

УДК 577.24

НАЛИЧИЕ В ПОПУЛЯЦИИ СТАРЫХ ОСОБЕЙ УСКОРЯЕТ И ОПТИМИЗИРУЕТ ПРОЦЕСС ОТБОРА: ЭКСПЕРИМЕНТЫ *in silico*

© 2018 В. А. Чистяков*, Д. В. Денисенко, А. Б. Брень

Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии
им. Д.И. Ивановского, Институт биологии, 344090 Ростов-на-Дону,
Россия; электронная почта: vladimirchi@sfedu.ru

Поступила в редакцию 24.08.17
После доработки 04.10.17

Одной из важных составных частей концепции старения – феноптоза (запрограммированного старения) является обладающее рангом субконцепции понятие о старении как ускорителе эволюции. По ряду причин, главная из которых проблематичность экспериментальной проверки эволюционных гипотез, верификация вышеназванной субконцепции может быть основана преимущественно на анализе внутренней непротиворечивости эвристических моделей и их соответствия бесспорным наблюдаемым фактам. Для иллюстрации механизма ускорения, а главное структурирования эволюционного процесса в сообществах, включающих закономерно ослабленных особей, В.П. Скулачевым была предложена в 2003 г. концептуальная модель, названная им позже «басней о зайцах». Несмотря на простоту, данная модель обладает несомненной внутренней логикой. Естественным направлением развития концептуальных моделей является их перевод на язык математики. Задачей данной работы было создание вариации известной мультиагентной модели «хищник–жертва», которая позволяет «увидеть» как присутствие в популяции жертвы закономерно ослабленных (старых) особей стимулирует отбор особей с признаками, адаптивный потенциал которых не девальвируется с возрастом. Модель (<http://homebear.ru/PD>) разработана на платформе Java, 6-я версия. Среда разработки NetBeans 8.2. Статистический анализ и подготовка иллюстративных материалов проводились с использованием среды R, версия 3.4.1. Результаты численных экспериментов, поставленных с помощью нашей модели, в принципе соответствуют положениям эвристической модели В.П. Скулачева, а, следовательно, подтверждают отсутствие в ней принципиальных логических противоречий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: старение, феноптоз, мультиагентное моделирование, эволюция, басня о зайцах.

*В этот момент представлялось более важным не надеяться на точность,
а взять проблему в кольцо простых предположений.*

Роджер Желязны и Джейн Линдсколд

Рождение концепции феноптоза оказалось для современной биологии старения и смежных с ней дисциплин существенным стимулом. Признание существования целого ряда фенопозных программ, лишь одной из которых является старение, позволяет использовать в теоретических построениях мощный логический инструментарий, основанный на поиске и анализе аналогий (не только биологических). Необходимо отметить, что сторонники концепции старения–износа также осознают эффективность данного подхода, что привело к многочисленным попыткам использования в геронтологии аппарата теории надежности [1].

Однако такие попытки к серьезным успехам не привели. В то же время только одно из след-

ствий идеи «старения как программы» – признание возможности существования молекул «отключателей старения», уже принесло осязаемые практические плоды [2].

Быстрое развитие молодых научных направлений, как правило, бывает неравномерным. При этом острова надежной, подтвержденной фактами теории, соединяются мостами предположений. Принятие гипотезы запрограммированного старения неизбежно порождает вопрос о том, какие преимущества дает эта программа популяциям, состоящим из стареющих особей. Ясно, что в случае отсутствия таких преимуществ любая достаточно сложная программа была бы элиминирована случайными мутациями, которые в этой ситуации были бы адаптивными. Поэтому одним из фундаментальных предположений, лежащих в основе концепции

* Адресат для корреспонденции.

феноптоза, является то, что генетические программы, разрушительные для отдельных особей, могут быть адаптивными для биологических сообществ. Частным случаем такого предположения является гипотеза о старении как ускорителе эволюции. По ряду причин, главная из которых — проблематичность экспериментальной проверки эволюционных гипотез, верификация вышеназванной гипотезы может быть основана преимущественно на анализе внутренней непротиворечивости эвристических моделей и их соответствия бесспорным наблюдаемым фактам. Для иллюстрации механизма ускорения, а главное, структурирования эволюционного процесса в сообществах, включающих закономерно ослабленных особей, В.П. Скулачевым была предложена в 2003 г. концептуальная модель, названная им позже «басней о зайцах» [3]. Позволим себе длинную цитату с ее точным изложением [4]: «... постепенное запрограммированное ухудшение определенных функций организма позволяет увеличить эффективность естественного отбора по другим его функциям. Представим себе эксперимент. Два молодых зайца — один поумней и другой поглупей, — встретив лису, имеют практически равные шансы удраить от врага потому, что бегают быстрее. Однако с возрастом умный заяц получит преимущество перед глупым, поскольку скорость бега зайцев снизится из-за старческого недуга, известного как саркопения (уменьшение числа клеток в мышцах). Теперь у умного зайца, который, увидев лису, тотчас пустится наутек, будет гораздо больше шансов спастись, чем у глупого, замешкавшегося на старте. Это значит, что только умный будет продолжать плодить зайчат, в результате чего заячья популяция поумнеет».

Несмотря на простоту, данная модель обладает несомненной внутренней логикой. Она основана на трех очевидных фактах: 1) в общую жизнеспособность особей вносят вклад разные признаки/гены; 2) при старении жизнеспособность особей девальвируется; 3) вклад в жизнеспособность разных генов девальвируется по-разному. Из этих трех положений закономерно вытекает, что отбор в стареющей популяции будет способствовать накоплению генов с минимальной склонностью к девальвации вклада в приспособленность (ДВВП). Девальвация жизнеспособности связана в основном с потерей клеточности [5–7] и снижением эффективности митохондриальной биоэнергетики [8]; в результате этого организменные и клеточные структуры сталкиваются с дефицитом вещества и энергии.

Согласно ставшему классикой теории управления принципу Эшби [9], система эффективно управляется только тогда, когда управляющие

системы обладают меньшей энтропией чем управляемые. Можно предположить, что это ведет к тому, что гены, контролирующие системы управления и коммуникации, обладают минимальной склонностью к ДВВП. Таким образом, скулачевская модель показывает, что старение стимулирует наиболее прогрессивные тренды эволюции, связанные с усложнением вышеназванных систем. Именно эти тренды ведут к формированию принципиальных новшеств, называемых в русскоязычной литературе ароморфозами [10].

