если $bear > bear_bound$, то особь в состоянии родить новую особь, если $bear < bear_bound$, то агент родить не может;

hungry_bound — пороговое значение для переменной *hungry*. Если $hungry > hungry_bound$, агент переходит в состояние «голоден». О поведении агента в этом состоянии будет сказано ниже, для разных типов агентов оно будет разным.

Отметим, что для всех агентов, вне зависимости от их типов, значения этих параметров одинаковы.

Поведение каждого агента зависит от трех основных составляющих. Во-первых, от типа агента — является он землелепашцем или кочевником. Во-вторых, от его состояния, которое определяется значениями его переменных (x , y , *life_period*, *hungry*, *health*, *bear*) и от того, как эти переменные соотносятся с параметрами модели (*life_bound*, *bear_bound*, *hungry_bound*). В-третьих, принятие решения каждым агентом осуществляется на основе той информации, которую он получает из окружающей среды. Для него доступна только та информация, которую он наблюдает в результате сканирования соседних клеток, т.е. в области его видимости может находиться не более 8 клеток. Если агент принимает решение двигаться, то перемещаться он может также только в одну из соседних клеток.

Теперь рассмотрим, чем отличаются кочевники от землелепашцев.

Землелепашцы. Как можно догадаться из названия, основной деятельностью землелепашцев является выращивание ресурса, однако делают они это только когда находятся в состоянии «голоден», т.е. при условии $hungry \geq hungry_bound$. Если землелепашец находится в голодном состоянии, то он сканирует пространство вокруг себя на предмет выявления ресурсов. Если ресурсы есть, то землелепашец случайным образом, равновероятно выбирает один из них и потребляет его, занимая ту клетку, на которой был ресурс. Если ресурса нет, то землелепашец остается на месте и осуществляет выращивание ресурса, причем происходит это *на всех* пустых клетках вокруг данной клетки. Выращивание ресурса не приносит агенту дополнительных издержек. Появившийся таким образом ресурс считается культурным и по своим характеристикам не отличается от дикого ресурса, кроме цвета. Если при сканировании пространства ресурсов не обнаружено, агент перемещается в пространстве на любую соседнюю не занятую другими агентами клетку (все направления равновероятны, есть также и нулевое направление, т.е. особь может остаться неподвижной).

Если же землелепашец не находится в состоянии «голоден» (т.е. $hungry < hungry_bound$) и для него выполнено условие $bear > bear_bound$, то для агента приоритетной становится задача продолжения рода. Агент сканирует соседние клетки на предмет наличия других землелепашцев. Если других землелепашцев по соседству обнаружено не было, агент сканирует пространство на наличие ресурса, который можно было бы потребить. Если такие ресурсы есть, агент случайным образом, равновероятно выбирает один из них и потребляет его, занимая ту клетку, на которой был ресурс. Если ресурсов не было обнаружено, агент перемещается в пространстве на любую соседнюю не занятую другими агентами клетку или остается на месте. Если же при

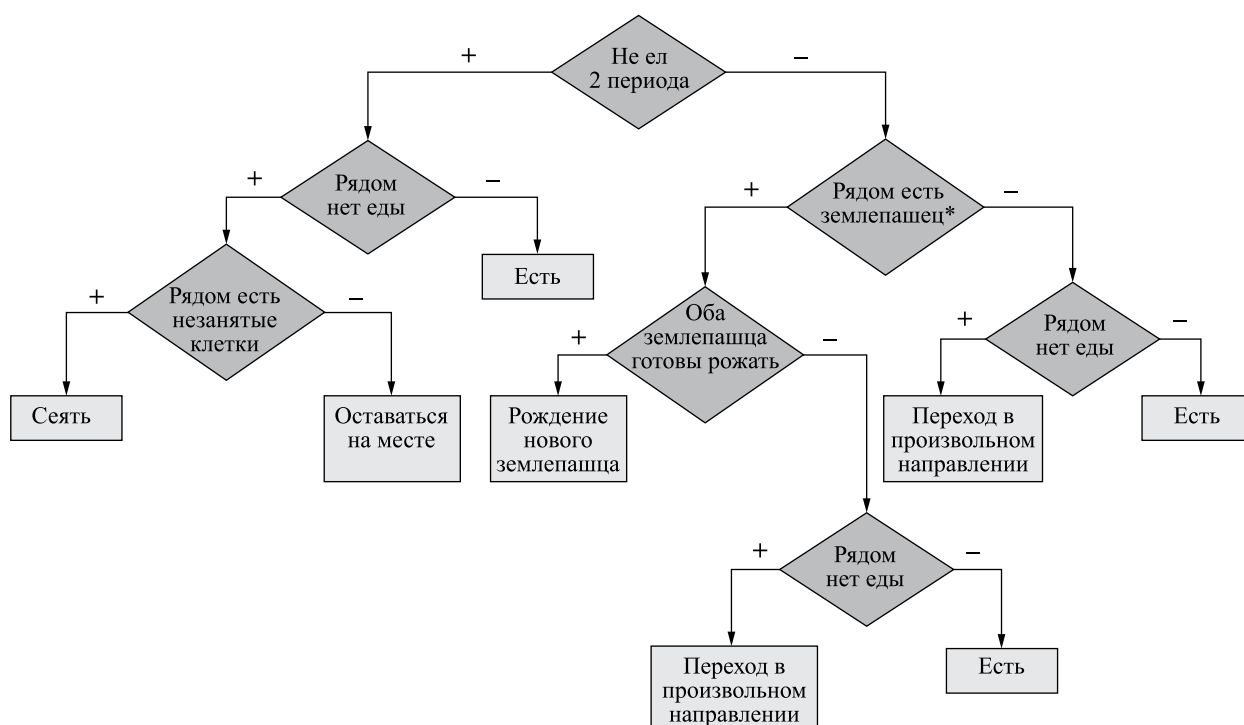


Рис. 1. Алгоритм поведения землепашцев

* Одновременно с этим условием должно быть выполнено условие $13 \leq age \leq 40$, т.е. агент не должен быть слишком молодым и слишком старым.

сканировании соседних клеток были обнаружены другие землепашцы, исходный землепашец выбирает случайно, с равной вероятностью одного из них и, если у выбранного агента выполнено условие $bear > bear_bound$, а также возраст обоих агентов лежит в пределах от 13 до 40 включительно, то в результате их взаимодействия в этот же период появляется новая особь, принадлежащая к типу землепашцев. При этом у обоих землепашцев переменная $bear$ становится равной 0. В результате такого взаимодействия уровень здоровья новой особи равен половине суммы уровней здоровья агентов-родителей, одновременно уровни здоровья агентов-родителей делятся пополам. Здесь и далее условие, что возраст агента должен лежать в пределах от 13 до 40 включительно, означает, что агент не должен быть слишком молод (12 и менее лет) и не должен быть слишком стар (41 и более лет).

