

Установившиеся режимы в модели Хёнинга и ее модификациях*

В. Л. Макаров¹, Л. А. Бекларян¹, Ф. А. Белоусов^{1,2}
beklar@cemi.rssi.ru

¹ЦЭМИ РАН, Москва, Нахимовский пр., 47; ²НИУ ВШЭ, Москва, ул. Мясницкая, 20

Рассматривается модель Хеннинга поведения популяции и ее модификации. Приводятся модификации, в которых преодолеваются некоторые недостатки модели Хеннинга, связанные с эффектом гибели популяции в результате внутривидовых противоречий. Эта тема является важной для изучения, так как подобные явления наблюдаются как в дикой природе, так и в истории человеческой цивилизации. Определяется также модель, в которой, в отличие от модели Хеннинга и его модификаций, взаимодействие между агентами определяется эндогенно, т. е. взаимодействие, основанное на реакции типа «инстинкт», заменяется на взаимодействие с использованием элементов «этики».

Ключевые слова: *агенто-ориентированное моделирование; модель Хеннинга; вымирание популяции; фактор мести; асимметрия во взаимоотношениях*

Steady regimens in Henning model and its modifications*

V. L. Makarov¹, L. A. Beklaryan¹, and F. A. Belousov^{1 2}

¹CEMI RAS, Moscow, Nachimovsky prospect 47; ²NRU HSE, Moscow, Myasnutskaya str., 20

Background: This paper is based on work of Peter A. Henning published in Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems in 2008. In his model, Henning explores an effect of death of populations owing to intrinsic causes. This subject is interesting to study, since such phenomena may be observed both in unexplored wilderness and in human civilization. Degree of survival of population depends mainly on level of aggression between agents in this population. There are many papers on interspecific aggression. In particular, it was considered in one of the modifications of well-known Sugar model. One can highlight another paper of S. Younger published in Journal of Artificial Societies and Social Simulation in 2005, in which interspecific aggression and, in particular, revenge are also considered. Other works studying positive interspecific influence may also be mentioned. For example, there are papers where populations with altruistic agents are considered. These questions are studied by S. Bowles and E. Blume.

Methods: This paper consists of two parts. The first one is dedicated to consideration of Henning model and its modifications. In modifications of the model, the authors try to overcome some disadvantages which initial Henning model has. In particular, such factors as revenge and asymmetry are considered. In the second part, the same questions are considered by using another model, construction of which differs significantly from Henning model and to a greater extent, it is similar to already mentioned Sugar model.

Results: The main distinction of the second model from the first one is endogeneity of behavior rules between agents. In other words, if in Henning model and its modifications the rules of interaction between agents are determined randomly, in the second model these interaction rules are determined based on conditions of agents and conditions of environment.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-01-00768.

Concluding Remarks: In modifications of Henning model, the factors of revenge and asymmetry are studied. It was shown that if these factors are not included in the model, then death of population is not observed. In the second part, where behavior between agents is determined endogeneously, many other interesting regularities are found.

Keywords: *agent-based modeling; Henning model; population death; revenge factor; asymmetry in relationship*

Введение

Работа посвящена изучению динамики развития популяций в зависимости от разных типов взаимодействий между особями внутри популяций, а также отдельно изучаются условия, при которых наблюдается эффект вымирания таких популяций. В первой части статьи такое исследование делается на основе модели Хеннинга [1], а также ее модификаций, для которых будут характерны различные правила поведения между особями, а именно: будут изучаться влияния таких факторов, как внутрипопуляционная агрессия и, в частности, месть. Во второй части эти же вопросы будут изучаться на основе другой модели, которая по своей конструкции сильно отличается от модели Хеннинга и в большей степени перекликается с хорошо известной «Сахарной моделью» [2]. Тем не менее в «Сахарной модели» тема вымирания популяций не поднимается. По своей структуре эти модели имеют много общего, однако они заметно отличаются. Отличием является то, что рассмотренная здесь модель является более простой по сравнению с «Сахарной моделью», что позволяет в явном виде описать механизм, благодаря которому происходит вымирание популяции.

Рассматриваемая в статье вторая модель отличается от первой эндогенностью правил взаимодействия между особями в популяции, т. е. если в модели Хеннинга и ее модификациях взаимодействия между агентами определяется случайным образом, то во второй модели эти правила определяются на основе состояния агентов и состояния внешней среды.

Основной целью работы является исследование условий, при которых наблюдается вымирание популяции вследствие внутрипопуляционных противоречий между особями. Интуитивно понятно, что в ситуации, когда особи в большей степени негативно влияют друг на друга вероятность вымирания популяции увеличивается. Интересно построить такую модель, в которой внутри популяции положительное и негативное влияние особей друг на друга сбалансированы, но при этом эффект вымирания популяции сохраняется. В статье авторы попытались построить такую модель.

Вопрос внутривидовой агрессии представляет немалый научный интерес. Этой теме посвящен целый ряд научных работ. В частности внутривидовая агрессия была затронута в одной из модификаций упомянутой выше «Сахарной модели» [2]. Кроме этого можно выделить статью S. Younger [3], в которой также изучаются вопросы насилия и отдельно исследуется фактор мести. Однако вопрос вымирания целых популяций в подобных работах либо вообще не затронут, либо ему не уделяется какого либо значимого внимания.

Изучение вопроса вымирания популяций можно также найти в так называемых эпидемиологических моделях, в которых рассматривается распространение эпидемии по некоторой территории, населенной агентами. Однако эпидемию в такой ситуации можно расценивать как некоторый внешний негативный фактор. Здесь же важно смоделировать эффект вымирания популяции за счет исключительно внутренних причин.

Другой важной особенностью модели, которая представлена во второй части работы, является то, как агент определяет свое отношение к находящемуся рядом агенту. В рас-

сма­три­вае­мом слу­чае оно опре­де­ля­ет­ся бла­го­да­ря то­му, ка­кой ин­стинкт до­ми­ни­ру­ет в соз­на­нии агента. В пред­ло­жен­ной здесь мо­де­ли бу­дут два ин­стинкта — это ин­стинкт по­треб­ле­ния (что­бы не умереть с голо­ду) и ин­стинкт раз­мно­же­ния. Если в осо­би до­ми­ни­ру­ет ин­стинкт по­треб­ле­ния (т. е. осо­ба голод­на), то она рас­сма­три­ва­ет дру­гие осо­би в ка­че­стве кон­ку­рен­тов и по воз­мож­но­сти атак­у­ет их. С дру­гой сто­ро­ны, если осо­ба не голод­на, то на­чи­на­ет до­ми­ни­ро­вать ин­стинкт к раз­мно­же­нию, в ре­зуль­та­те че­го дру­гие осо­би рас­сма­три­ва­ют­ся как парт­не­ры для ро­ж­де­ния но­вой осо­би. В уже ука­зан­ных ра­бо­тах «Са­хар­ной мо­де­ли» и ра­бо­тах S. Younger так­же рас­сма­три­ва­ет­ся вра­жда ме­жду осо­ба­ми, но воз­ни­ка­ю­щая по со­ци­аль­ным при­чи­нам, т. е. из-за то­го, что они при­на­дле­жат ли­бо к раз­ным со­ци­аль­ным груп­пам, ли­бо к раз­ным пле­менам. Дру­гими сло­ва­ми, прин­ци­пи­аль­ным раз­ли­чи­ем яв­ля­ет­ся то, что от­но­ше­ние агентов друг к дру­гу в пред­став­лен­ной здесь мо­де­ли может ме­нять­ся не­сколь­ко раз в те­че­ние их жи­зни, то­гда как в дру­гих мо­де­лях оно не ме­ня­ет­ся ли­бо может ме­нять­ся, ска­жем, один раз за жи­знь агента.