Отметим также, что «маскировка» снижения жизнеспособности, обусловленной потерей скорости бега, в присутствии генного комплекса, обуславливающего высокий интеллект, относится к хорошо известному типу взаимодействия генов, обозначаемому термином «эпистаз» [11].

Признавая эвристическую ценность данной модели, тем не менее, нужно отметить, что естественным направлением развития концептуальных моделей, а, в определенной степени, и условием их принятия научным сообществом, является перевод на язык математики. Задачей нашей работы было создание вариации известной мультиагентной модели хищник-жертва, позволяющей поставить предложенный В.П. Скулачевым эксперимент *in silico* и увидеть, как присутствие в популяции жертвы закономерно ослабленных (старых) особей стимулирует отбор особей с признаками, адаптивный потенциал которых не девальвируется с возрастом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для иллюстрации затронутых в статье концепций была разработана многоагентная имитационная модель. Идеологически эта модель наследует подходы, использованные в модели, описанной в работе [12].

Модель разработана на платформе Java, использовалась 6-я версия Java; среда разработки NetBeans 8.2; статистический анализ и подготовка иллюстративных материалов проводили с использованием среды R, версия 3.4.1.

В начале численного эксперимента генерируется популяция зайцев, хаотично расположенных в ареале обитания. Зайцы движутся в случайных направлениях с постоянной скоростью. Они поделены на молодых и старых, а также на умных и глупых. Таким образом, генерируется четыре категории зайцев: 1) молодые умные, 2) молодые глупые, 3) старые умные и 4) старые глупые.

Генерируется популяция лис, хаотично расположенных и движущихся в случайных нап-

равлениях. Каждая лиса выбирает себе жертву и начинает преследование. В свою очередь, заяц пытается убежать прочь от лисы по прямой, их соединяющей. Ареал обитания наших модельных животных геометрически представляет собой поверхность тора, так что, если агент убежит за границу области, он тут же появляется из-за противоположной. Если лиса догоняет зайца, она съедает его с некоторой вероятностью, заданной индивидуально для каждой категории зайцев (молодые умные, старые глупые и т.д.). Расчет продолжается, пока лисы не съедят 90% зайцев. В этот момент расчет этапа (экспериментального цикла) останавливается и фиксируется соотношение умных и глупых зайцев. Затем вновь генерируется популяция зайцев, при этом в ней соотношение умных и глупых зайцев соответствует таковому в конце прошлого экспериментального цикла. Таким образом организованы экспериментальные серии, которые продолжают (повторяя процедуру) до тех пор, пока процент умных зайцев не превысит 95% или не упадет ниже 5%, или количество экспериментальных циклов не превысит некоторого достаточно большого значения. Три вышеназванных обстоятельства обуславливают завершение процесса.

В расчетах мы варьировали процент старых зайцев в популяции и вероятность съедения зайца лисой (Probability of Devouring, PD), при этом в большинстве экспериментов PD старых глупых зайцев была выше, чем у их собратьев.

Некоторые параметры (исходное положение агентов, исходное направление движения) генерируются случайным образом, другие задаются экспериментатором. Размер популяции зайцев всегда составлял 1000 особей, лис – 50. Процент старых зайцев варьировал от 10% до 90% с шагом 10%, PD старых глупых зайцев варьировала от 0,2 до 0,9, у всех остальных категорий она составляла всегда 0,2. В иллюстративных материалах к статье упоминается величина ΔPD , равная разнице в PD между старыми глупыми и старыми умными зайцами. Эта величина отражает разницу в ДВВП между скоростью передвижения и умением быстро принимать решения и варьирует в нашей модели от 0 до 0,7. Всего выбрано $7 \times 9 = 63$ набора исходных параметров. Для каждого расчет проводили десятикратно.

Интерфейс программы (рис. 1) прост, понятен и не требует особого опыта использования компьютера или навыков программирования. Программа не требовательна к ресурсам оборудования и будет работать на любом компьютере с установленным JRE версии 6. Была также разработана версия программы, позволяющая проводить расчеты в пакетном режиме.

Полнофункциональную модель и ее исходный код можно скачать из интернета по адресу <http://homebear.ru/PD>. Для ее работы на компьютере должна быть установлена Java, JRE версии 6+.

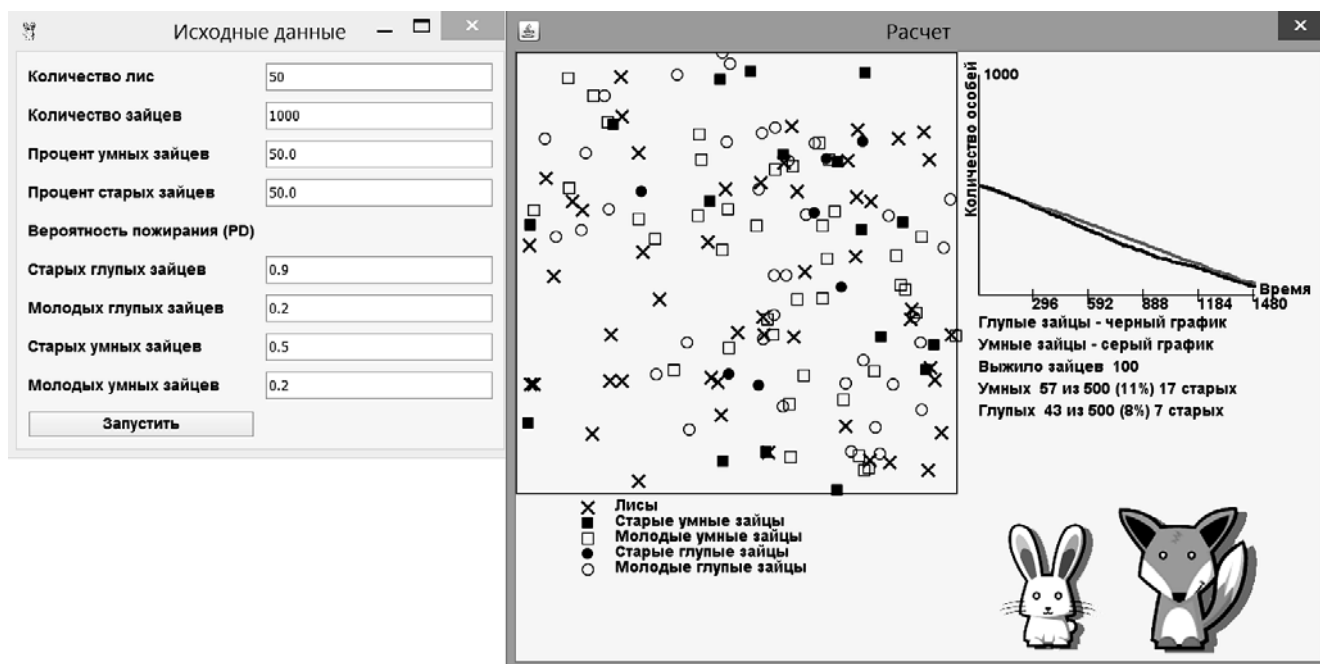


Рис. 1. Интерфейс программы моделирования

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования представлены на рис. 2–9. Как видно на рис. 2, отсутствие в экспериментальной популяции старых зайцев ведет к тому, что события развиваются хаотически. В

четырёх экспериментальных сериях накапливаются умные зайцы, в шести глупые. Другими словами, при отсутствии закономерно ослабленных особей, даже в нашей простейшей модели можно наблюдать дрейф генов [13].