Если землепашец не находится в состоянии «голоден» ($hungry < hungry_bound$), но $bear < bear_bound$, то агент не готов участвовать в рождении нового агента. В этом случае агент сканирует соседнее пространство на предмет наличия ресурса, который можно потребить. Если такие ресурсы есть, агент случайным образом, равновероятно выбирает один из них и потребляет его, занимая ту клетку, на которой был ресурс. Если ресурсов не обнаружено, агент перемещается в пространстве на любую соседнюю не занятую другими агентами клетку или остается на месте.

Как видно из описанного алгоритма, землепашцы могут направлять свои усилия только на выращивание нового ресурса. Атаковать кочевников или совершать еще какие-то действия в отношении кочевников они не могут. Приведенный алгоритм поведения землепашцев схематично описан на рис. 1.

Кочевники. Основное отличие кочевников от землепашцев состоит в том, что кочевники ни при каких условиях не могут выращивать ресурс, а в состоянии «голоден» становятся агрессивными к окружающим агентам – в первую очередь к землепашцам, если же их нет поблизости, то агрессия может быть направлена и на кочевника, который оказался на соседней клетке. Агрессия со стороны кочевников обусловлена тем, что в состоянии голода они воспринимают других агентов как конкурентов за ограниченный ресурс. Если же кочевник не голоден, то, как

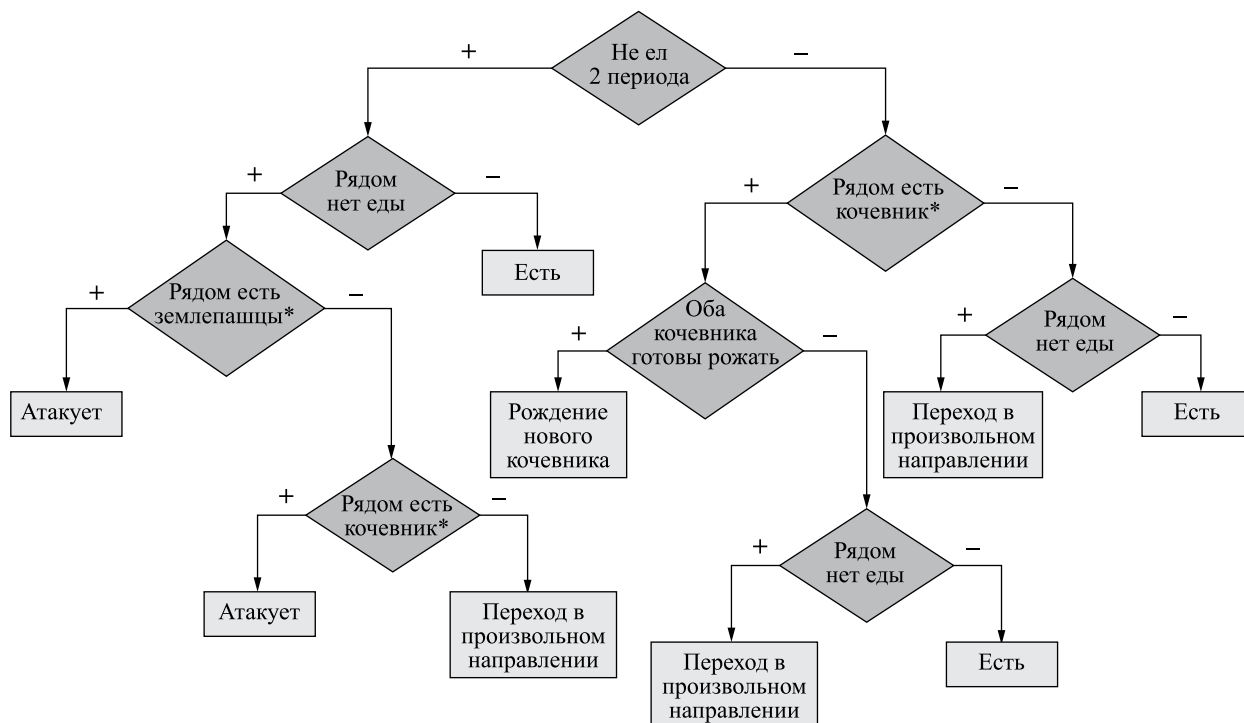
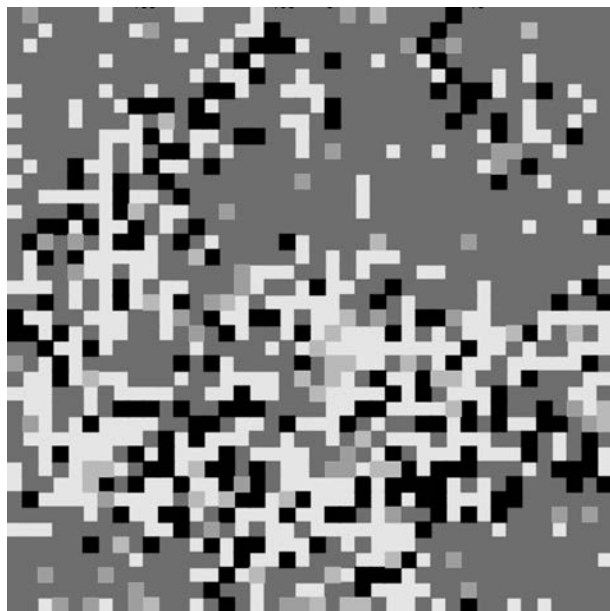


Рис. 2. Алгоритм поведения кочевников

* Одновременно с этими условиями должно быть выполнено условие $age \in [13, 40]$, т.е. агент не должен быть слишком молодым и слишком старым.

Рис. 3. Скриншот ареала модели во время прогона



и у землешащца, на первый план у него выходит инстинкт продолжения рода, т.е. он старается найти другого кочевника для спаривания и рождения новой особи. Опишем алгоритм поведения кочевников более подробно.

Если кочевник находится в состоянии «голоден» ($hungry \geq hungry_bound$), то он сканирует пространство вокруг себя на предмет наличия ресурса. Если вокруг агента есть ресурсы, он с равной вероятностью случайно выбирает один из них и потребляет его, перемещаясь на клетку, где находился ресурс. Если ресурсов вокруг агента нет, он сканирует соседние клетки на предмет наличия землешащцев. Если

землешащцы имеются на соседних клетках, а возраст данного кочевника лежит в пределах [13, 40] лет, он случайным образом, с равной вероятностью выбирает одного из землешащцев и атакует его. Результатом атаки является смерть землешащца, при этом уровень здоровья ликвидированного землешащца прибавляется к уровню здоровья данного кочевника. Во время атаки кочевник своей позиции в пространстве не меняет.

Если землешащцев на соседних клетках не обнаружено, кочевник сканирует пространство вокруг себя на предмет наличия других кочевников, и если они есть, а возраст данного кочевника лежит в пределах [13, 40] лет, то он (по такому же алгоритму) атакует одного из кочевников. Если же все клетки вокруг данного кочевника пустые, он движется в произвольном направлении на любую соседнюю клетку (все направления равновероятны) или остается на своей.

