

Модель “кочевников” и “землепашцев” с ограниченным ресурсом пространственного перемещения

© 2019 г. Ф.А. Белоусов

ЦЭМИ РАН, Москва

E-mail: sky_ft@list.ru

Поступила в редакцию 1.12.2018 г.

В работе (Белоусов, 2017) была построена и изучена модель с простейшей социальной структурой, в которой агенты разделены на два типа – кочевников и землепашцев, каждый из которых отличается отношением к способу производства продукта. Землепашцы умеют самостоятельно воспроизводить продукт, а кочевники не наделены такими навыками, вместо этого они способны находить такой продукт на ареале, в том числе и отнимая его у землепашцев. В указанной работе был изучен вопрос как вымирания одной из рассматриваемых цивилизаций, так и вопрос сосуществования этих цивилизаций на едином пространстве в течение наблюдаемого периода. В настоящей работе развивается исходная модель кочевников и землепашцев, и в нее добавляются новые условия, связанные с ограничениями на передвижения агентов. Теперь агентам на протяжении своей жизни запрещено удаляться от места рождения дальше некоторого экзогенно заданного расстояния. В силу того что исходная модель является скорее моделью древнего общества, ее развитие в большей степени отражает происходившие в древние времена социально-демографические процессы. У древних людей, возможно за редким исключением, не было возможностей преодолевать большие расстояния, и они так или иначе были привязаны к месту своего рождения и постоянного обитания. Проведена серия экспериментов и на их основе определены области значений введенного в модель параметра, при которых наблюдается та или иная качественная динамика всей системы. Ценность данной работе добавляет то, что появившийся доступ к более производительным вычислительным мощностям позволил осуществить более качественные расчеты. Так, в исходной модели расчеты осуществлялись длиной в 4000 периодов модельного времени, а в новой модели эта характеристика выросла до 15000 и 20000 периодов. Такой рост данного показателя позволяет выявить новую качественную динамику не только в новой представленной модификации, но и в исходной модели кочевников и землепашцев.

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

Классификация JEL: C63.

DOI: 10.31857/S042473880003336-8

ВВЕДЕНИЕ

В истории человеческой цивилизации неоднократно можно было наблюдать явления внезапного и неожиданного исчезновения целого социума (государства, племени). В ряде случаев полностью исчезали целые популяции, в других случаях наблюдалось частичное исчезновение большего числа представителей некоторого общества. В качестве исторических примером таких явлений можно привести исчезновение племени Майя (Ко, 2007; Gallenkamp, 1959), гибель цивилизаций Ближнего Востока на рубеже XIII–XII вв. до н.э. (древние египтяне, вавилоняне, минойцы и микенцы, хетты и др.) (Dickinson, 2007; Cline, 2014), гибель Римской империи (Гиббон, 2001; Грант, 1998), а также исчезновение жителей острова Пасхи (Бурбон, Фабианис, 2008; Hunt, 2007). Причинами резкого сокращения населения могут быть внешние негативные факторы (например, наводнение, извержение вулкана или какое-либо другое катастрофическое природное события) или факторы, связанные с социальной напряженностью внутри рассматриваемого общества (например, агрессия одних представителей общества по отношению к другим, революции, войны).

В рамках данной работы изучаются вопросы исчезновения цивилизаций не за счет внешних негативных факторов, а за счет внутренних причин.

Одним из наиболее заметных ученых, занимавшихся вопросами возникновения и исчезновения цивилизаций, является известный британский историк, философ истории, культуролог и социолог Арнольд Тоинби (Тоинби, 1991). Он выделил собственную систему критериев, на основе которых составил список цивилизаций, а также осуществил попытку дать объяснение гибели некоторых из них. Кроме этого, на основе выявленных закономерностей определил, какие из ныне живущих цивилизаций скорее всего также должны будут исчезнуть.

С развитием вычислительных технологий появился еще один инструмент для исследования рассматриваемых вопросов, который состоит в моделировании происходящих в обществе процессов. К наиболее простым моделям можно отнести модели типа “хищник – жертва”, она же модель Лотки – Вольтерра (Базыкин, 1985, глава 3), в которой языком дифференциальных уравнений описывается взаимодействие между хищниками и жертвой. Однако модели такого типа характерны скорее для дикой природы, нежели для человеческого общества.