То же самое можно наблюдать и в ситуации, когда параметр ΔPD , характеризующий разницу

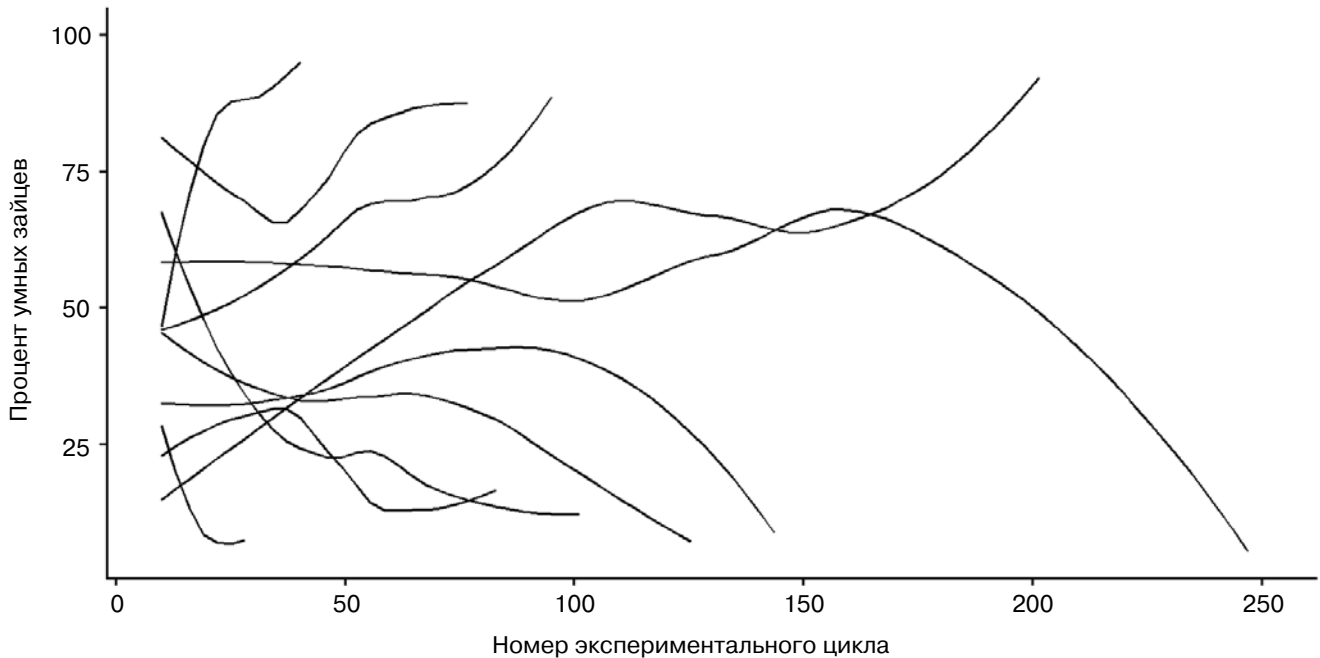


Рис. 2. Динамика изменения доли умных зайцев при $\Delta PD = 0,7$ и отсутствии в популяции старых особей

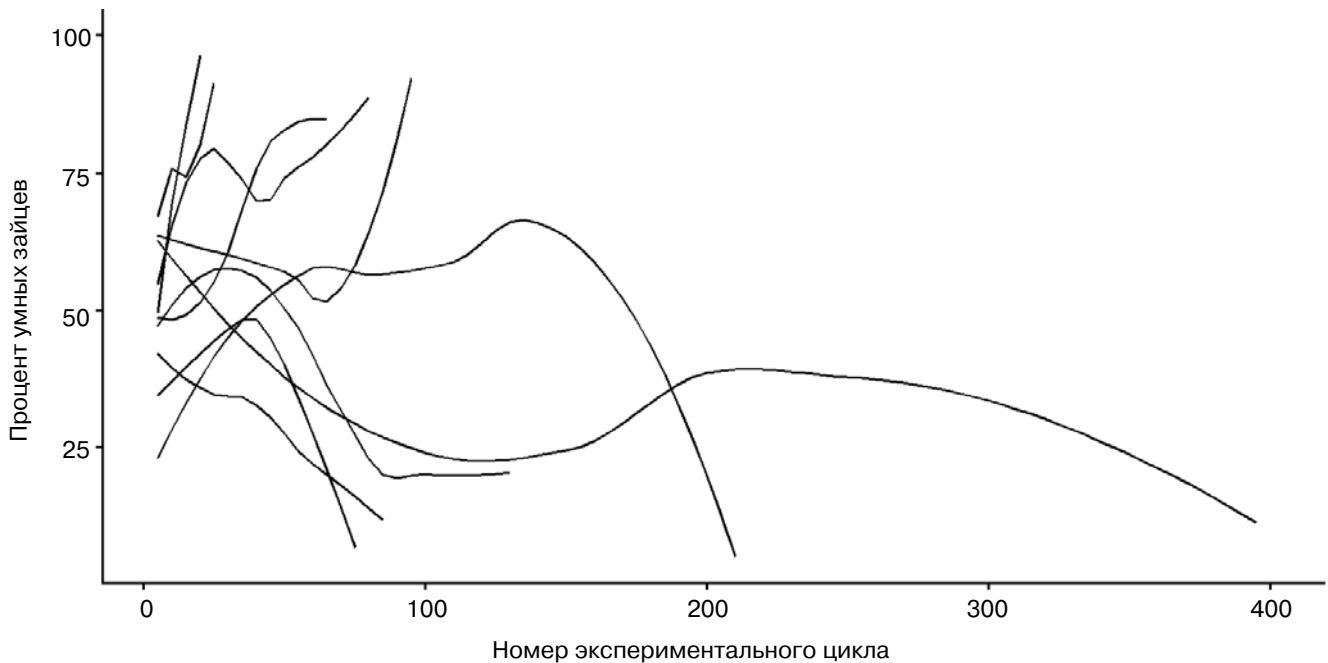


Рис. 3. Динамика изменения доли умных зайцев при $\Delta PD = 0$ и 50% старых зайцев в популяции