Если кочевник не находится в состоянии «голоден» ($hungry < hungry_bound$), в этом случае его поведение абсолютно идентично поведению неголодного землешца. В этом случае у кочевника на первом плане возникает инстинкт продолжения рода, при этом, как и землешцы, спариваться кочевники могут только с агентами своего типа (т.е. с другими кочевниками) и родить они могут также только кочевника (рис. 2).

Графически модель в процессе своей работы может иметь вид, представленный на рис. 3. На рисунке показано поле 40×40 . Коричневые клетки — это землешцы, черные — кочевники, ярко-зеленые — культурный ресурс, бледно-зеленые — дикий ресурс, белые клетки — свободные (незанятые клетки).

Экспериментально было показано, что начальное число землешцев и кочевников не сильно влияет на динамику модели при достаточно больших периодах наблюдения, так как имеется некоторое равновесное состояние, к которому, начиная с какого-то момента, приходит модель. Главное, чтобы начальное число агентов обоих типов было таким, чтобы они не погибли как вид в первые периоды времени жизни модели, не успев выйти на свое равновесное состояние. Во всех прогонах модели, о которых будет идти речь ниже, начальное число землешцев будет 150, а кочевников — 60.

Соотнесение модели с реальностью. В модели изучается динамика поведения сообщества людей, которая могла бы наблюдаться в древности. Важнейшей характеристикой модели является период модельного времени. Один период модельного времени соответствует одному году. Таким образом, максимальный возраст агентов, заложенный в модели, не может превышать $life_bound = 50$ периодов, что соответствует 50 годам. Для упрощения модели агенты не имеют половой принадлежности, однако рождение новой особи может произойти только при взаимодействии двух особей (предполагается, что одна особь выполняет роль отца, другая — роль матери). У обеих особей период восстановления после родов составляет $bear_bound = 2$ периода.

Уровень здоровья *health* имеет две интерпретации. Данная переменная показывает насколько данный агент является здоровым (чем больше этот показатель, тем лучше здоровье у агента), а также отвечает за уровень запасов агентов. Поэтому когда кочевник убивает какого-то агента, уровень здоровья кочевника увеличивается на величину, равную уровню здоровья ликвидированного агента. Считаем обе интерпретации приемлемыми.

Еще одной важной характеристикой модели является переменная *hungry* и параметр *hungry_bound*. Переменная *hungry* отвечает за уровень голода особи. Поэтому если $hungry > hungry_bound$, то особь считается голодной и пребывает в этом состоянии вне зависимости от ее уровня здоровья *health*. То есть если агент долго не может найти ресурс, то несмотря на уровень здоровья (или уровень запасов), считает ресурс дефицитным, и, в случае если агент является землешцем, он его начинает выращивать, а если кочевником — начинает действовать агрессивно по отношению к другим агентам, убивая их и отнимая их здоровье (запасы).

Клетка — это некоторый участок ареала, который может быть занят только одной особью. Каждая особь находится в своей ячейке в течение одного периода. Это соответствует тому, что каждый агент не покидает свою часть ареала в течение одного года. При этом агенты, расположенные в соседних клетках, могут взаимодействовать друг с другом. Для того чтобы потребить ресурс, агент должен занять ту клетку, на которой этот ресурс расположен. Это соответствует тому, что агент занимает плодородные земли, которые могут прокормить его в течение года и увеличить уровень его здоровья (запасов). У землешцев есть навык выращивать культурный ресурс на соседних клетках.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Опишем процесс тестирования модели. Для этой цели был выбран некоторый базовый набор значений параметров, относительно которого будут выполняться эксперименты. В каждом эксперименте будет выбран один из параметров и относительно него произведена серия

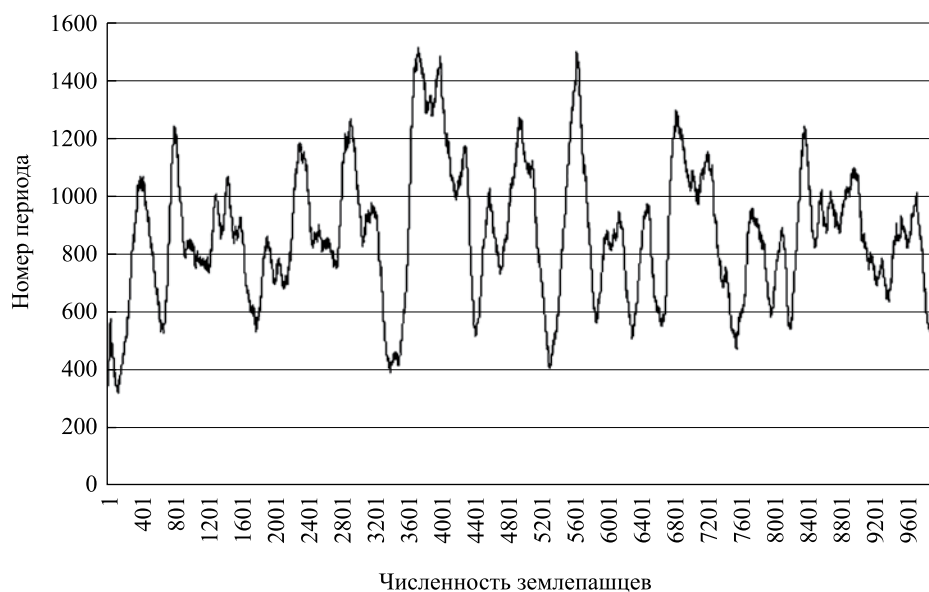


Рис. 4. Динамика изменения численности популяции землепашцев

прогонов. В каждой серии прогонов выбранный параметр будет варьироваться в заданном диапазоне, а все остальные параметры будут принимать базовое значения. Длительность каждого прогона – 4000 периодов. Базовым будем считать следующий набор значений параметров модели: $dim = 50$; $growth_rate = 0,1$; $life_bound = 50$; $hungry_bound = 2$; $bear_bound = 2$.

Проинтерпретируем набор базовых значений параметров. Итак, средой обитания является ареал, имеющий квадратную форму размером 50×50 клеток. Каждый период соответствует одному году, длительность жизни каждого агента ограничивается 50 годами. Если агенту меньше 13 либо больше 40 лет, он считается молодым/старым и это отражается в алгоритме его поведения (см. рис. 1–2). Плодородность любой пустой клетки характеризуется величиной $growth_rate = 0,1$, которая означает, что за год с вероятностью 0,1 на ней будет вырастать 1 дикий ресурс. Соответственно, с вероятностью 0,9 на поле за один год нового дикого ресурса не появится. Параметр $bear_bound = 2$ – после рождения ребенка должно пройти не менее двух лет, чтобы эта же особь смогла родить еще одного ребенка. Параметр $hungry_bound = 2$ – у всех агентов есть внутренние запасы ресурса на 2 года, в течение которых они спокойно себя чувствуют. По истечении этого срока, если агент не потреблял ресурс, его поведение меняется: землепашцы пытаются выращивать дикий ресурс, кочевники – более агрессивно вести себя по отношению к окружающим агентам, так как, невзирая на запасы, оба вида агентов начинают ощущать опасность голодной смерти.