Следующая серия моделей, которую можно было бы выделить, это модели, в которых приводится динамика развития целой экосистемы, и в частности изучаются вопросы внезапного сокращения большой численности видов живых организмов в результате внутренних причин. К моделям такого типа можно отнести (David, 1986, p. 1528–1533; Bak, Cao Tang, Wiesenfeld, 1987, p. 381–384; Bak, Cao Tang, Wiesenfeld, 1988, p. 364–374).

Хочется отметить модель “хищник – жертва”, разработанную Р. Соле и С. Манрубиа (Sole, Manrubia, 1996, p. R42–R45; Henning, 2008, p. 175–193; Bahn, Flenley, 1992). Проблема данной модели состоит в том, что изначально в ней не ставится задача описать процессы, происходящие в обществе. Поэтому на основе модели Соле – Манрубиа разработано несколько модификаций, с помощью которых сделана попытка изучить социальные, демографические и экономические процессы в обществе. Результаты данных исследований можно найти в (Белоусов, 2014, с. 319–323; Макаров, Бекларян, Белоусов, 2014, часть 1, с. 1385–1395).

Во всех указанных выше работах применены различные инструментариумы имитационного моделирования для исследования процессов как в дикой природе, так и в обществе. Однако агент-ориентированный подход если и применялся в рамках указанных работ, то не в полной мере. Одной из первых работ, в которой наиболее ярко было продемонстрировано агент-ориентированное моделирование, является хорошо известная сахарная модель (Epstein, Axtell, 1996). В ней рассмотрены агенты, у которых есть возможность перемещаться в пространстве, взаимодействовать друг с другом и одной из основных потребностей для них является сбор и добыча ресурса, который называется “сахаром”. Было рассмотрено множество модификаций данной модели, в том числе и с различной социальной структурой, однако вопросу вымирания цивилизации за счет внутрисоциальных причин в данной работе большого внимания уделено не было. Модель, похожая на сахарную модель, в которой был изучен данный вопрос, представлена в (Макаров, Бекларян, Белоусов, 2014, часть 2, с. 1385–1395).

В качестве следующего шага построения имитационных и агент-ориентированных моделей можно выделить этап построения моделей с более сложной социальной структурой. В таких моделях агенты уже не однородны, они разделены на классы, принципиально отличающиеся друг от друга. К такому классу моделей относится рассматриваемая здесь модель “кочевников” и “землепашцев” (Белоусов, 2017). Более детальное исследование временных рядов, полученных с помощью этой модели, можно найти в работе (Белоусов, 2018).

Отметим также и другие работы, в которых реализованы агент-ориентированные модели отдельно взятых древних обществ. Среди таких работ можно отметить (Heckbert, 2013), в которой построена модель племени Майя, также работы, связанные с высокопроизводительным программным обеспечением Пандора (Pandora) (Witek, Rubio-Campillo, 2012, p. 355–362), с помощью которого изучается сообщество охотников и собирателей, обитавших в северном Гуджарате (Индия). Отличительной чертой указанных публикаций от представленной здесь работы является то, что в рамках данной статьи реализована модель не конкретного общества со своими географическими, климатическими и прочими особенностями, а максимально простая модель, в которой учтены лишь наиболее важные факторы, определяющие качественную динамику развития общества.

В модели кочевников и землепашцев факторы положительного и отрицательного влияния агентов друг на друга играют ключевую роль, определяя глобальную динамику системы в целом. Приведем ссылку на другие работы, в рамках которых отдельно изучаются вопросы положительных и отрицательных взаимоотношений агентов друг с другом внутри некоторого общества. Например, в работе (Younger, 2005) данный вопрос изучен с применением имитационного моделирования; в работе (Blume, 2004) исследовались вопросы положительного внутривидового взаимодействия с помощью теоретико-игрового подхода. Однако в этих и других аналогичных работах не изучался вопрос исчезновения популяций в результате наличия негативных взаимоотношений между агентами.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Полное описание модели можно найти в работе (Белоусов, 2017). Приведем краткое описание исходной модели и дополнительные ограничения, составляющие суть модифицированной модели.

Модель состоит из трех компонент: это агенты, взаимодействующие друг с другом, ареал (территория) их обитания и ресурс (продукт или еда), который появляется на ареале по определенному правилу. Агенты разделены на два класса – кочевники и землепашцы. Землепашцы характеризуются тем, что они умеют воспроизводить (выращивать) продукт, кочевники таким навыком не обладают, единственный их способ выжить – перемещаться по пространству в поисках ресурса. Их преимуществом по отношению к землепашцам является то, что у них есть способность проявлять агрессию как к землепашцам, так и к своим собратьям кочевникам. Подробно правила, формирующие поведение агентов, рассматривать не будем; вкратце можно сказать, что в основе психологии каждого агента лежат два инстинкта – инстинкт выживания и инстинкт размножения.