в ДВВП между скоростью передвижения и умением быстро принимать решения, равен нулю (рис. 3). При этом вероятность съедения лисой умного и глупого старого зайца одинакова и равна 0,2. Введение в популяцию 50% старых особей (рис. 4), даже при очень низком значении ΔPD , равном 0,02 (т.е. вероятность выжива-

ния после встречи с лисой у умного зайца выше всего на 1/10, чем у глупого), приводит к тому, что начинает работать отбор и картина эволюции экспериментальной популяции существенно упорядочивается. При ΔPD , равной 0,7 (вероятность выживания после встречи с лисой у умного зайца выше в 4,5 раза, чем у глупого), со-

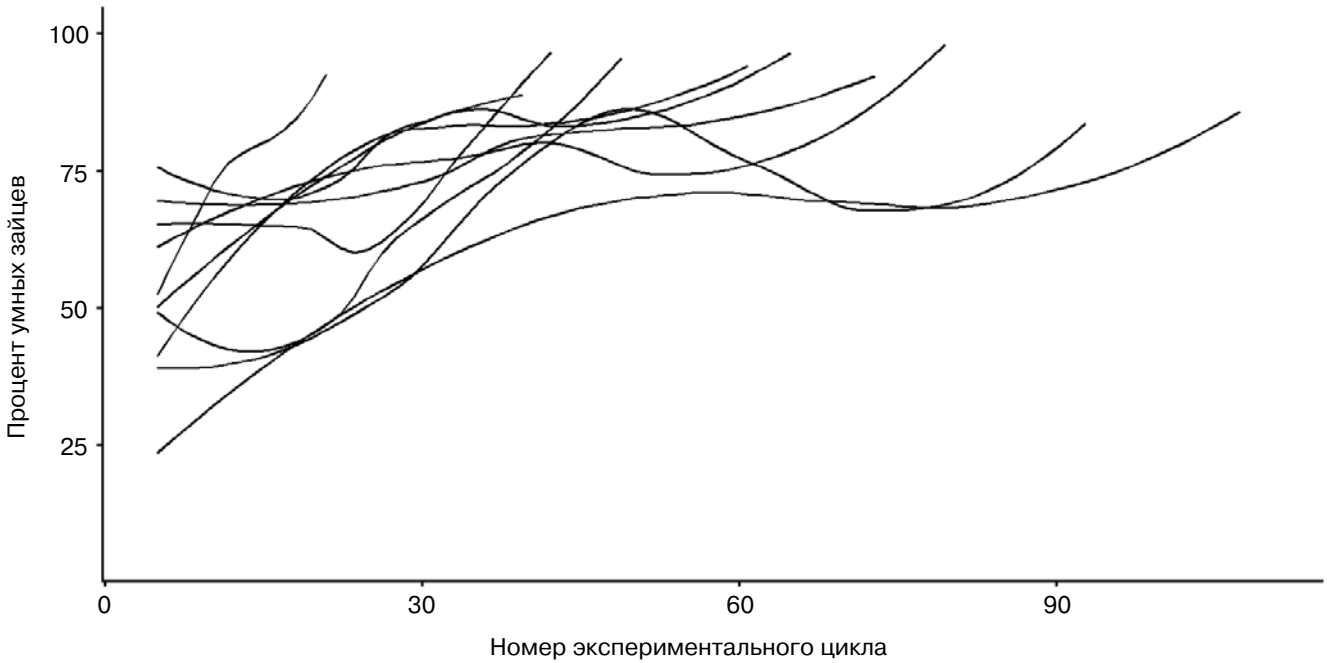


Рис. 4. Динамика изменения доли умных зайцев при $\Delta PD = 0,02$ и 50% старых зайцев в популяции

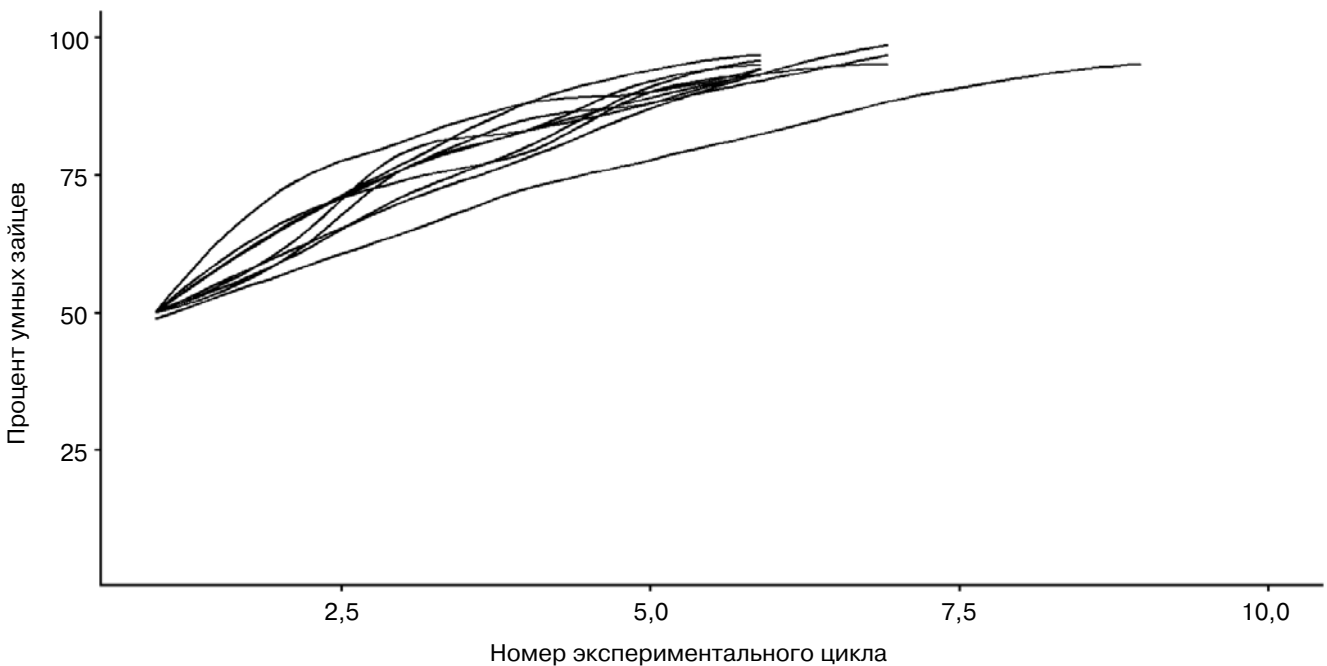


Рис. 5. Динамика изменения доли умных зайцев при $\Delta PD = 0,7$ и 50% старых зайцев в популяции

