

УДК 57.02.001.57:574.4

ОБ ОДНОМ ВАРИАНТЕ ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИИ ЛЕММИНГОВ

© 2015 О.П. Люлякин, Д.А. Саранча, Ю.С. Юрезанская

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», Москва

Статья поступила в редакцию 20.08.2015

На основе численного моделирования при помощи метода Монте-Карло, использованного ранее в модели газовой динамики, сконструирована индивидуально-ориентированная модель взаимодействия копытных леммингов (*Dicrostonyx torquatus chionopyes*) с кормовым ресурсом. Найдены параметры, при которых появляются стабильные трехлетние циклы динамики численности леммингов. Получено хорошее совпадение с натурными данными.

Ключевые слова: метод случайных блужданий, модели с сезонностью, генотип, лемминги, имитационное моделирование.

Работа поддержана грантом РФФИ № 14-01-90011.

В ВЦ РАН на протяжении многих лет осуществлялись работы по разработке и использованию методов точных наук в описательных науках, в экологии в том числе. На примере моделирования тундровых популяций и сообществ была разработана методика построения и исследования комплекса математических моделей для изучения биоценологических сообществ. Оригинальность методики состоит в использовании комплексного подхода в диапазоне от выбора объекта моделирования, анализа исходной биологической информации, обоснования детальной базовой модели до обоснования и построения набора взаимосвязанных и взаимодополняющих моделей, включающих в себя наряду с имитационными также упрощенные (аналитические) модели. Особенностью методики является совмещение биологических, биофизических и математических подходов при анализе экологической проблемы [1-4].

В результате применения данной методики была разработана модель тундрового сообщества «растительность – лемминги – песцы». Она основана на учете сезонных изменений трофических взаимодействий внутри сообщества и построена с помощью экспертно оцененных зависимостей [1, 5, 6].

Анализ результатов вычислительных экспериментов с исходной моделью показал ведущую роль популяции леммингов в формировании колебаний численности животных тундрового сообщества.

Люлякин Олег Павлович, инженер-исследователь.

E-mail: oleg217@yandex.ru

Саранча Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: saran@ccas.ru

Юрезанская Юлия Сергеевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. E-mail: july@ccas.ru

Применение комплексного подхода при моделировании тундровых популяций и сообществ позволило сформулировать количественные гипотезы о ведущих механизмах формирования колебаний численности тундровых животных. Как указано выше, ведущим фактором, определяющим эти колебания, является динамика численности популяции леммингов. Эта динамика, в свою очередь определяется тремя показателями: 1) скоростью прироста биомассы в благоприятный год, 2) максимальной численностью, 3) выживаемостью в наиболее неблагоприятных условиях.

Полученные выводы хорошо согласуются с одной из распространенных гипотез о том, что формирует колебания численности популяций не какой-то отдельно взятый фактор, а некоторая их комбинация [6]. Наличие предыдущего опыта моделирования позволило перейти на другой уровень описания – использование индивидуально-ориентированных моделей [7].

В настоящей работе построена индивидуально-ориентированная модель поведения тундровых животных – копытных леммингов (*Dicrostonyx torquatus chionopyes*), а для численного моделирования использован метод прямого статистического моделирования Монте-Карло. Этот метод был предложен австралийским профессором Бердом в начале 60-х для решения задач динамики разреженного газа [8]. Основная идея метода состоит в предположении, что на малом временном шаге можно разделить два взаимосвязанных процесса – движение молекул и их столкновение друг с другом. Такой подход был использован для моделирования динамики численности популяции леммингов в работе [7], в данной работе представлен более углубленный вариант.

В современной литературе по моделированию грызунов метод Монте-Карло применяется

в основном для построения генетических моделей (в нашей работе упоминаются лишь генотипы особей как атрибуты объекта лемминг), например [9, 10].