Инстинкт выживания начинает преобладать в поведении агента над инстинктом размножения в ситуациях, когда агент испытывает голод. Под влиянием этого инстинкта кочевники могут проявлять агрессию к другим агентам, рассматривая их в качестве конкурентов. В этом состоянии землепашцы склонны к созданию нового ресурса для потребления его в последующих периодах. Вне зависимости от типа агента в случае когда агент не голоден, в его поведении начинает преобладать второй инстинкт – инстинкт размножения. Выражается это в поиске партнера (агента своего типа) для спаривания, в результате которого может родиться новый агент такого же типа.

В модели присутствует еще и “дикий ресурс”, который возникает на ареале сам по себе, без помощи землепашцев. Темп его появления служит важным параметром модели и обозначается через *growth_rate*. Другими параметрами модели будут: *dim* – размерность квадратного ареала (размер ареала $dim \times dim$ клеток), *life_bound* – предельный возраст агента, параметр *hungry_bound* – пороговое значение для определения, какой из инстинктов в данный момент является приоритетным.

Базовым будем считать следующий набор значений параметров модели: $dim = 50$; $growth_rate = 0,1$; $life_bound = 50$; $hungry_bound = 2$; $bear_bound = 2$. Все эксперименты в рамках данного исследования будем проводить относительно этого набора параметров.

Введем дополнительные ограничения в описанную модель. В новой модифицированной модели будем предполагать, что агенты не могут уходить от места своего рождения дальше, чем некоторое заданное число. То есть и кочевники, и землепашцы привязаны к месту своего рождения и дальше некоторого расстояния, равного для всех агентов, от этого места отходить не могут. Другими словами, для каждого агента существует область в виде квадрата (либо прямоугольника, если он родился не далеко от границы ареала), за пределы которого у него нет возможности выйти. Параметр модели, отвечающий за максимальное расстояние, на которое агенты могут отходить от места своего рождения, будем обозначать через *radius*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Интуитивно понятно, что введенное ограничение на перемещение агентов в большей степени ударит по кочевникам, нежели землепашцам, поскольку для кочевников возможность передвигаться по ареалу является гораздо более важным навыком, так как только с помощью этого навыка они

могут находить больше ресурса, отбирая его у землепашцев либо натываясь на дикий ресурс. Для землепашцев навык к передвижению не так важен, поскольку они могут прокормить себя, обитая на очень ограниченном пространстве, самостоятельно выращивая ресурс.

Проведем численные эксперименты и анализ полученных результатов. Будут учитываться результаты только тех экспериментов, исчезновение одной из цивилизаций в которых наблюдалось не ранее 1000 периода. Делается это потому, что в большинстве случаев ранняя гибель одной из цивилизаций наступает в результате неудачного начального случайного расположения агентов того или иного типа на ареале. Такие случаи нам не интересны. В каждом прогоне расчет будет длиться в течение 15000 периодов модельного времени.

Как и ожидалось в данной модификации модели кочевникам выживать стало сложнее. При $radius = 3$ в экспериментах протяженностью 15000 периодов вымирание кочевников наступает в 100% случаев, в среднем полное исчезновение кочевников наступает за 4731 периодов. Более детально рассмотрим случай, когда агенты не могут уходить от места своего рождения дальше, чем на x полей ($radius = x$), где $x \geq 4$ (табл. 1).

Таблица 1. Ситуации, при которых к 15000 периоду выживают либо землепашцы, либо кочевники, либо выживают обе цивилизации для каждого значения $radius$

$radius$	Выживают					
	Землепашцы		Кочевники		Обе цивилизации	
	Количество	%	Количество	%	Количество	%
4	2	2,7	0	0	73	97,3
5	3	2	0	0	146	98
6	4	6,6	0	0	57	93,4
7	11	17,5	3	4,8	49	77,8
8	10	15,6	4	6,3	50	78,1
9	10	15,9	11	17,5	42	66,7
10	2	3,2	7	11,1	54	85,7
11	7	11,1	10	15,9	46	73
12	7	10,9	6	9,4	51	79,7
13	3	9,4	4	12,5	25	78,1
14	3	9,4	6	18,8	23	71,9
15	7	11,3	10	16,1	45	72,6
16	8	12,7	10	15,9	45	71,4
∞	6	9,7	11	17,7	45	72,6

Последняя строка в табл. 1 характеризует случай, когда у агентов нет ограничений на передвижение, т.е. случаи, которые рассматривались в предыдущих экспериментах. Видно, что действие эффекта ограничения на передвижения наблюдается примерно до значения параметра $radius$, равного 7 или 8, при больших значениях этого параметра система развивается примерно так же, как и при отсутствии такого ограничения. Из чего можно сделать вывод, в модели без ограничений на передвижения кочевники если и путешествуют дальше чем 7 или 8 клеток от места рождения, то делают это очень редко, и на общую картину это не влияет.