Можно так­же от­ме­тить ра­бо­ты, ко­то­рые изу­ча­ют на­ли­чие по­ло­жи­тель­ных внут­ри­по­пу­ля­ци­он­ных вза­им­о­дей­ствий ме­жду осо­ба­ми. На­при­мер, изу­ча­ют­ся по­пу­ля­ции, в ко­то­рых есть агенты, спо­соб­ные на альт­ру­ис­ти­че­ские по­ступ­ки. Среди ра­бот, в ко­то­рых рас­сма­три­ва­ют­ся ука­зан­ные во­про­сы, можно вы­де­лить ста­тьи С. Боулза [4, 5], а так­же ра­бо­ту E. Blume [6]. При этом сто­ит от­ме­тить, что ос­нов­ным ме­то­дом ис­сле­до­ва­ния в ра­бо­те E. Blume [6] яв­ля­ет­ся ши­ро­ко рас­про­странен­ный те­о­ре­ти­ко-иг­ро­вой под­ход. В та­ких мо­де­лях по­ве­де­ние агентов опре­де­ля­ет­ся ис­хо­дя из ус­ло­вий рав­но­ве­сия (в ча­ст­но­сти, рав­но­ве­сия по Нэшу). Од­на­ко среди су­щес­твен­ных не­до­стат­ков ис­поль­зо­ва­ния та­ко­го ме­то­да можно от­ме­тить так на­зы­вае­мое ус­ред­не­ние, ко­то­рое пред­по­ла­га­ет иден­тич­ность всех агентов по всем па­ра­мет­рам, что, оче­вид­но, да­леко от ре­аль­но­сти. Дан­но­го не­до­стат­ка ли­шен аг­ен­то-ори­ен­ти­ро­ван­ный под­ход, ко­то­рый ис­поль­зу­ет­ся ав­то­ра­ми пред­став­лен­ной ра­бо­ты.

Об­щий вы­вод из бо­ль­шин­ства ра­бот до­статоч­но ин­ту­итивен — чем бо­ль­ше не­га­тив­но­го во вза­им­о­от­но­ше­ниях ме­жду осо­ба­ми, тем ме­нее жи­з­не­спо­соб­на по­пу­ля­ция в це­лом. И на­об­о­рот — чем бо­ль­ше бла­го­твор­но­го вли­я­ния осо­би ока­зы­ва­ют друг на дру­га, тем бо­лее жи­вучей ока­зы­ва­ет­ся по­пу­ля­ция. В этой ста­тье ак­цент бу­дет сде­лан не толь­ко на вли­я­ние по­ло­жи­тель­ных и не­га­тив­ных фак­то­ров на жи­вучесть по­пу­ля­ции, но и вли­я­ние ос­таль­ных фак­то­ров, от­но­ся­щих­ся как к ха­рак­те­ри­сти­кам са­мой по­пу­ля­ции, так и ха­рак­те­ри­сти­кам ок­ру­жа­ю­щей сре­ды.

Мо­де­ль Хе­нин­га

Опи­са­ние Мо­де­ли Хе­нин­га. Мо­де­ль Хе­нин­га ха­рак­те­ри­зу­ет­ся век­то­ром со­сто­я­ний Ω , ко­то­рый пред­став­ля­ет из се­бя n -мер­ный век­тор, эле­мен­ты ко­то­ро­го могут при­ни­мать зна­че­ния ли­бо 0, ли­бо 1:

$$\Omega = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

где $x_i \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, n}$.

Если $x_i = 0$, то i -й аг­ен­т мертв, если $x_i = 1$, то аг­ен­т счита­ет­ся жи­вым. Из пе­ри­о­да в пе­ри­од со­сто­я­ние си­сте­мы ме­ня­ет­ся — ка­кие-то аг­ен­ты уми­ра­ют, ка­кие-то ро­ж­да­ют­ся. Со­сто­я­ние си­сте­мы в мо­мент вре­ме­ни k об­означим че­рез Ω^k .

Опишем алгоритм перехода из состояния Ω^{k-1} в состояние Ω^k . В нулевой период предполагается, что все агенты живы, т. е. Ω^0 есть n -мерный вектор, все элементы которого равны 1. Вводится в рассмотрение $(n \times n)$ -матрица перехода M^k , которая в нулевой период совпадает с единичной матрицей.

Опишем процедуру, по которой осуществляется переход от матрицы M^{k-1} к M^k . В каждой строке матрицы M^{k-1} выбирается один элемент и заменяется на некоторую случайную величину, распределенную равномерно на интервале от -1 до 1 . Так, матрица M^1 примет вид:

$$M^1 = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \alpha_{1,j_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & 1 & \cdots & \alpha_{2,j_2} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \alpha_{n,j_n} & \cdots & 1 \end{pmatrix},$$

где для всех $i \in \{1, \dots, n\}$ случайно выбирается целое значение $j_i \sim \overline{U}[1, n]$, а также некоторое значение $\alpha_{i,j_i} \sim U[-1, 1]$, $i = \overline{1, n}$. Здесь $U[-1, 1]$ — равномерное распределение в диапазоне $[-1, 1]$, а $\overline{U}[1, n]$ — целочисленное равномерное распределение, в соответствии с которым случайным и равновероятным образом выбирается целое число из диапазона от 1 до n . Описанную процедуру обозначим через F , т. е. для любого $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$ будет справедливо $F(M^{k-1}) = M^k$.

Далее вычисляется промежуточный параметр $\omega^k = M^k \Omega^k$. Тогда вектор состояний Ω^{k+1} будет определяться по правилу

$$\Omega_j^{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{если } \omega_j^k > 0; \\ 0 & \text{если } \omega_j^k \leq 0. \end{cases}$$

Таким образом элемент M_{ij}^k матрицы M^k , $k = 1, 2, \dots$ характеризует воздействие j -го агента на агента i в период k . Если $M_{ij}^k > 0$, то воздействие на агента i положительно, если $M_{ij}^k < 0$, то воздействие отрицательно. Итоговое воздействие на агента i в k -й период определяется по формуле $\sum_{j=1}^n M_{ij}^k \Omega_j^k$. Формально итоговое воздействие на агента i это произведение i -й строки матрицы M^k на вектор состояний Ω^k . Если это произведение больше 0 , то особь либо выживает, либо рождается. В противном случае особь считается мертвой.