При таком наборе параметров графики изменения численности землепашцев и кочевников за 10 000 периодов работы модели будут иметь следующий вид (рис. 4–5). В табл. 1 приведены значения эксперимента с указанным варьируемым параметром, диапазоном и шагом его вариации.

Таблица 1. Значения эксперимента 1

Номер эксперимента	Варьируемый параметр	Базовые значения параметров	Диапазон варьирования	Шаг варьирования	Число прогонов
1	dim	50	40–60	1	21
2	$growth_rate$	0,1	0–0,18	0,01	19

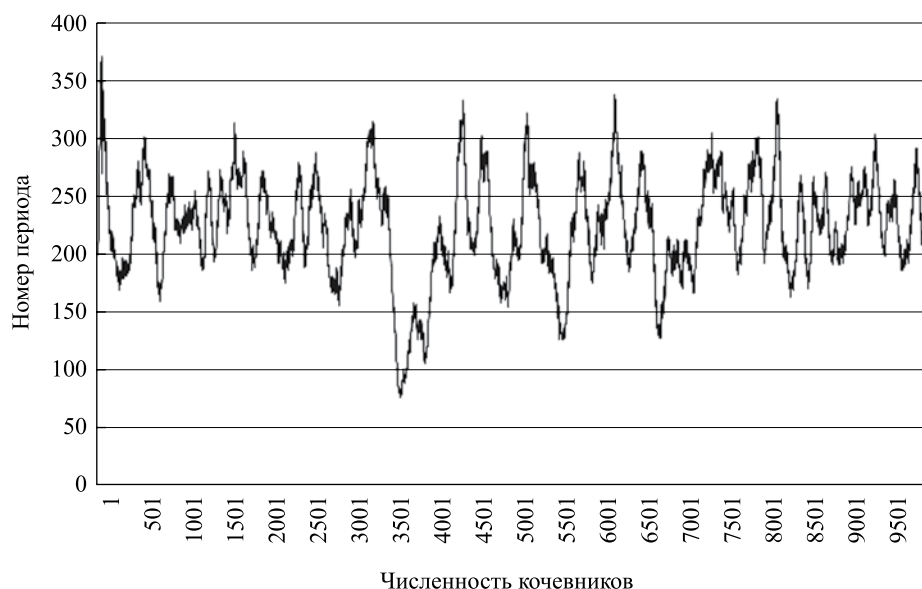


Рис. 5. Динамика изменения численности популяции кочевников

Для каждого значения параметра осуществлялся 1 прогон модели. Условием остановки являлось либо достижение 4000-го периода, либо исчезновение одной из популяций.

Эксперимент 1. Значение параметра dim варьируется в диапазоне от 40 до 60 с шагом 1. Рассматриваются показатели: плотность заселения ареала кочевниками, землепашцами и всеми агентами. *Изучается* влияние изменения параметра dim на динамики усредненной за 4000 периодов доли землепашцев по отношению ко всем агентам (доля землепашцев равна числу землепашцев, деленному на число всех агентов); усредненного за 4000 периодов числа кочевников, землепашцев и всех агентов; рождаемости.

Плотность агентов рассчитывается как усредненное за 4000 периодов число агентов рассматриваемого типа (кочевники, землепашцы или все агенты), деленное на квадрат размерности dim^2 .

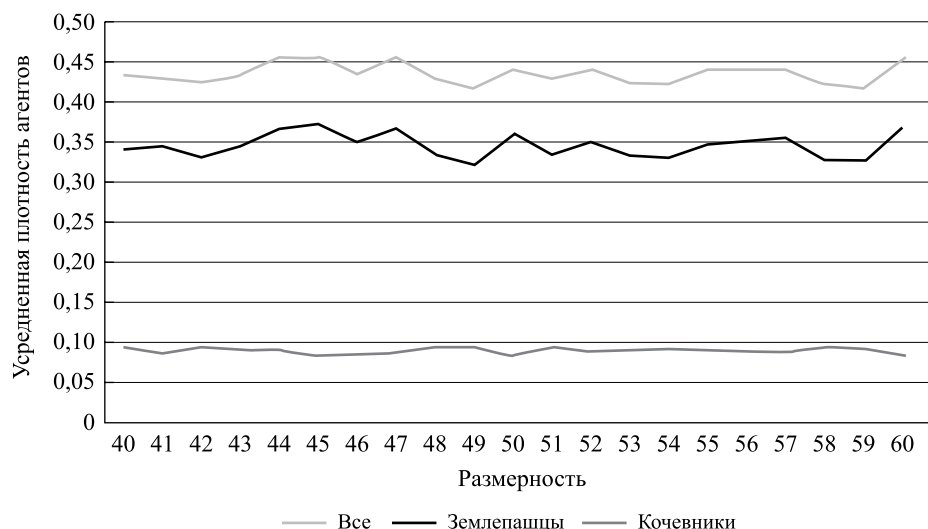
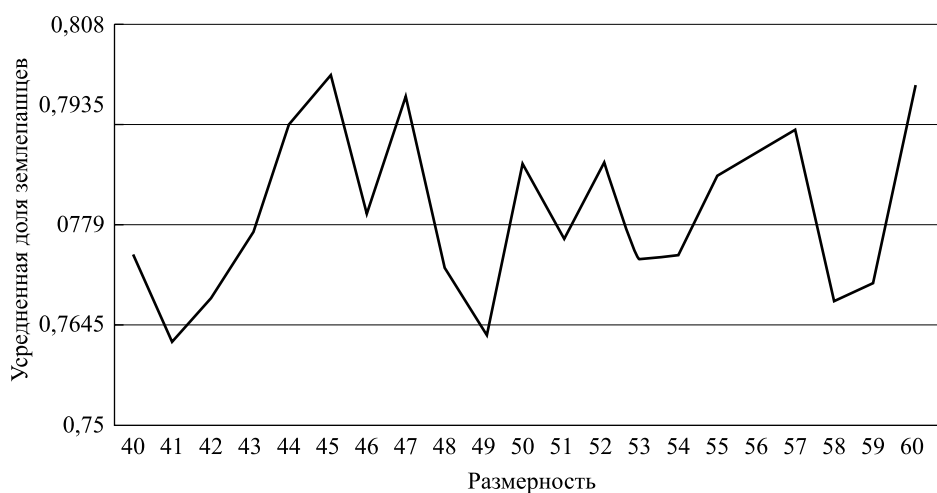
Из приведенных на рис. 6 и 7 графиков можно предположить, что усредненная плотность агентов и усредненная доля землепашцев в среднем не меняется при изменении размерности ареала dim . Для проверки этого предположения воспользуемся критерием восходящих и нисходящих серий (Айвазян, 2010, с. 316–318) и проверим гипотезу о том, что математическое ожидание исследуемых рядов является постоянной величиной, т.е. $H_0: x_i = a = \text{const}$.