Отдельно проанализируем те случаи, в которых наблюдается вымирание одной из цивилизаций, без учета прогонов, в которых выживают обе цивилизации. Расчеты показывают, что действие эффекта наличия ограничений на передвижения наблюдается примерно до значения параметра $radius$, равного 7 или 8, при больших значениях этого параметра система развивается примерно так же, как и при отсутствии такого ограничения. Из этого можно сделать вывод, что в модели без ограничений на передвижения кочевники если и путешествуют дальше чем 7 или 8 клеток от места рождения, делают это очень редко, и на общую картину это не влияет.

Проанализируем случаи, в которых наблюдается вымирание одной из цивилизаций, без учета прогонов, в которых выживают обе цивилизации (табл. 2). Расчеты показывают, что при отсут-

ствии ограничений на передвижения ($radius = \infty$) система ведет себя примерно так же, как и в случаях $radius \geq 7$ или $radius \geq 8$. При меньших значениях влияние данного параметра очевидно.

Таблица 2. Количество и процентное соотношение прогонов, при которых к 15 000 периоду наблюдается исчезновение одной из цивилизаций

<i>radius</i>	Выживают					
	Землепашцы			Кочевники		
	Количество	%	Средний период вымирания кочевников	Количество	%	Средний период вымирания землепашцев
4	2	100	3662	0	0	—
5	3	100	5179	0	0	—
6	4	100	8081	0	0	—
7	11	78,6	8444	3	3,7	10106
8	10	71,4	7747	4	5,3	8256
9	10	47,6	8005	11	18,8	6525
10	2	22,2	8011	7	24	9049
11	7	41,2	8479	10	19,5	6876
12	7	53,8	5445	6	10	7799
13	3	42,9	10026	4	8,5	8508
14	3	33,3	9097	6	15,3	7084
15	7	41,2	8564	10	58,8	8850
16	8	44,4	6745	10	55,6	5368
∞	6	35,3	9350	11	23,8	9407

В работе (Белоусов, 2017) был проведен анализ плотности заселения агентов в исходной модели кочевников и землепашцев. Было получено, что доля землепашцев в среднем равна 0,78, плотность кочевников — 0,09, плотность землепашцев — 0,35, а плотность всех агентов на ареале — 0,44. Методами статистики было показано, что эти величины не меняются при изменении параметра *dim*, отвечающего за размерность.

Сравним эти показатели с теми, которые получаются в новой модификации при значении $radius = 4$. В среднем для этого случая при условии, что кочевники не вымерли, доля землепашцев равна 0,87, плотность кочевников — 0,073, плотность землепашцев — 0,52, плотность всех агентов — 0,59. Таким образом, видно, что доля землепашцев выросла на 11,5%, плотность кочевников на ареале упала на 19%, плотность землепашцев выросла на 49%, плотность всех агентов выросла на 18%.

Интересно проанализировать динамику исходной модели кочевников и землепашцев. Появившийся доступ к более производительным вычислительным мощностям позволил осуществить серию экспериментов, в каждом из которых длительность модельного времени составила 15 000 периодов, а не 4000, как в (Белоусов, 2017). Во всех прогонах модели, которые длились не более 4000 периодов модельного времени, вымирания ни одной из цивилизаций зафиксировано не было, т.е. к концу данного периода наблюдалось сосуществование обеих цивилизаций. Как видно из полученных здесь результатов, на более длинных интервалах времени наблюдается качественное изменение картины. А именно исчезают и кочевники, и землепашцы. Из последней строки табл. 2 видно, что землепашцы выживают в 9,7%, кочевники в 17,7%, а в 72,6% случаев к 15 000 периоду ни одна из цивилизаций не исчезает.

Приведенные прогоны модели для случая $radius = \infty$ были осуществлены отдельно и были просчитаны до 20 000 периода. В итоге получились немного скорректированные результаты. На более длинном интервале модельного времени землепашцы выживают в 14,5% (в 9 из 62 прогонов), кочевники — в 22,6% (в 14 из 62 прогонов), к 20 000 периоду ни одна из цивилизаций не умирает в 62,9% случаев (в 39 из 62 прогонов).