Описанный выше алгоритм преобразования матрицы M^{k-1} в матрицу M^k означает, что в каждый период времени изменение воздействия на любого агента $i = \overline{1, n}$ происходит со стороны другого, случайно выбранного агента j_i , на случайную величину α_{i,j_i} .

Определим также такие понятия, как установившийся режим и равновесная численность популяции.

Установившимся режимом или, что то же самое, равновесным состоянием развития популяции будем называть такую динамику изменения количества особей в популяции, при которой это количество варьируется вокруг некоторого постоянного значения. Равновесной численностью популяции, соответственно, будет обозначаться такое постоянное значение, вокруг которого изменяется численность популяции.

Результаты работы модели Хёнинга. Был проведен ряд численных реализаций по модели Хёнинга. Главный результат этих реализаций состоит в том, что, вопреки утверждениям из [1], в рамках этой модели, при достаточно большом значении максимального количества особей популяции (т. е. при достаточно большом значении параметра n), полного вымирания популяции не наблюдается. На рис. 1 и 2 приведена одна из реализаций модели Хёнинга в случае, когда $n = 100$, $T = 5000$.

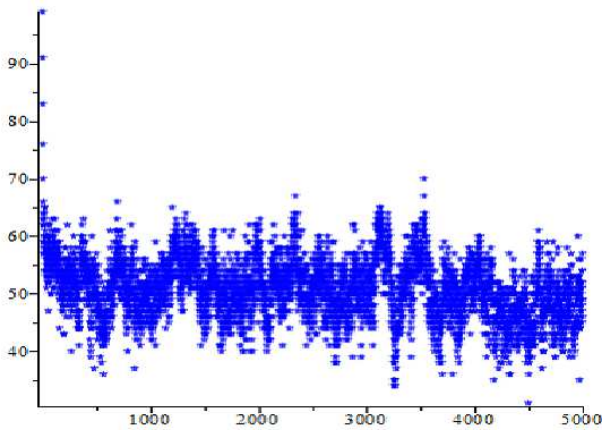
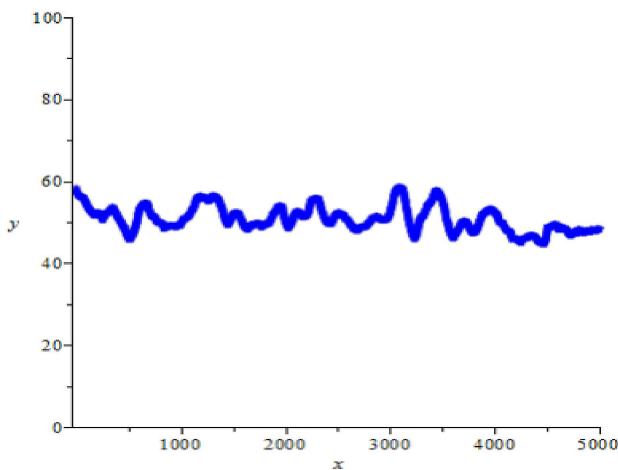
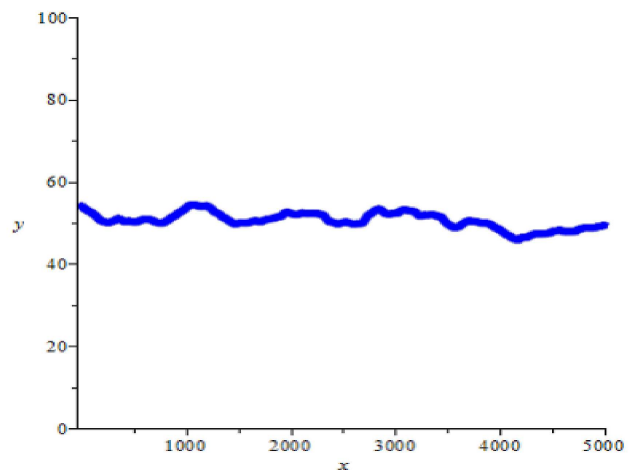


Рис. 1. Результат работы модели Хенинга в случае $n = 100$, $T = 5000$



(а) Усреднение за 100 периодов



(б) Усреднение за 400 периодов

Рис. 2. Результат работы модели Хенинга в случае $n = 100$, $T = 5000$

Модификация модели Хенинга. Введение антисимметрии. Для получения эффекта вымирания всей популяции введем в модель Хенинга некоторые изменения, а именно: в процедуре F , которая была определена при описании исходной модели Хенинга, случайные величины α_{i,j_i} имеют распределение $U[-1, 1]$. Заменим это распределение на другое $U[-1, a]$, где $a \leq 1$. Оказалось, что величина параметра a является решающим для динамики популяции. Можно экспериментально определить максимальное значение a , при котором наблюдается эффект вымирания популяции. Численные эксперименты показали, что такое значение равно $a = 0,74$. На рис. 3 и 4 приведена одна из реализаций этой модели в случае $n = 100$, $T = 5000$.

Таким образом, видно, что одним из способов реализации эффекта вымирания популяции является введение антисимметрии во взаимоотношения между особями путем увеличения количества негативных воздействий по сравнению с количеством положительных воздействий.

Модификация модели Хенинга. Введение фактора местности. В этом разделе рассмотрим другую модификацию модели Хенинга. Дадим агентам возможность реаги-