Для применения этого критерия на основе исходного ряда $x_1, \dots, x_N$ строится вспомогательная последовательность, в которой на месте i ставится плюс, если $x_{i+1} > x_i$, и минус, если $x_{i+1} < x_i$. Последовательность подряд идущих плюсов будут образовывать восходящую серию, а подряд идущих минусов – нисходящую серию. Критерий основан на том, что если выборка случайна (наблюдения независимы и одинаково распределены), то в образованной нами последовательности знаков общее число серий не может быть слишком малым, а их протяженность не может быть слишком большой. Для уровня значимости $0,050 < \alpha < 0,0975$ количественное выражение этого правила имеет вид:

$$\nu(N) > \left\lfloor \frac{2N-1}{3} - 1,96 \sqrt{\frac{16N-29}{90}} \right\rfloor, \quad \tau(N) < \tau_0(N),$$

где N – число наблюдений. Для случая $N = 21$ получаем $\nu(N) > 10,047$, $\tau(N) < 5$.

Если хотя бы одно из этих неравенств нарушено, то рассматриваемая гипотеза H_0 отвергается. Для усредненной плотности кочевников имеем $\nu(N) = 11$, $\tau(N) = 4$, для землепашцев – $\nu(N) = 13$, $\tau(N) = 3$, для всех агентов – $\nu(N) = 12$, $\tau(N) = 3$. для показателя усредненной доли

Рис. 6. Усредненная плотность агентов в зависимости от dim Рис. 7. Усредненная доля землепашцев в зависимости от dim

землепашцев — $\nu(N)=12$, $\tau(N)=4$. Таким образом, согласно этому критерию рассматриваемые ряды данных можно считать независимо и одинаково распределенными величинами, т.е. плотность заселения ареала агентами и доля кочевников в среднем не меняется при варьировании размерности ареала dim .

Среднее значение по всем изучаемым размерностям усредненной плотности заселения на ареале агентов равно 0,44, среднее значение усредненной плотности землепашцев — 0,35, для кочевников — 0,09, среднее значение по всем рассматриваемым размерностям усредненной доли землепашцев — 0,78.

Изучим динамику усредненного за 4000 периодов числа кочевников и землепашцев в зависимости от размерности dim (рис. 8). Из графика видно, что с точностью до случайных ошибок зависимость скорее всего имеет линейный характер. Для того чтобы проверить это, построим линейную регрессию вида

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где y_i — усредненное за 4000 периодов количество землепашцев либо кочевников, x_i — значение параметра dim , которое меняется от 40 до 60 с шагом 1 (21 наблюдение); α , β — коэффициенты

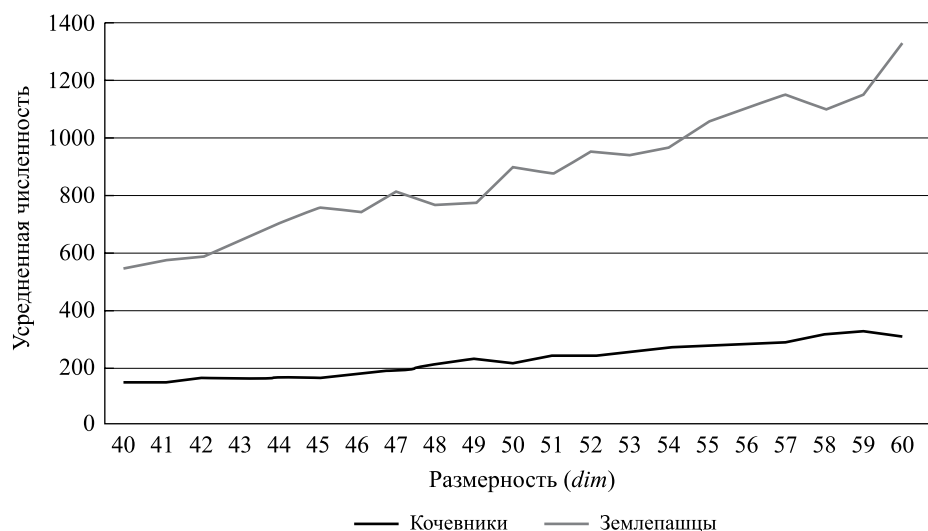


Рис. 8. Усредненная численность землепашцев и кочевников в зависимости от dim

регрессии. В случае когда y_i характеризует численность землепашцев/кочевников, оценка регрессии представлена в табл. 2. Из полученных оценок регрессии видно, что увеличение размерности ведет к увеличению землепашцев в среднем примерно на 34 особи и увеличению кочевников в среднем на 9 особей.

Теперь рассмотрим динамику усредненной за 4000 периодов рождаемости землепашцев и кочевников. Из рис. 9 видно, что зависимость может иметь линейный характер.

Таблица 2. Эксперимент 1. Оценка регрессии для численности землепашцев/кочевников

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение
Землепашцы: $R^2=0,96$, $DW=1,742$				
α	-822,123	77,83993	-10,5617	2,17E-09
β	33,955	1,545506	21,97015	5,73E-15
Кочевники: $R^2=0,97$, $DW=1,763$				
α	-225,456	16,82661	-13,3988	3,94E-11
β	9,073616	0,334091	27,15911	1,15E-16

Таблица 3. Эксперимент 1. Оценка регрессии для рождаемости землепашцев/кочевников

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение
Землепашцы: $R^2=0,96$, $DW=1,746$				
α	-27,8311	2,554958	0,893	1,3E-09
β	1,145784	0,050729	22,5866	3,45E-15
Кочевники: $R^2=0,97$, $DW=1,889$				
α	-6,9232	0,53661	-12,9017	7,55E-11
β	0,277113	0,0154	26,00936	2,56E-16

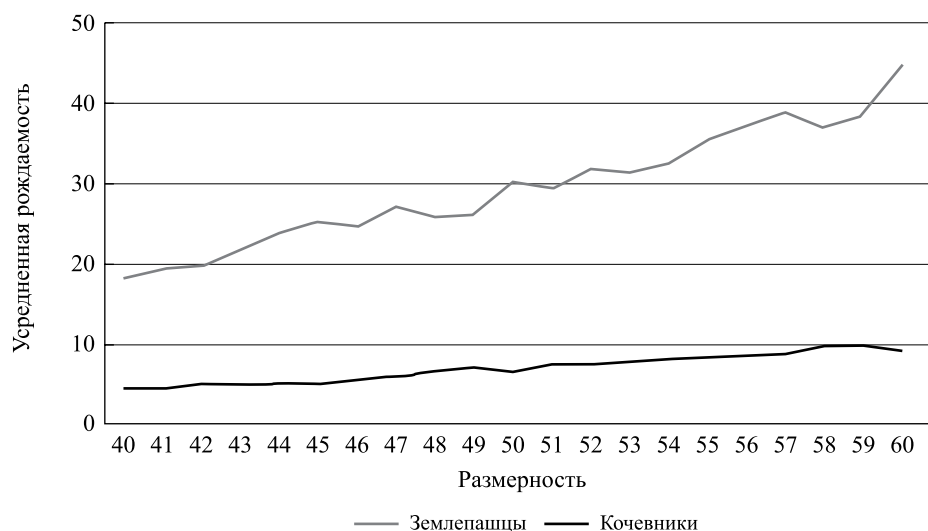


Рис. 9. Усредненная рождаемость землепашцев и кочевников

Проверим это, построив линейную регрессию вида (1) для рождаемости у землепашцев и у кочевников (табл. 3). Из приведенных регрессий видно, что увеличение размерности dim на единицу увеличивает число родившихся землепашцев в среднем на 1,15 особей, а число кочевников — в среднем на 0,28. У всех полученных регрессий высокий показатель R^2 говорит об очень хорошей объясняющей способности этих регрессий.