Похоже, что при увеличении модельного времени наблюдаемая тенденция приведет к тому, что существование обеих цивилизаций станет невозможным. Таким образом может быть выдвинута

гипотеза о том, что если рассматривать данную модель при базовых значениях параметров, то на достаточно длительном интервале времени в конце концов всегда будет оставаться лишь одна из цивилизаций. Другими словами, ситуация, когда обе цивилизации сосуществуют на одном ареале, в некотором смысле является неустойчивым состоянием, из которого система рано или поздно переходит в одно из устойчивых состояний, которое характеризуется гибелью одной из цивилизаций. То есть если данная гипотеза верна, то в рамках данной модели гибель одной из цивилизаций является лишь вопросом времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базыкин А.Д.** (1985). Математическая биофизика взаимодействующих популяций. М.: Наука.
- Белоусов Ф.А.** (2014). Анализ модели Хенинга. Ее модификации // *Аудит и финансовый анализ*. № 1. С. 319–323.
- Белоусов Ф.А.** (2017). Модель с двумя способами воспроизводства продукта (модель “кочевников” и “землепашцев”) // *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 3. С. 31–38.
- Белоусов Ф.А.** (2018). Вейвлет-анализ временных рядов в модели кочевников и землепашцев // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. Т. 80. № 1. С. 288–297.
- Бурбон Ф., Фабианис В.М. де** (ред.) (2008). Великолепие исчезнувших цивилизаций. М.: БММ АО.
- Гиббон А.** (2001). История упадка и крушения Римской империи. М.: ОЛМА-ПРЕСС.
- Грант М.** (1998). Крушение Римской империи. М.: Терра – Книжный клуб.
- Ко М.** (2007). Майя. Исчезнувшая цивилизация: легенды и факты. М.: Центрполиграф.
- 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.
- Bahn P.G., Flenley J.** (1992). Easter Island, Earth Island. New York: Thames and Hudson.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** (1987). Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise // *Physical Review Letters*. Vol. 59 (4). P. 381–384.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** (1988). Self-Organized Criticality // *Physical Review A*. Vol. 38 (1). P. 364–374.
- Blume L.E.** (2004). Evolutionary Equilibrium with Forward-Looking Players. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.santafe.edu/media/workingpages/05-04-015.pdf>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: ноябрь 2018 г.).
- Cline E.H.** (2014). 1177 B.C. The Year that Civilization Collapsed. Princeton: Princeton University Press.
- David M.** (1986). Raup Biological Extinction in Earth History // *Science*. Vol. 231. P. 1528–1533.
- Dickinson O.** (2007). The Aegean from Bronze Age to Iron Age: Continuity and Change Between the Twelfth and Eight Centuries. BCRoutledge.
- Epstein J., Axtell R.** (1996). Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up. Washington: Washington Brookings Institution Press.
- Gallenkamp C.** (1959). Maya: The Riddle and Rediscovery of a Lost Civilization. Philadelphia: D. McKay Company. P. 240.
- 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.).
- Henning P.A.** (2008). Computational Evolution // *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Ser.* P. 175–193.
- Hunt T.L.** (2007). Rethinking Easter Island’s Ecological Catastrophe // *Journal of Archeological Science*. No. 34. P. 485–502.
- Sole R.V., Manrubia S.C.** (1996). Extinction and Self-Organized Criticality in a Model of Large-Scale Evolution // *Physical Review E*. Vol. 54 (1). P. R42–R45.
- 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.

Younger S. (2005). Violence and Revenafe in Egalitarian Societies // *Journal Artificial Societies Social Simulations*. Vol. 8. No. 4. P. 11. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/11.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: ноябрь 2018 г.).

REFERENCES (with English translation or transliteration)