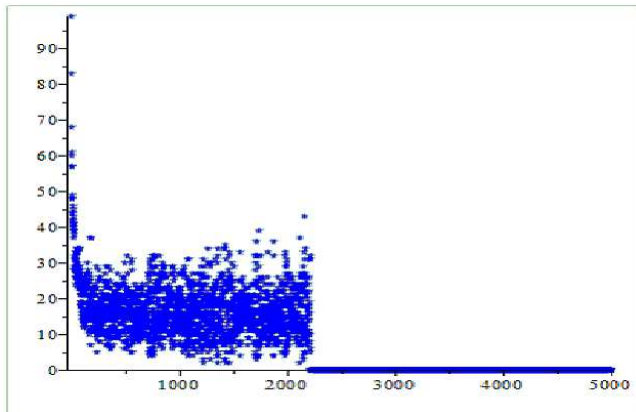
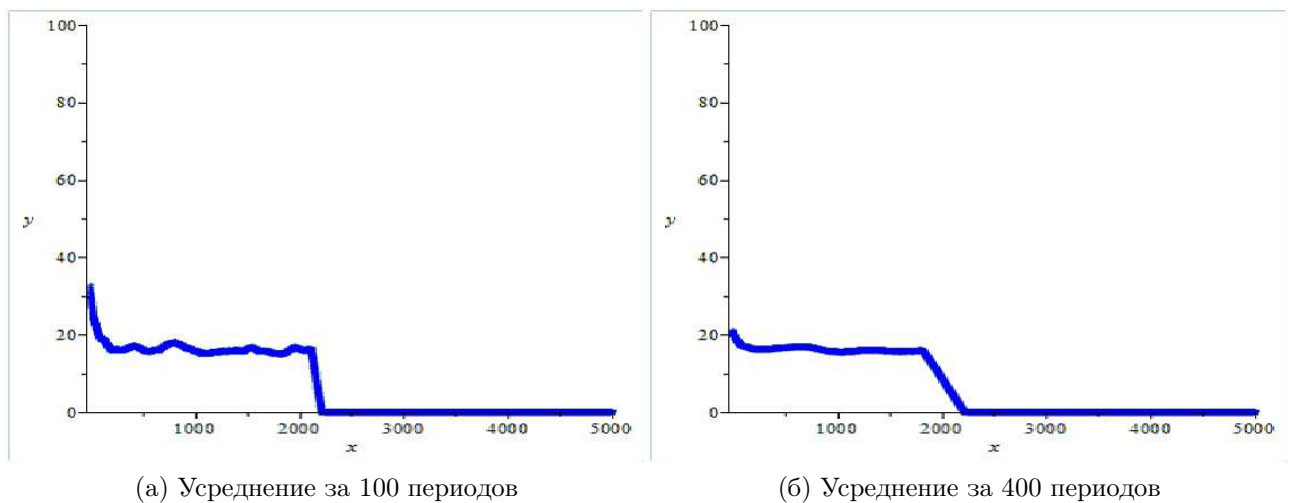


Рис. 3. Результат работы модели Хёнинга с антисимметрией в случае $n = 100$, $T = 5000$



(а) Усреднение за 100 периодов

(б) Усреднение за 400 периодов

Рис. 4. Результат работы модели Хёнинга с антисимметрией в случае $n = 100$, $T = 5000$

ровать на оказываемое на них воздействие. Процедура F , описанная выше, останется без изменений, а именно: в каждый момент времени k в каждом столбце i матрицы M^{k-1} произвольно выбранный элемент M_{i,j_i}^{k-1} заменяется на случайную величину $\alpha_{i,j_i} \sim U[-1, 1]$. Далее, введем дополнение в эту процедуру. А именно: после ее выполнения выбираются только отрицательные значения α_{i,j_i} , $i = \overline{1, n}$. Если $\alpha_{i,j_i} < 0$, то на место симметричного элемента $M_{j_i,i}$ будет ставиться случайно реализованная величина, распределенная по закону $U[-1, 0]$. Таким образом, если некоторый агент оказывает негативное воздействие на другого агента, то этот агент также окажет негативное воздействие на первого агента. То есть образуется популяция из мстительных агентов. На рис. 5 и 6 представлены результаты одной из реализаций такой модели.

Эксперименты показывают, что в среднем популяция с мстительными агентами живет меньше периодов по сравнению с популяцией с антисимметрией во взаимоотношениях. Помимо этого можно отметить, что в случае наличия фактора мести, по сравнению со случаем наличия антисимметрии, динамика развития популяции быстро выходит на установившийся режим.

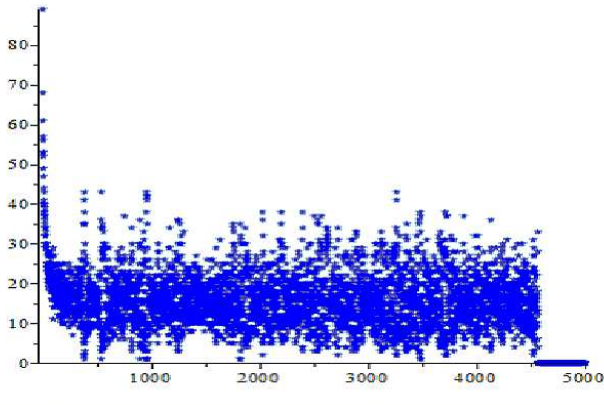
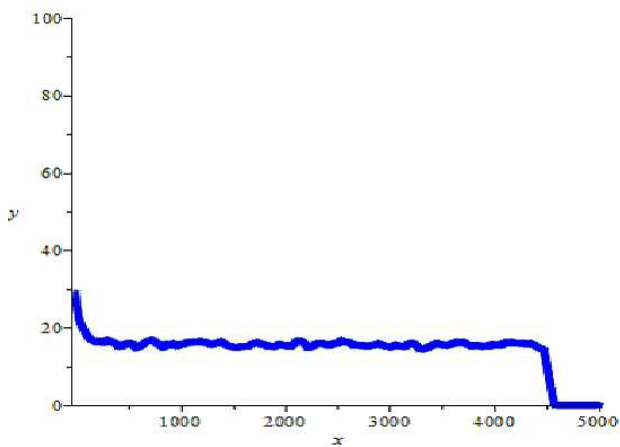
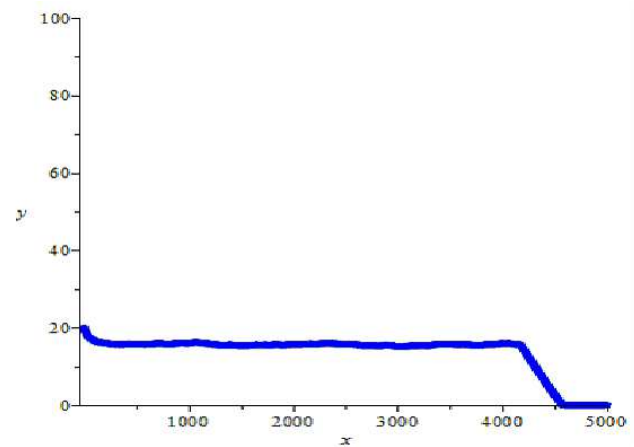


Рис. 5. Результат работы модели Хенинга с мстительными агентами в случае $n = 100$, $T = 5000$



(а) Усреднение за 100 периодов



(б) Усреднение за 400 периодов

Рис. 6. Результат работы модели Хенинга с мстительными агентами в случае $n = 100$, $T = 5000$

Помимо этого можно отметить, что в случае наличия фактора мести популяция быстрее выходит на установившийся режим развития по сравнению со случаем наличия антисимметрии.

Выводы, связанные с модификациями модели Хенинга. Численные эксперименты показали, что в исходной модели Хенинга популяция достаточно быстро начинает развиваться вокруг некоторого установившегося режима и отсутствует эффект полного вымирания. Для получения эффекта полного вымирания популяции приходится вводить некоторую антисимметрию во взаимоотношениях так, чтобы негативного внутрипопуляционного взаимодействия было больше, чем положительного.