Эксперимент 2. В этом эксперименте значение параметра $growth_rate$ варьируется в диапазоне от 0 до 0,18 с шагом 0,01. Когда значения этого параметра находятся в диапазоне $[0, 0,13]$, оба племени сосуществуют друг с другом, при $growth_rate > 0,13$ землепашцы в какой-то момент вымирают, остаются только кочевники. Объясняется это тем, что при достаточно большом значении данного параметра дикого ресурса становится настолько много, что востребованность в культурном ресурсе у кочевников пропадает и они постепенно убивают всех землепашцев. Изучается динамика показателей: усредненное количество агентов, усредненная доля землепашцев и усредненная рождаемость. Число периодов равно 4000.

Как видно из графика, приведенного на рис. 10, усредненная численность агентов линейно зависит от $growth_rate$. Построим регрессии для проверки этой гипотезы.

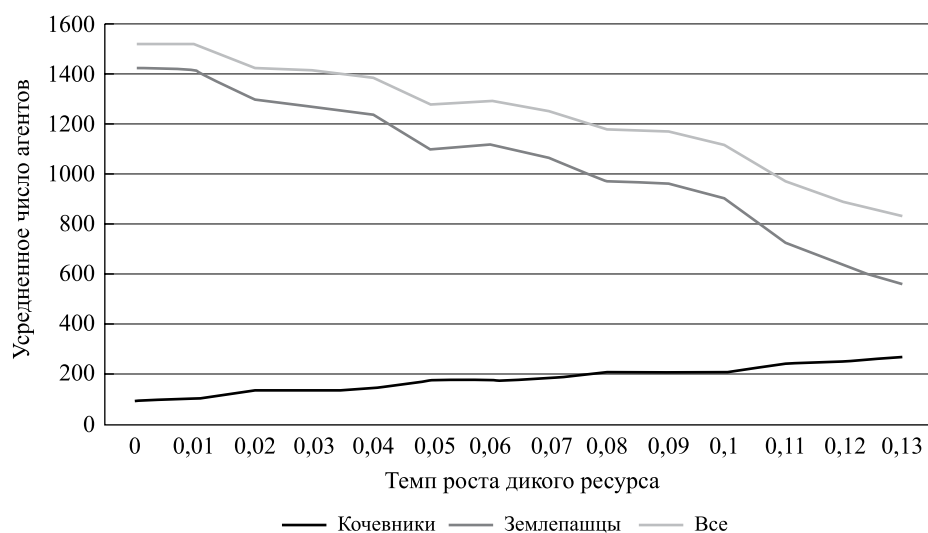


Рис. 10. Усредненная численность агентов в зависимости от темпа роста дикого ресурса

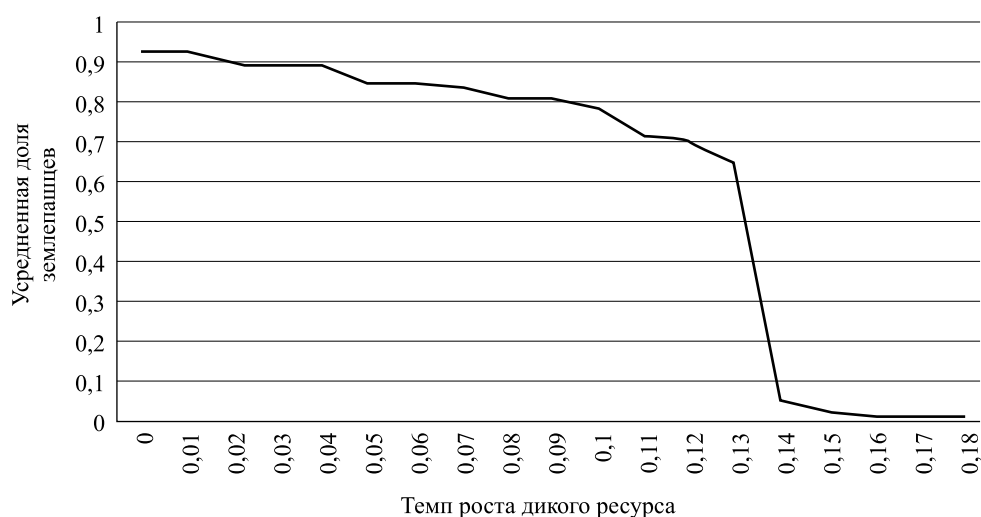


Рис. 11. Усредненная доля землепашцев в зависимости от темпа роста дикого ресурса

Рассмотрим регрессию, аналогичную регрессии (1):

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i, \quad (2)$$

где x_i — отвечает за показатель *growth_rate*, который будет меняться от 0 до 0,13 (14 наблюдений) (ограничимся диапазоном, при котором землепашцы не вымирают). В качестве y_i будут подставляться разные показатели. Для случая землепашцев и кочевников данные приведены в табл. 4. Из полученных оценок видно, что увеличение темпа роста дикого ресурса на 0,01 приводит к уменьшению численности землепашцев в среднем на $6436,09 \times 0,01 \approx 64,4$, а для кочевников — на $1298,9 \times 0,01 \approx 13,0$.

Теперь изучим влияние параметра *growth_rate* на долю землепашцев (рис. 11). Построим регрессию, в которой y_i будет отвечать за долю землепашцев, а объясняющей переменной будет параметр *growth_rate*, который меняется от 0 до 0,13. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 4. Эксперимент 2. Результаты оценки регрессии для численности землепашцев/кочевников

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
Землепашцы: $R^2=0,97$, $DW=1,129$				
α	1465,422	25,51804	57,42691	5,13E-16
β	-6436,09	333,633	-19,2909	2,13E-10
Кочевники: $R^2=0,99$, $DW=2,351$				
α	98,12649	3,531523	27,78588	2,92E-12
β	1298,913	46,17258	28,13169	2,52E-12

Таблица 5. Эксперимент 2. Влияние параметра *growth_rate* на долю землепашцев

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
α	0,967252	0,034183	28,29629	2,35E-12
β	-1,96515	0,446923	-4,39707	0,00087

Примечание. $R^2=0,62$, $DW=0,489$.

Из полученных значений видно, что увеличение параметра *growth_rate* на 0,01 в среднем приводит к уменьшению доли землелашцев приблизительно на $1,97 \times 0,01 \approx 0,02$. Однако невысокое значение R^2 говорит о ее не слишком хорошей объясняющей способности этой регрессии.