бытия развиваются заметно более однозначно, т.е. эволюция становится более «управляемой» (рис. 5). Более детально связь между ΔPD и изменением соотношения разных типов зайцев отражена на рис. 6. Видно, что с увеличением ΔPD изменяется не только скорость вытеснения умными зайцами глупых, меняется сам вид кри-

вой, описывающей динамику процесса. Для большинства кривых, представленных на рисунке, характерен начальный пик, затем область небольшого снижения с последующим подъемом до максимальных значений. Такая форма кривых обусловлена тем, что экспериментальные циклы, в которых идет максимально быст-

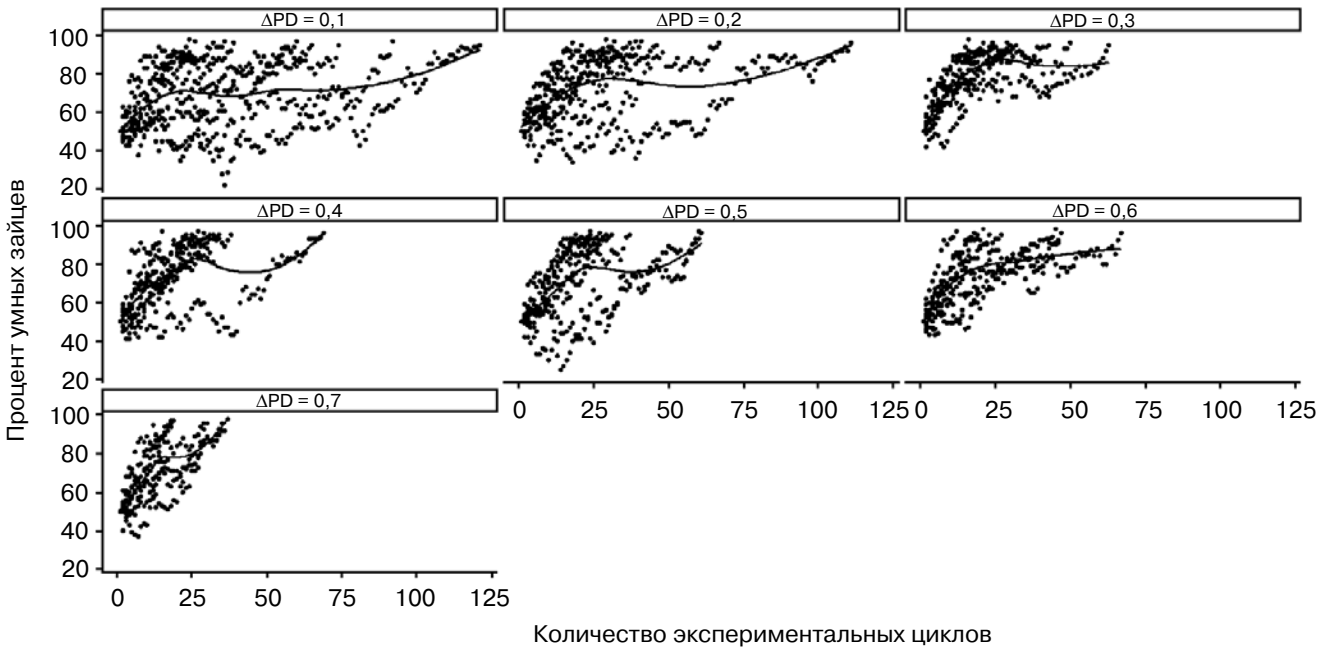


Рис. 6. Динамика изменения доли умных зайцев при 10% старых особей в популяции и ΔPD от 0,1 до 0,7

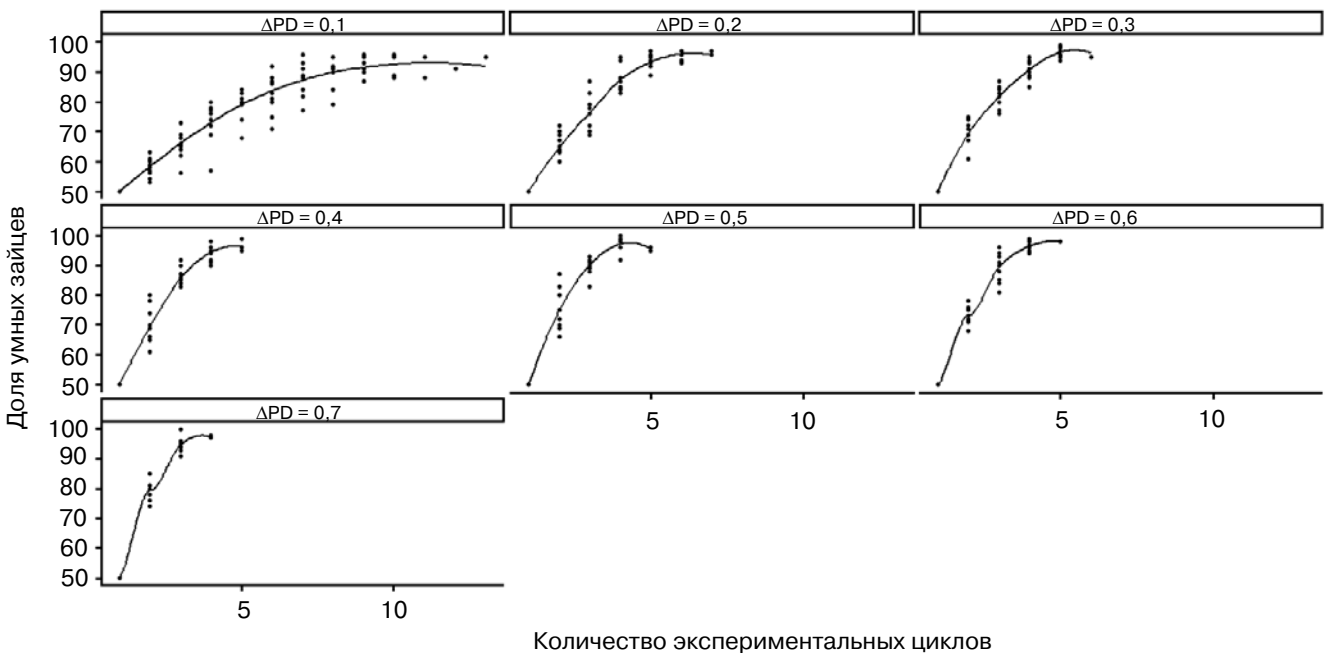


Рис. 7. Динамика изменения доли умных зайцев при 90% старых особей в популяции и ΔPD от 0,1 до 0,7