Важной особенностью данных моделей является тот факт, что взаимодействие агентов формируется экзогенно с помощью реакции типа «инстинкт». В модели, которая представлена ниже, эта особенность будет изменена, т. е. взаимодействие агентов будет формироваться эндогенно с помощью реакции с элементами «этики».

Модель с эндогенно заданными внутрипопуляционными взаимодействиями

Описание модели. В модели Хенинга и рассмотренных модификациях взаимодействия между особями формируются экзогенно. Другими словами, в модели не определено почему агенты начинают либо хорошо относиться к другим особям, либо враждебно. Это определяется случайным образом. Для преодоления этого недостатка рассмотрим модель, в которой эндогенно задается внутрипопуляционное взаимодействие между особями. Для этого вводится некоторый ограниченный ресурс, за который впоследствии может быть развернута конкурентная внутрипопуляционная борьба. В частности, правила, по которым особи могут вести себя агрессивно по отношению к своим сородичам, определяются эндогенно.

Разобьем описание модели на несколько этапов.

Основные элементы и характеристики модели. Модель описывается $(\text{dim} \times \text{dim})$ -матрицей, каждый элемент которой может принимать значения трех типов — больше нуля, равное нулю и отрицательное значение, равное -2. Опишем каждый тип в отдельности:

- если элемент равен 0, то поле считается пустым;
- если элемент — положительное число, то в данный период поле занято агентом, число характеризует уровень его здоровья;
- если значение поля равно -2, то это значит, что на нем появился (вырос) ресурс, потребляя который, агент увеличивает уровень здоровья на 2. Если же агент в какой-то период не потребляет этот ресурс, то уровень его здоровья уменьшается на 1.

Состояния агентов. В каждый период агенты ходят поочередно. Чем раньше особь родилась, тем раньше ей достанется право хода. Перемещаться агенты могут на одну клетку в любом направлении в пределах матрицы. У агентов есть два основных инстинкта, инстинкт потребления и инстинкт размножения. Какой инстинкт в данный момент преобладает, определяется состоянием, в котором находится тот или иной агент. Так, если агент не потреблял ресурс 5 или более периодов, то он считается голодным и инстинкт потребления для него является доминирующим, тогда как инстинкт к размножению отключается. В противном случае, если особь потребляла ресурс менее чем 5 периодов тому назад, инстинкт к размножению у нее доминирует над инстинктом к потреблению.

Взаимодействие между агентами. В рамках этой модели протестированы два типа взаимодействия между агентами. Условно их можно разделить на агрессивное поведение и неагрессивное поведение. На рис. 7 и 8 приведены блок-схемы алгоритмов, которым следуют неагрессивные и агрессивные особи соответственно. В случае модели с агрессивным поведением агентов внутрипопуляционное взаимодействие можно определить как симметричное, так как в зависимости от состояния агенты либо рожают новую особь, либо голодный агент атакует своего соседа (см. рис. 8), расценивая его как конкурента на ограниченный ресурс. При этом, атакуя, агент убивает свою жертву. Устанавливается также дополнительное ограничение — у двух агентов может родиться новая особь, только если в предыдущие 5 периодов обе особи не рожали других особей. Более того, в период репродукции уровень здоровья агентов уменьшается на 1,5 (а не на 1, как в обычном состоянии, если этот агент не принимал пищи). Новорожденная особь в период своего рождения не имеет права на ход.

Правило появления нового ресурса. В модели ресурс появляется с заданным темпом роста, т.е. каждый период на поле вырастает некоторое количество новых ресурсов, местопо-

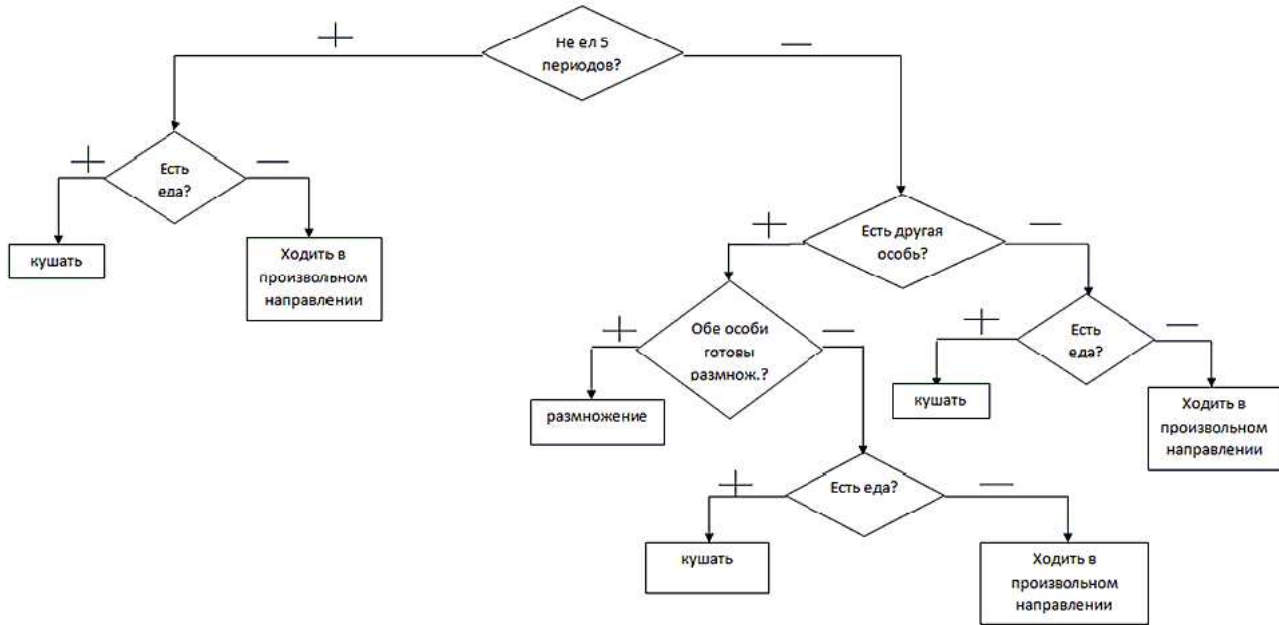


Рис. 7. Блок-схема алгоритма поведения агентов при отсутствии агрессивной составляющей