Попытаемся построить более хорошую оценку зависимости. Для этого выдвинем гипотезу о том, что доля землелашцев зависит не только от *growth_rate*, но и от квадрата этой величины. То есть в рамках данной гипотезы предполагается не линейная, а параболическая зависимость доли землелашцев от параметра *growth_rate*:

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i, \quad (3)$$

где переменные y_i и x_i те же самые, что и в регрессии (2). Метод наименьших квадратов дает следующую оценку коэффициентов этой регрессии, представленную в табл. 6.

У этой регрессии очень высокий R^2 указывает на ее очень хорошую объясняющую способность. Оценки параметров α и β_2 статистически значимы на уровне не менее чем 1%. Однако коэффициент β_1 имеет низкое значение t -статистики, что указывает на его незначимость. Тем не менее проведем анализ результатов данной регрессии.

Исследуя зависимость $f(x) = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 x^2$, получаем, что ее максимум достигается при $x = -\beta_1 / \beta_2$. Таким образом, с увеличением x в область положительных значений квадратичная функция будет уменьшаться, более того, учитывая то, что $\beta_2 < 0$, первая и вторая производные будут отрицательными при достаточно больших x . Такая динамика также может быть замечена из рис. 11. Однако, проводя этот анализ, необходимо помнить о статистической незначимости МНК оценки параметра β_1 .

Теперь представим анализ усредненного за 4000 периода показателя рождаемости в популяции кочевников и землелашцев (рис. 12, табл. 7). Согласно полученным оценкам увеличение темпа роста дикого ресурса на 0,01 приводит к уменьшению рождаемости у землелашцев в среднем на $217,6 \times 0,01 \approx 2,2$, а у кочевников – на $43,8 \times 0,01 \approx 0,4$.

Эксперимент 3. Как видно из эксперимента 2, вымирание землелашцев за 4000 периодов наблюдается при *growth_rate* > 0,13. В эксперименте 3 было проведено 12 независимых прогонов с одинаковым значением параметров *dim* = 50, *growth_rate* = 0,13. Каждый прогон – 4000 периодов.

Таблица 6. Эксперимент 2. Влияние параметра *growth_rate* на долю землелашцев

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение
α	0,921701	0,009598	96,03331	1,95E-17
β_1	–0,24252	0,342837	–0,70739	0,494038
β_2	–13,4554	2,542678	–5,29182	0,000256

Примечание. $R^2 = 0,98$, $DW = 1,553$.

Таблица 7. Эксперимент 2. Влияние параметра *growth_rate* на рождаемость землелашцев/ кочевников

Коэффициент	Оценка значения коэффициента	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение
Землелашцы: $R^2 = 0,96$, $DW = 1,201$				
α	49,3989	0,936962	52,7224	13E-15
β	–217,591	12,25023	–17,7622	5,55E-10
Кочевники: $R^2 = 0,98$, $DW = 2,174$				
α	2,557761	0,143057	17,87926	5,14E-10
β	43,83289	1,870391	23,43515	2,18E–11

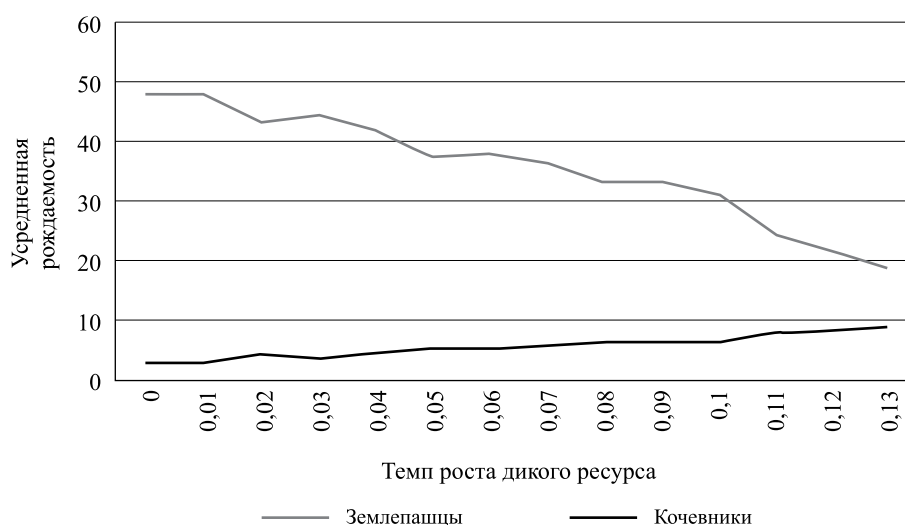


Рис. 12. Усредненная рождаемость земледельцев и кочевников в зависимости от темпа роста дикого ресурса

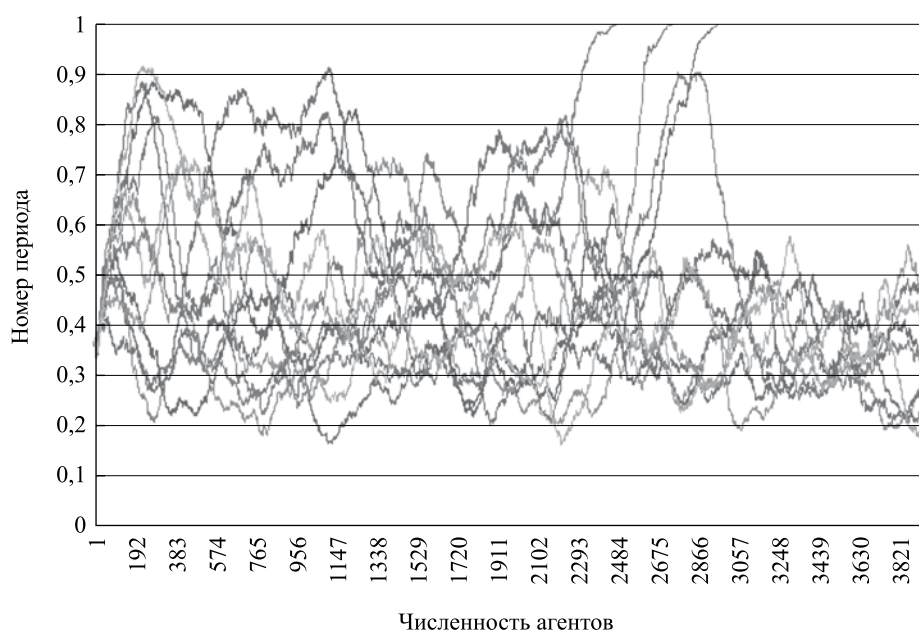


Рис. 13. Динамика изменения доли кочевников в каждом из 12 прогонов

В результате эксперимента получаем, что в 9 из 12 прогонов к 4000 периоду обе популяции живы, тогда как в 3 прогонах к 4000 периоду в живых остались только кочевники (рис. 13). Отметим, что при $growth_rate = 0$ вымирание кочевников не наблюдается. Это происходит, во-первых, потому что на ареале численно преобладают земледельцы и они производят достаточно культурного ресурса, часть которого достается кочевникам. Во-вторых, кочевники вынуждены вести себя агрессивно, атакуя земледельцев. При этом, согласно алгоритму, кочевники овладевают запасами ликвидированных земледельцев, что также увеличивает их живучесть.