рое накопление умных зайцев быстрее достигают точки останова процесса. «Выбывание» из экспериментальной системы наиболее «успешных» вариантов ведет к «проседанию кривой», которое в итоге закономерно компенсируется ростом доли умных зайцев в «отстающих» экспериментальных циклах. Сложность формы кривой определяется важным преимуществом агентного моделирования по сравнению с аналитическими решениями, которые не позволяют учесть «индивидуальность» микропроцессов, определяющих параметры макропроцесса. Использование алгоритма «loess», специально разработанного для точной аппроксимации экспериментальных данных позволяет выявлять тонкую динамику моделируемых событий.

Важным преимуществом мультиагентного моделирования перед аналитическими решениями является то, что в последнем случае достаточно трудно учитывается неопределенность. Для этого в систему уравнений вводятся параметры варьирования, как правило, в виде достаточно искусственных коэффициентов. В нашей модели неопределенность задается работой системы встроенных в программу генераторов случайных чисел, поэтому результаты экспериментов *in silico* подвержены случайным отклонениям, так же, как и результаты реальных экспериментов. Варьируя входные параметры модели, можно проследить их влияние не только на основные тренды, но и на параметры изменчивос-

ти моделируемых процессов. Напомним, что наша модель построена с использованием методологии, широко применяемой для создания мультиагентных моделей «хищник–жертва». Генерируемые этими программами кривые численности животных имеют вид, сходный с наблюдаемыми в природе [14]. По-видимому, и параметры неопределенности, создаваемой в результате работы моделей такого типа, в том числе и нашей, можно считать близкими к оптимальным.

На рис. 6 представлено графическое описание процессов, развивающихся при доле старых особей в популяции, равной 10%. Увеличение этого параметра также ведет к ускорению и стандартизации результатов отбора, что даже без статистического анализа ясно видно при сопоставлении рис. 6 и 7. Таким образом, максимализация доли старых, но сохраняющих способность к размножению особей может быть выгодна природным популяциям именно в плане упорядочивания результатов отбора, повышения его предсказуемости. Естественно, данный параметр может повышаться лишь в пределах, не затрагивающих общую жизнеспособность популяций.

В большинстве проведенных расчетов вероятность поедания (PD) молодых зайцев и старых умных зайцев одинакова (равна 0,2). Такие параметры приняты нами как обеспечивающие двукратное ускорение расчетов и максимальную

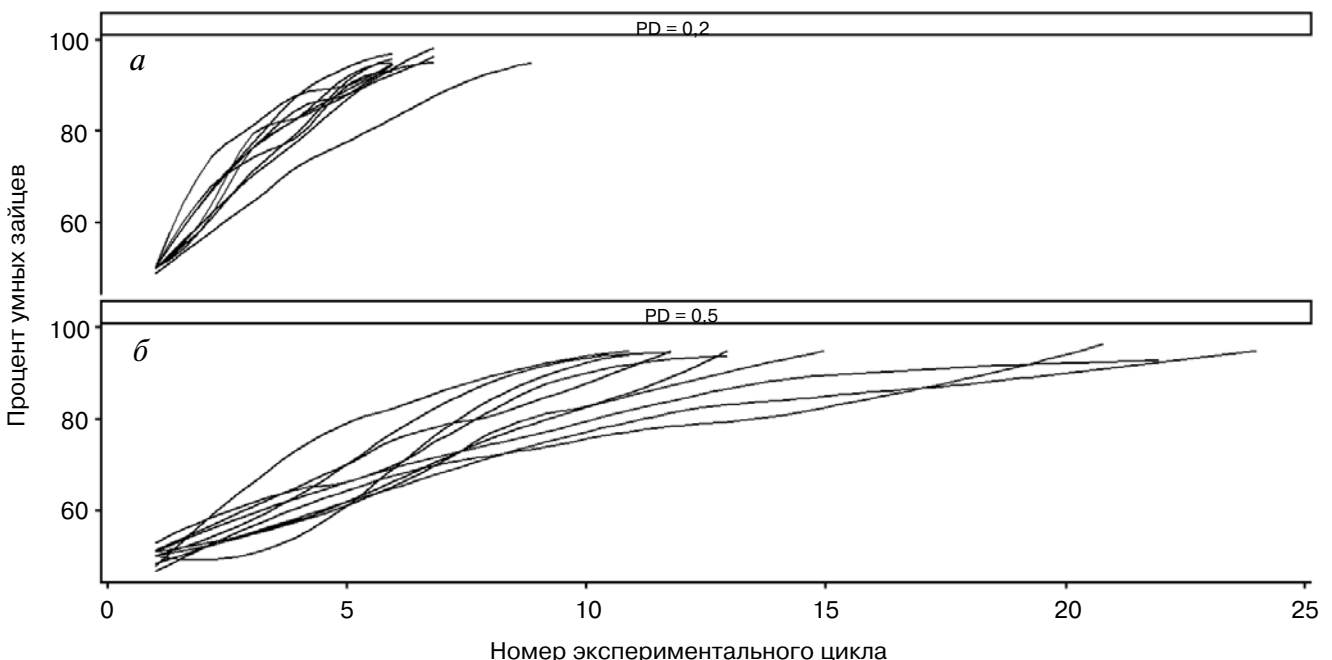


Рис. 8. Расчеты с повышенной PD старых умных зайцев. а – Данные одного из графиков рис. 7 (PD старых умных = 0,2); б – результаты расчетов для PD старых умных = 0,5

наглядность иллюстраций. Однако при введении разницы по PD между данными категориями объектов, как можно видеть на рис. 8 качественно картина не меняется, а выводы в статье носят, конечно, качественный характер.