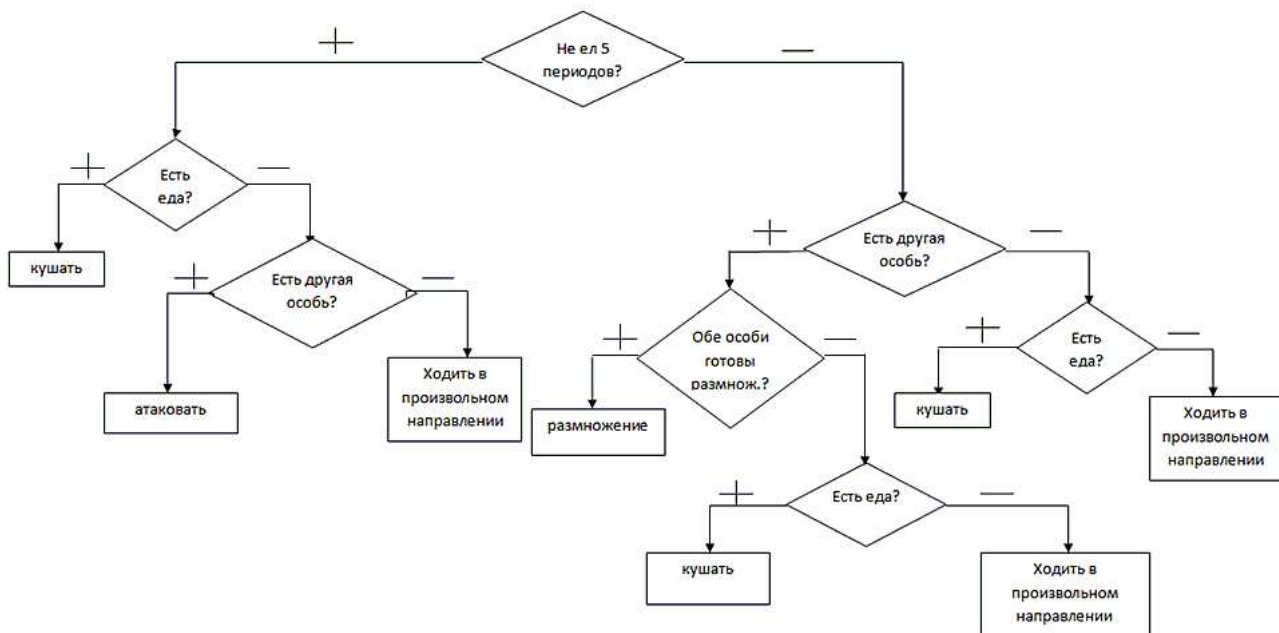


Рис. 8. Блок-схема алгоритма поведения агентов с агрессивной составляющей

ложение которых определяется случайно. В дальнейшем, этот параметр вне зависимости от размерности поля будет соответствовать появлению ресурса в 4 клетках матрицы на каждые 100 клеток (т. е. если матрица 20×20 , то в этом случае ресурс появится в 16 клетках из 400).

Приведем таблицу основных характеристик модели:

1. Размерность поля (dim).
2. Начальный уровень здоровья.
3. Тип поведения агентов (агрессивный/неагрессивный).

4. Темп роста ресурса (каждый период на 100 клеток будет вырастать 4 единицы ресурса).
5. Пороговое значение голоден/сыт (5 или более периодов без ресурса = голоден).
6. Предельно возможный возраст агента (40 периодов).
7. Условия, при которых агенты могут размножаться.
8. Начальное количество агентов.

В данной работе акцент будет сделан на изучении влияния первых трех характеристик. Отметим также, что значения последней характеристики условно можно разделить на два класса. Начальное количество агентов слишком мало и популяция вымирает не успев достичь своего равновесного уровня развития и начальное количество агентов достаточно велико и популяция достигает своего установившегося режима развития.

Сравнение по типам взаимодействия агентов. Проведем сравнение динамики развития популяции для двух случаев взаимодействия агентов: агрессивное поведение агентов и неагрессивное поведение агентов. Остальные значимые параметры оставим фиксированными. А именно, размерность поля $dim=10$, начальный уровень здоровья положим равным 20. Результаты отражены на рис. 9.

Видно, что в первом случае популяция достаточно быстро выходит на некоторый установившийся режим развития и ее численность в среднем колеблется между 30 и 40. В случае же с агрессивным поведением агентов, видно, что численность популяции в среднем плавно снижается и в конце концов падает до нуля. Другие эксперименты также показали, что популяция с неагрессивным поведением агентов, при достаточном начальном количестве особей, не вымирает. В дальнейшем рассматриваются модели только с агрессивным поведением агентов и определяются пороговые значения параметров, при которых популяция начинает вымирать через какое-то количество периодов.

Влияние размерности поля. В этом разделе изучено влияние изменения размерности поля на живучесть популяции с агрессивным поведением агентов. На рис. 10 показан график динамики развития популяций, которые живут в поле размерности $dim = 10, 14, 15, 16$ и 20 . При этом начальный уровень здоровья при рождении у особей везде равен 20.

Получаются достаточно интересные результаты. Так, видно, что популяция начинает выживать при размерности больше 15 ($dim > 15$). Чем выше размерность, тем больше продолжительность жизни популяции. Однако в данной реализации можно наблюдать, что при $dim = 14$ популяция получилась более живучей, чем при $dim = 15$. Более того, этот результат достаточно устойчив. То есть данная модель демонстрирует немонотонную зависимость живучести популяции (продолжительности жизни) от размерности. Далее, на рис. 11 приведем тот же график, однако теперь ось Y будет характеризовать плотность агентов, т. е. это величина равная количеству особей, деленное на количество всех полей в матрице (dim^2).

Здесь следует обратить внимание на динамику популяций при $dim = 16$ и 20 . Видно, что плотность расселения особей в этих случаях колеблется вокруг уровня 10%. Не исключено, что при прочих равных параметрах значение плотности расселения агентов является некоторым инвариантом относительно изменения размерности. Интересно также отметить, что популяции, которые вымирают, отклоняются от этой величины. В случае $dim = 10$ и 15 — это отклонение вниз, а в случае $dim = 14$ — это отклонение вверх.

Влияние начального уровня здоровья. Здесь проведено сравнение живучести популяции в зависимости от начального уровня здоровья при агрессивном поведении агентов. Сравнение сделано в случае, когда $dim = 10$, и в случае, когда $dim = 20$. В обоих