ВЫВОДЫ

Для исследуемого диапазона параметров выявлены закономерности того, как динамика модели изменяется в зависимости от изменения параметров модели. Выявлено, что при изменении размерности (dim варьируется от 40 до 60) по некоторым переменным модель не меняется, тогда как закон

изменения других переменных носит линейный характер. С помощью методов математической статистики было выявлено, что такие показатели, как средняя плотность заселения агентов обоих видов, на ареале в среднем остаются неизменными, а показатель усредненной доли кочевников в среднем не меняется с изменением размерности. Такой результат свидетельствует о том, что качественно динамика модели не меняется с изменением величины ареала в рассматриваемом диапазоне.

Средняя численность землелашцев и кочевников, а также средняя рождаемость линейно зависят от размерности. С помощью метода наименьших квадратов были найдены оценки параметров такой линейной зависимости.

При исследовании изменения динамики модели в зависимости от темпа роста дикого ресурса (*growth_rate*) было выявлено, что динамика модели будет приходить к двум различным режимам. При достаточно высоком значении параметра *growth_rate*, начиная с какого-то момента модельного времени, землелашцы полностью вымирают. В живых остаются кочевники, которым хватает дикого ресурса и потребности в культурном ресурсе у них нет. Это происходит потому, что кочевники начинают воспринимать землелашцев как конкурентов на дикий ресурс и постепенно убивают всех землелашцев.

При достаточно низком уровне параметра *growth_rate* оба типа агентов сосуществуют на ареале. Интересно, что даже при нулевом значении *growth_rate* у кочевников получается выживать. Удастся им это потому, что они отнимают часть культурного ресурса у землелашцев, а если ресурса рядом нет, кочевники могут атаковать других агентов, присваивая себе их накопленный ресурс (уровень здоровья). Очевидно, что при низких значениях *growth_rate* кочевники могут выживать только за счет землелашцев. Если землелашцы по какой-то причине вдруг исчезают, кочевники также обречены на вымирание.

В представленной работе был сделан упор на изучение динамики усредненных за 4000 периодов величин. Однако модель имеет большой потенциал для исследований не только средних величин. Интересно проанализировать перемещения и концентрацию агентов на ареале. Визуальное наблюдение показывает, что землелашцы склонны к сбиванию в большие, плотно населенные сообщества и оседанию на определенном участке территории, тогда ареалы кочевников менее плотно населены и кочевники более склонны к перемещению в поисках нового ресурса. В изучении такого рода явлений может помочь кластерный анализ, поэтому данное направление скорее всего послужит отправной точкой для последующих работ. Другим направлением для изучения этой модели является создание различных модификаций представленной модели. Здесь также имеется большой потенциал для исследований.

В заключение отметим, что данная статья является первой попыткой взглянуть на человеческую цивилизацию как цивилизацию, в которой, взаимодействуя друг с другом, сосуществуют два принципиально различающихся класса агентов, отличающихся друг от друга типом воспроизводства. Хотя полученная модель моделирует скорее древние цивилизации, не исключено, что и модель современной цивилизации может быть получена на основе тех же принципов разделения агентов на два типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А. (2010). Методы эконометрики. М.: Магистр, ИНФРА-М.
- Базыкин А.Д. (1985). Математическая биофизика взаимодействующих популяций. М.: Наука.
- Макаров В.Л., Бекларян Л.А., Белоусов Ф.А. (2014). Установившиеся режимы в модели Хенинга и ее модификациях // *Машинное обучение и анализ данных*. Т. 10. С. 1385–1395.
- Тоинби А. (1991). Постигание истории. М.: Прогресс.
- Epstein J., Axtell R. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up*. Washington: Brookings Institution Press.
- Heckbert S.M. (2013). An Agent-Based Model of the Ancient Maya Social-Ecological System. [Электронный ресурс] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 16. No. 4. P. 11. Режим доступа: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/11.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз. рус. (дата обращения: январь 2017 г.).

- Wittek P., Rubio-Campillo X. (2012). Scalable Agent-Based Modeling with Cloud HPC Resources for Social Simulations. In: IEEE 4th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom) December 3–6. Taipei, Taiwan. P. 355–362.

Поступила в редакцию
07.07.2016 г.

REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Aivazian S.A. (2010). Methods of Econometrics. Moscow: Magistr, INFRA-M (in Russian).
- Bazykin A.D. (1985). Mathematical Biophysics of Interacting Populations. Moscow: Nauka (in Russian).
- Epstein J., Axtell R. (1996). Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up. Washington Brookings Institution Press.
- Heckbert S.M. (2013). An Agent-Based Model of the Ancient Maya Social-Ecological System. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16, 4, 11. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/11.html> (accessed: January 2017).
- Makarov V.L., Beklaryan L.A., Belousov F.A. (2014). Steady Regimens in Henning Model and its Modifications. *Journal of Machine Learning and Data Analysis*, 10, 1385–1395 (in Russian).
- Toynbee A.J. (1934–1961). A Study of History. Moscow: Progress.
- Wittek P., Rubio-Campillo X. (2012). Scalable Agent-Based Modeling with Cloud HPC Resources for Social Simulations. In: IEEE 4th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom) December 3–6. Taipei, Taiwan, 355–362.

Received 07.07.2016

MODEL OF CIVILIZATION WITH TWO TYPES OF REPRODUCTION OF PRODUCT (MODEL OF NOMADS AND PLOWMEN)*

F.A. Belousovⁱ

Abstract. In this article a model of interaction of the two types of civilizations is considered. These two types of civilizations were conventionally called “nomads” and “plowmen”. Each type is characterized by its method of product reproduction, which is necessary for agents of both types. If plowmen reproduce product by using their skills, nomads reproduce nothing, instead they consume that resource which they find, including the resource they take away from plowmen and the other nomads. This product is also a resource; it is the main object of competition between the agents. It is the main reason for aggression of one group of agents towards the others. In addition to the product that is reproduced by plowmen, there is also a wild resource that appears in the range in randomly defined places with a given intensity. According to the author’s intention, the constructed model is a simplified model of the ancient world, in which each of the civilizations could be classified as one of the two considered types. Typical representatives of the civilization of plowmen are the civilizations of Mesopotamia, the front of Asia, Byzantine and Roman empires, etc. Classic nomadic civilization is represented by nomadic civilizations of the Great steppe. The model is implemented on the basis of the agent-based approach in the software package AnyLogic. In this work a number of experiments have been conducted. In experiments the study has been made of how characteristics of coexistence of two types of the civilizations vary depending on the variation of considered parameters. Important parameters of the model, impact of which was studied, are the size of habitat and growth rate of the wild resource. Based on the obtained data, statistical and econometric analysis is conducted.

Keywords: artificial society, agent-based modeling, nomads, plowmen.

JEL Classification: C63.

*The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-36-00338).

ⁱFedor A. Belousov – Scientific researcher CEMI RAS; Russia, Moscow, sky_tt@list.ru.