Выявленные в наших экспериментах закономерности, за исключением связанных с варьированием, показаны на трехмерном графике (рис. 9), отражающем взаимосвязи между тремя изменяемыми в нашей модели параметрами. Фигура, отображенная на графике, представляет собой «заячье одеяло» – поверхность сложной формы, один из концов которой вытянут вдоль вертикальной оси, отображая снижение эффективности отбора при падении ΔPD и доли старых особей в популяции.

Моделированию эволюционных процессов, связанных со старением, посвящен целый ряд исследований. Большинство из них развивает подход, заложенный в фундаментальной работе Партридж и Бартона [15]. В этой работе (если отвлечься от словесных рассуждений) на основе

уравнения Эйлера–Лотки было сформулировано дискретное соотношение между вероятностями дожития (выживаемостями) и параметром Фишера r , определяющим скорость роста популяции (формула 3а в работе) из которого следует, что максимальное значение параметра Фишера имеет место при определенном (оптимальном) соотношении выживаемости старых и молодых особей. При выживаемости «старых» равном нулю (т.е. в случае, когда в популяции присутствуют только молодые особи), r меньше оптимального. Таким образом, популяции, в которой есть старые особи, в благоприятных условиях должны расти быстрее, чем популяции, состоящие только из молодых. Важно, что согласно уравнению Партридж и Бартона, при этом расход ресурсов на поддержание старых особей «окупается» вышеназванными эффектами. В работе Партридж и Бартона не обсуждается групповой отбор. Однако, на основе их результатов можно заключить, что, исходя из разработанной модели, групповой отбор вполне может поддер-

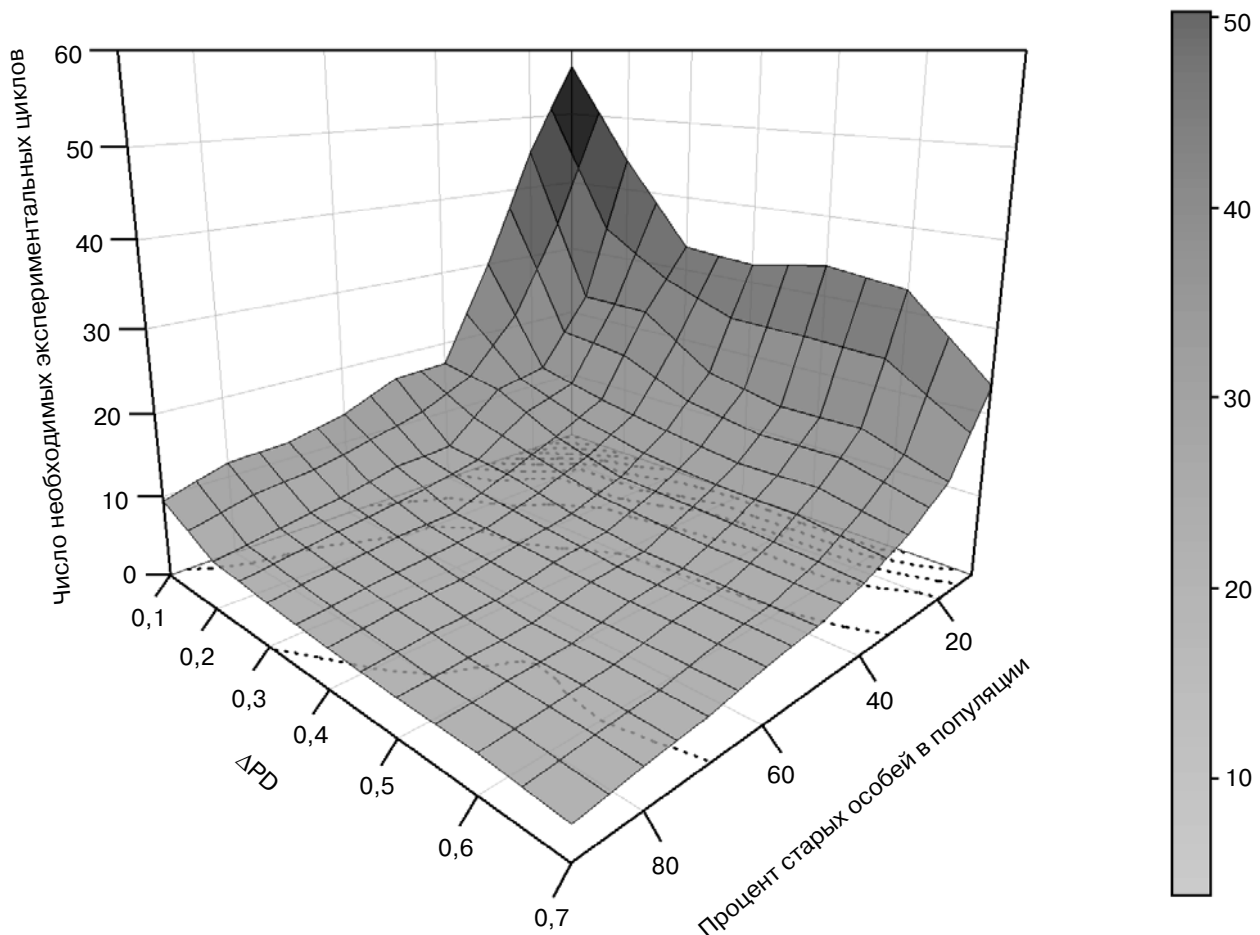


Рис. 9. Зависимость числа экспериментальных циклов, необходимых для 95% обогащения популяции умными зайцами от параметров экспериментальной популяции («заячье одеяло»)

живать стареющие популяции в конкуренции с нестареющими. Патридж и Бартон не сделали такого заключения, т.к. ставили совсем другие задачи (моделировали гипотезу Медавара и Уильямса). Но их модель позволяет его сделать. Подход, разработанный Патридж и Бартоном, успешно применяли в дальнейшем для решения различных частных задач [16, 17]. Тем не менее, мы полагаем, что мультиагентное моделирование является эффективным инструментом, позволяющим существенно дополнить результаты, полученные аналитическими методами.

Важным свойством, определяющим качество математических моделей в биологии, является их «физичность». В этом смысле имитационные модели обладают по сравнению с аналитическими «врожденным преимуществом», суть их работы по определению достаточно наглядна.

Наиболее грубым в плане «физичности» допущением является то, что старение в нашей системе происходит скачкообразно. Однако, как мы уже показали ранее [12], введение стадийности старения с числом стадий до пяти, не ведет к принципиальному изменению результатов моделирования.