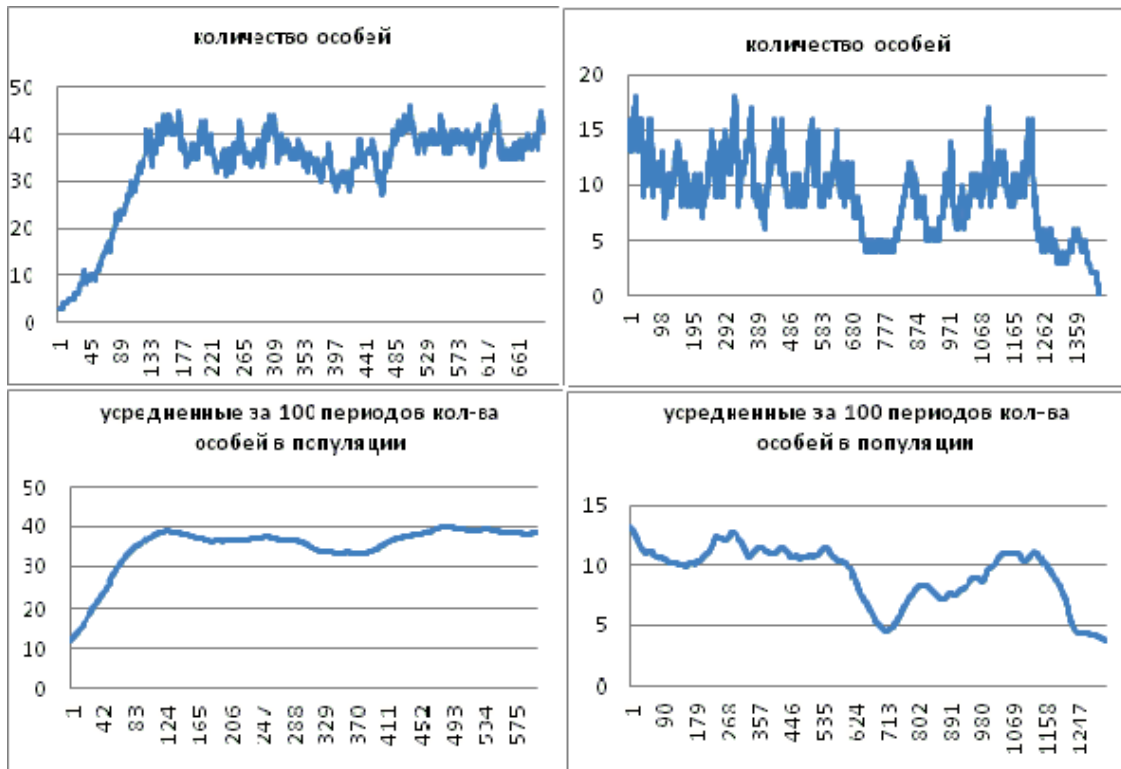


Рис. 9. Результат работы модели в случае неагрессивного поведения (левые графики) и агрессивного поведения агентов (правые графики)

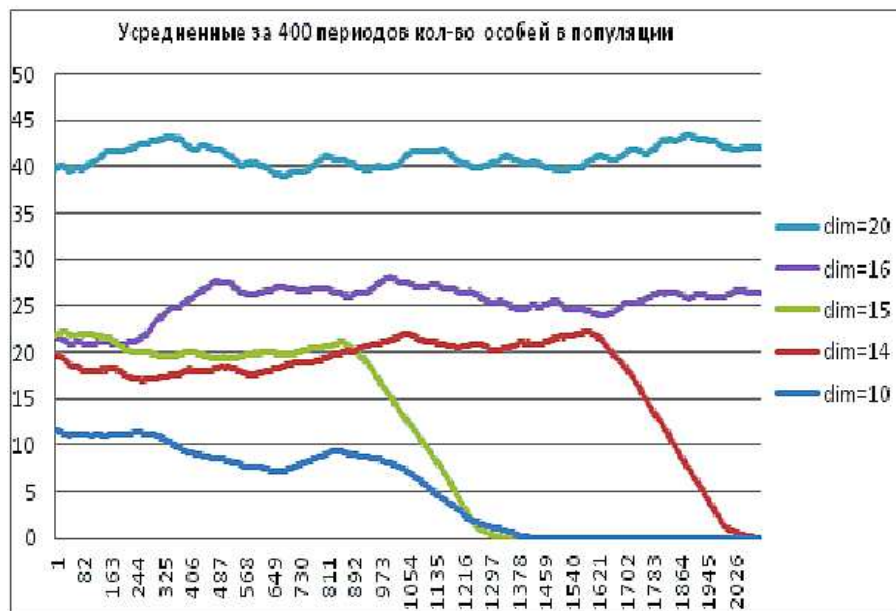


Рис. 10. Результат работы модели, динамика количества особей в популяции в зависимости от размерности поля dim

вариантах видны качественно разные зависимости динамики развития популяции от начального уровня здоровья агентов. Результаты отражены на рис. 12 и 13.

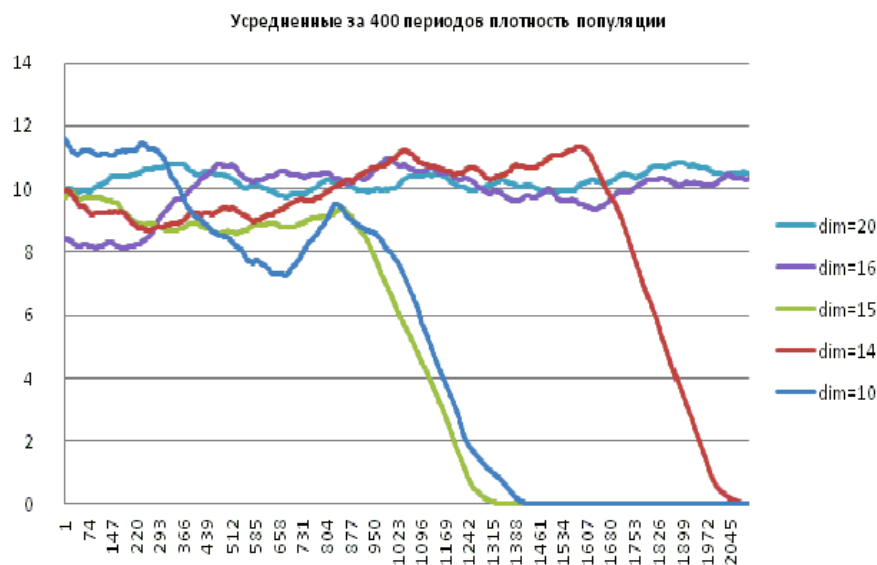


Рис. 11. Результат работы модели, динамика плотность популяции в зависимости от размерности поля dim

В случае $\text{dim} = 10$ видно, что все популяции рано или поздно вымирают, однако можно отметить, что зависимость продолжительности жизни популяции не монотонно зависит от начального уровня здоровья. А именно: выявляется некоторое оптимальное значение этого показателя, при котором продолжительность жизни популяции больше, чем при других значениях начального уровня здоровья. На графике видно, что из приведенных значений наибольшая продолжительность жизни популяции достигается при начальном уровне здоровья равном 20. При больших или меньших значениях этого параметра продолжительность жизни популяции меньше. Теперь можно проанализировать влияние тех же уровней начального здоровья в случае $\text{dim} = 20$.

В случае $\text{dim} = 20$ наблюдается другая динамика. Продолжительность жизни популяции монотонно зависит от начального уровня здоровья, т.е. чем выше этот показатель, тем либо выше период жизни популяции, либо выше среднее количество особей в установившемся режиме развития популяции. Пограничными значениями начального уровня здоровья являются 6 и 7. Интересно также отметить, что если при малых значениях этого показателя его изменения заметно влияют на динамику популяции (видно на примере сравнения начальном уровне здоровья равном 5 и 6), то при больших значениях эти изменения уже гораздо менее заметны. Так, при начальном уровне здоровья = 14 популяция в среднем развивается так же, как и при начальном уровне здоровья = 20.