- Bahn P.G., Flenley J.** (1992). *Easter Island, Earth Island*. New York: Thames and Hudson.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** (1987). Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise. *Physical Review Letters*, 59 (4), 381–384.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.** (1988). Self-Organized Criticality. *Physical Review A*, 38 (1), 364–374.
- Bazykin A.D.** (1985). *Mathematical Biophysics of Interacting Populations*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Belousov F.A.** (2014). Analysis of the Henings Model. Its modifications. *Audit and Financial Analysis*, 1, 319–323 (in Russian).
- Belousov F.A.** (2017). Model of Civilization with Two Types of Reproduction Product (Model of Nomads and Plowmen). *Economics and Mathematical Methods*, 53, 3, 31–38 (in Russian).
- Belousov F.A.** (2018). Wavelet Analysis of Time Series in the Model of Nomads and Tillers. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologie*. Moscow: Voronezh State University of Engineering Technologies, 80, 1, 288–297 (in Russian).
- Blume L.E.** (2004). Evolutionary Equilibrium with Forward-Looking Players. Available at: <http://www.santafe.edu/media/workingpages/05-04-015.pdf> (accessed: November 2018).
- Bourbon F., Fabianis V.M. de** (eds) (2008). *The Magnificence of Lost Civilizations*. Moscow: BMM AO (in Russian).
- Cline E.H.** (2014). 1177 B.C. The Year that Civilization Collapsed. Princeton: Princeton University Press.
- David M.** (1986). Raup Biological Extinction in Earth History. *Science*, 231, 1528–1533.
- Dickinson O.** (2007). *The Aegean from Bronze Age to Iron Age: Continuity and Change Between the Twelfth and Eight Centuries*. BCRoutlafge.
- Epstein J., Axtell R.** (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom up*. Washington: Washington Brookings Institution Press.
- Gallenkamp C.** (1959). *Maya: The Riddle and Rediscovery of a Lost Civilization*. Philadelphia: D. McKay Company, 240.
- Gibbon A.** (2001). *The History of the Decline and Collapse of the Roman Empire*. Moscow: OLMA-PRESS (in Russian).
- Grant M.** (1998). *The collapse of the Roman Empire* Moscow: Terra – Knizhnyi klub (in Russian).
- 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: November 2018).
- Henning P.A.** (2008). Computational Evolution. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Ser.*, 175–193.
- Hunt T.L.** (2007). Rethinking Easter Island’s Ecological Catastrophe. *Journal of Archeological Science*, 34, 485–502.
- Ko M.** (2007). *Maya. Disappeared Civilization: Legends and Facts*. Moscow: Tsentrpoligraf (in Russian).
- 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).
- Sole R.V., Manrubia S.C.** (1996). Extinction and Self-Organized Criticality in a Model of Large-Scale Evolution. *Physical Review E*, 54 (1), R42–R45.
- Toynbee A.J.** (1934–1961). *A Study of History*. Moscow: Progress (in Russian).
- Wittek P., Rubio-Campillo X.** (2012). Scalable Agent-Based Modeling with Cloud HPC Resources for Social Simulations. In: “*IEEE4th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*”. December 3–6. Taipei, Taiwan, 355–362.
- Younger S.** (2005). Violence and Revenafe in Egalitarian Societies. *Journal Artificial Societies Social Simulations*, 8, 4, 11. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/11.html> (accessed: November 2018).

Model of Nomads and Plowmen with a Limited Resource of Spatial Movement

F.A. Belousov

Central Economic and Mathematic Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: sky_tt@list.ru

Received 1.12.2018

In the article (Belousov, 2017), the model with the simplest social structure was built and studied. In the model agents are divided into two types – nomads and plowmen, each of which is distinguished by its attitude to the method of production of the product. If plowmen can independently reproduce product, then nomads are not endowed with such skills, instead they have the ability to find such a product in the area, including taking it away from plowmen. In mentioned article, the question of extinction of one of the civilizations was studied, and the question of the coexistence of these civilizations in a single space during the observed period also was studied. The scientific novelty of this work lies in the development of the original model of nomads and plowmen and addition of new conditions associated with restrictions on movement of agents. In the new modification, agents are forbidden to move away from their place of birth beyond a certain exogenously specified distance during their lifetime. Due to the fact that the original model is rather the model of ancient society, its modification better reflects the socio-demographic processes that took place in ancient times. The ancient people, perhaps with rare exceptions, did not have the opportunity to travel long distances and they were somehow tied to their place of birth and permanent habitat. A series of experiments was carried out, the ranges of values of the parameter introduced into the model, under which different qualitative dynamics of the entire system is observed, were determined. The value of this work is added by the fact that the access to more productive computing power has allowed to carry out better calculations. Thus, in the initial model, calculations were carried out for a length of 4000 periods of model time; in the new model, this characteristic grew to 15,000 and 20,000 periods. Such growth of this indicator allows to reveal new qualitative dynamics not only in the new presented modification, but also in the original model of nomads and plowmen.

Keywords: artificial society, simulation modeling, agent-based modeling, extinction of civilizations, nomads, plowmen.

JEL Classification: C63.

DOI: 10.31857/S042473880003336-8