Говоря о закреплении «признаков ценных для популяции и вредных для особи», мы неизбежно приходим к концепции группового отбора. В явном виде в работах Скулачева эту проблему не рассматривали. Автор молчаливо и

вполне обоснованно предполагает, что популяции, обладающие «ускорителем эволюции» в конце концов, вытеснят такового не имеющие. Роль группового отбора, в том числе реальность его участия в эволюции старения, а также других признаков ценных для вида, но вредных для особи, подробно разобрана в обзоре Миттельдорфа [18]. Математическое моделирование группового отбора применительно к старению отдельная непростая задача. Соответствующие методы мультиагентного моделирования еще предстоит разработать, что и станет предметом наших будущих исследований.

Таким образом, результаты численных экспериментов, поставленные с помощью нашей модели, в принципе соответствуют положениям эвристической модели В.П. Скулачева (см. выше), а, следовательно, подтверждают отсутствие в ней принципиальных логических противоречий.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность В.П. Скулачеву за напоминание о «силе простоты», без которого эта работа никогда не была бы закончена.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 16-16-04032).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gavrilov, L.A., and Gavrilova, N.S. (2004) The reliability-engineering approach to the problem of biological aging, *Ann. NY Acad. Sci.*, **1019**, 509–512.
- Skulachev, V.P. (2012) What is “phenoptosis” and how to fight it? *Biochemistry (Moscow)*, **77**, 689–706.
- Skulachev, V.P. (2003) Aging and the programmed death phenomena. In: *Topics in Current Genetics*. Vol. 3. Nystrom T., Osiewicz H.D., editors. *Model systems in ageing*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 191–238.
- Северин Ф.Ф., Скулачев В.П. (2009) Запрограммированная клеточная смерть как мишень борьбы со старением организма, *Усп. геронтол.*, **22**, 37–48.
- Чистяков В.А., Денисенко Ю.В. (2009) Возрастная потеря клеточности: исследование *in silico*, *Рос. хим. журн.*, **53**, 105–110.
- Чистяков В.А., Денисенко Ю.В. (2010) Имитационное моделирование старения дрозофилы *in silico*, *Успехи геронтологии*, **23**, 557–563.
- Chistyakov, V.A., and Denisenko, Y.V. (2012) Cellularity loss and Dilman’s problem: an *in silico* study, *Biochemistry (Moscow)*, **77**, 779–792.
- Zolotukhin, P.V., Belanova, A.A., Prazdnova, E.V., Mazanko, M.S., Batiushin, M.M., Chmyhalo, V.K., and Chistyakov, V.A. (2016) Mitochondria as a signaling hub and target for phenoptosis shutdown, *Biochemistry (Moscow)*, **81**, 329–337.
- Эшби У.Р. (1959) Введение в кибернетику, Иностранная литература, Москва, с. 432.
- Северцов А.Н. (1939) Морфологические закономерности эволюции. М.; Л.: Изд-во АН СССР, с. 610.
- Sackton, T.B., and Hartl, D.L. (2016) Genotypic context and tpistasis in individuals and populations, *Cell*, **166**, 279–287.
- Chistyakov, V.A., and Denisenko, Y.V. (2015) Aging saves populations from extinction under lack of resources: *in silico* experiments, *Biochemistry (Moscow)*, **80**, 754–759.
- Кунин Е.В. (2014) *Логика случая. О природе и происхождении биологической эволюции*, Центрполиграф, Москва, с. 527.
- Дмитриев В.Л. (2014) Мультиагентный подход к моделированию биологических систем на примере популяций мелких рыб и акул, *Современные научные исследования и инновации*, **6**.
- Partridge, L., and Barton, N.H. (1993) Optimality, mutation and the evolution of ageing, *Nature*, **362**, 305–311.
- Новосельцев В.Н., Новосельцева Ж.А. (2012) Моделирование истории жизни и баланса ресурсов, в сб. *Геронтология in silico: становление новой дисциплины. Математические модели, анализ данных и вычислительные эксперименты* (под ред. Марчука Г.И., Анисимова В.Н., Романюхи А.А., Яшина А.И.), БИНОМ, Лаборатория знаний, Москва, с. 148–175.
- Новосельцев В.Н., Новосельцева Ж.А., Яшин А.И. (2012). Популяционные модели старения, в сб. *Геронтология in silico: становление новой дисциплины. Математические модели, анализ данных и вычислительные*

эксперименты (под ред. Марчука Г.И., Анисимова В.Н., Романюхи А.А., Яшина А.И.), Москва, БИНОМ, Лаборатория знаний, с. 175–194.

18. Mitteldorf, J.J. (2012) Adaptive aging in the context of evolutionary theory, *Biochemistry (Moscow)*, **77**, 716–725.

**PRESENCE OF OLD SUBJECTS
IN A POPULATION ACCELERATES
AND OPTIMIZES PROCESS OF SELECTION:
in silico EXPERIMENTS**

V. A. Chistyakov*, D. V. Denisenko, and A. B. Bren

*Southern Federal University, Ivanovsky Academy of Biology
and Biotechnology, Institute of Biology, 344090 Rostov-on-Don,
Russia; E-mail: vladimirchi@sfnu.ru*

Received August 24, 2017

Revision received October 4, 2017

One important component of the concept of aging-phenoptosis (programmed aging) is the notion of aging as an accelerator of evolution, having the rank of subconception. For several reasons, the main being the problematic experimental verification of evolutionary hypotheses, verification of the above subconcept can be based primarily on analysis of the internal consistency of heuristic models and their correspondence to undisputed observable facts. To illustrate the mechanism of acceleration and, most importantly, the structuring of the evolutionary process in communities, including naturally weakened subjects, V. P. Skulachev offered in 2003 a conceptual model, which he later called «a fable about hares». Despite the simplicity, this model has undoubted internal logic. The natural direction of development of conceptual models is their translation into the language of mathematics. The task of our work was to create a variation of the known multiagent predator–prey model, which allows us to «see» how the presence of a victim in the population containing naturally weakened (old) subjects stimulates the selection of individuals with traits whose adaptive potential does not devalue with age. The model (<http://homebear.ru/PD>) was developed on the Java platform version 6, NetBeans development environment 8.2. Statistical analysis and preparation of illustrative materials were carried out using environment R, version 3.4.1. The results of numerical experiments, set using our model, in principle correspond to the provisions of the heuristic model of V. P. Skulachev, and consequently confirm the absence of fundamental logical contradictions in it.

Keywords: aging, phenoptosis, multiagent modeling, evolution, fable about hares