Выводы. В модели с агрессивным поведением агентов присутствует как положительное влияние агентов друг на друга, так и отрицательное. Причем положительные и отрицательные влияния сбалансированы. Благодаря варьированию различных показателей выявлены граничные значения этих показателей, при которых популяция в конце концов вымирает.

Экспериментально было показано, что при неагрессивном поведении популяция не вымирает и численность особей колеблется вокруг некоторого установившегося режима, тогда как при агрессивном поведении живучесть популяции резко сокращается и зависит уже от других параметров. Так, одним из важнейших характеристик является размер-

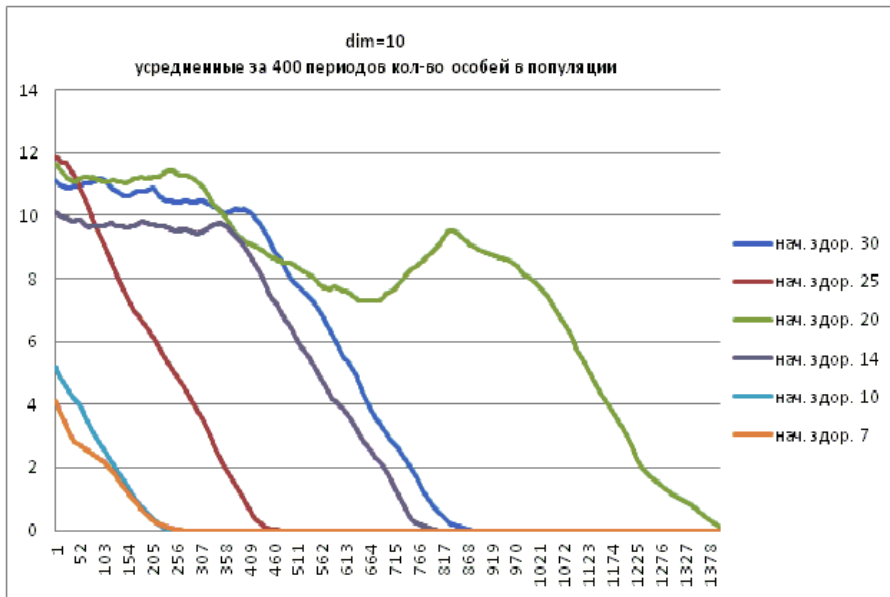


Рис. 12. Результат работы модели, динамика количества особей в популяции в зависимости от начального уровня здоровья при $\text{dim} = 10$

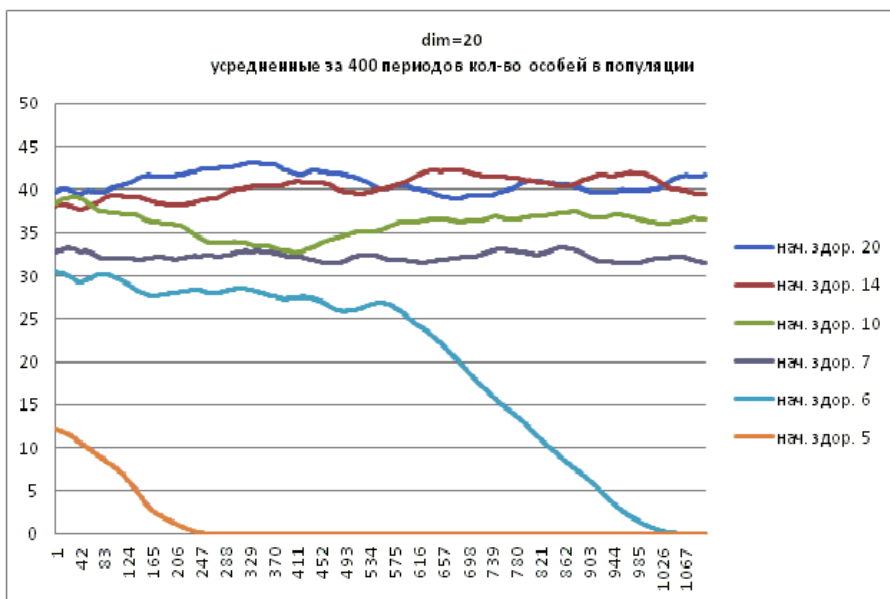


Рис. 13. Результат работы модели, динамика количества особей в популяции в зависимости от начального уровня здоровья при $\text{dim} = 20$

ность поля. Было получено, что при агрессивном поведении популяции, при прочих равных значениях остальных параметров, можно найти такое пороговое значение размерности, что при dim меньшем, чем это значение, популяция гарантированно будет вымирать через какое-то конечное время, при dim большем либо равном, чем это пороговое значение, популяция выживает, причем равновесное количество особей в популяции монотонно возрастает по dim . При этом в случае, когда популяция выживает, равновесное значение плотности населения (среднее количество особей, деленное на dim^2), по всей видимости, является некоторым инвариантом относительно dim . С другой стороны, в случае, когда

популяция вымирает, время жизни популяции, вообще говоря, не монотонно зависит от размерности поля.

Изменения начального уровня здоровья также показывают интересные результаты. При достаточно малых значениях \dim , когда популяция гарантированно вымирает, оказывается, что живучесть популяции зависит не монотонно от начального уровня здоровья, и существует некоторое оптимальное его значение, отклоняясь от которого как в большую, так и в меньшую сторону, живучесть популяции ухудшается. С другой стороны, при достаточно больших значениях \dim живучесть популяции монотонно зависит от значения этого параметра (т.е. чем выше начальный уровень здоровья, тем выше равновесный уровень количества особей в популяции). При этом наблюдается эффект насыщения равновесного значения численности популяции при увеличении начального уровня здоровья, т.е. каждое следующее увеличение начального уровня здоровья дает все меньшую прибавку к равновесному уровню численности популяции. Если же начальный уровень здоровья сильно уменьшить, то можно найти пороговое значение этого параметра, при котором популяция будет вымирать.

Литература

- [1] *Henning P. A.* Computational evolution. *Lecture notes in economics and mathematical systems ser.*, 2008. P. 175–193.
- [2] *Epstein J., Axtell R.* Growing artificial societies: Social science from the bottom up. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 1996. 223 p.
- [3] *Younger S.* Violence and revenge in egalitarian societies // *J. Artificial Societies Social Simulation*, 2005. Vol. 8, no. 4. P. 11. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/11.html>.
- [4] *Bowles S.* Individual interactions, group conflict, and the evolution of preferences // *Social Dynamics*, 2001. P. 155–190.
- [5] *Bowles S., Choi J., Hopfensitz A.* The co-evolution of individual behaviors and social institutions // *J. Theor. Biol.*, 2003. Vol. 223, no. 2. P. 135–147.
- [6] *Blume L. E.* Evolutionary equilibrium with forward-looking players. 2004. URL: <http://www.santafe.edu/media/workingpapers/05-04-015.pdf>