В работах [11, 12, 13] реализовывался алгоритм случайных блужданий при поиске пищи грызунов, но не введены столкновения особей, оказавшихся в одной ячейке, приводящие к потере их жизнестойкости, что реализуется в настоящей работе. Но работы [12, 13, 14] превосходят нашу работу более детальным моделированием растительного покрова (использованием натуральных данных растительности, качества корма, нескольких видов растительности, пространственно-временной неоднородности ландшафта и др.).

Данная работа описывает результаты изучения математической модели популяции животных, изменения ее количественных показателей со временем, в первую очередь динамику численности. Модель называется индивидуально-ориентированной и относится к классу имитационного моделирования.

Объектно-ориентированное программирование представляет организмы как дискретные объекты, свойства которых представлены как атрибуты, а поведение как методы. В настоящей работе реализуется моделирование дискретных событий, модель представляет собой систему, состоящую из организмов и растительного покрова. Организмы представлены как мобильные объекты, ландшафт сформирован трехмерными сетками ячеек.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматривается некая абстрактная территория – среда обитания популяции, разбитая на зоны – $M \times N$ ячеек. У каждой особи есть набор характеристик: пол, возраст, координаты на территории и дополнительное число, изменяющееся от 0 до 1 (0 – особь считается погибшей и удаляется из рассмотрения, 1 – наилучшее состояние), обозначающее состояние здоровья индивидуума и называемое в дальнейшем потенциалом жизнестойкости (ПЖ).

Работа модели происходит по итерациям, на каждой из которых особь может выполнить одно из определенных действий: движение, борьба с другими особями, прием пищи, отдых, размножение и другие.

Копытные лемминги примечательны тем, что у них постоянно происходят стычки друг с другом, в результате чего средний потенциал жизнестойкости сильно зависит от динамики численности. Также, согласно зарегистрированным данным, особям присущи циклы динамики численности периодом в три-четыре года. Фазы цикла условно называются: депрессией, нарастанием и пиком численности. Основная задача данной работы – подобрать такие параметры модели (разме-

ры территории, начальное количество особей, снижение ПЖ за одну стычку, параметры размножения и другие, всего около 20), при которых получались стабильные циклы в несколько лет и совпадение с зарегистрированными данными.

Условно, после некоторого количества итераций, считается, что в расчетной модели прошел один день. Весь год разделен на несколько частей по разным категориям. Период размножения: февраль - август. В вегетативный период начинают восполняться ресурсы, пригодные для пищи (июнь - август).

Все особи действуют согласно общему алгоритму поведения. Сначала они некоторое время двигаются в поисках пищи, при этом участвуя в стычках и размножении (если период размножения), далее возвращаются в нору, где перерабатывают пищу.

Вероятность забеременеть берется из статистических данных. Сезон размножения делится на генерации (перезимовавшие, февраль-март, апрель-май, июнь).

Через определенное время появляется потомство. Оно находится в материнской норе некоторое время. Потом выходит в поисках собственной норы.

На данном этапе особь является неполовозрелой. Должно пройти еще некоторое время, чтобы особь смогла участвовать в размножении.

Гибель особи происходит в одном из следующих случаев: 1) потенциал жизнестойкости меньше нуля, 2) особь достигла предельного возраста, 3) самка принесла третье потомство.

Опишем основной механизм работы алгоритма. Установка параметров модели. Определяются параметры модели и вводятся в программу (описаны ниже). На основе параметров происходит инициализация и начальное распределение объектов в пространстве и подготовка к первой итерации. Далее последовательно выполняются итерации. Эксперимент заканчивается в одном из трех случаев: остановлен пользователем, достигнуто максимальное количество выполненных итераций, популяция вымирает.

Опишем объекты модели: ячейка, лемминг, нора, растительность.

Объект ячейка. Имеет координаты. В одной ячейке может находиться любое количество леммингов. Также в ней есть (или нет) некоторый уровень насыщения ячейки кормом. Может иметь одну нору.

Объект нора. Имеет координаты. Нора может быть занята одной особью. Переменные объекта: координаты норы, нора занята / не занята особью.

Объект растительность. Переменные объекта: начальное количество корма в ячейке; насыщенность ячейки растительностью (для каждой ячейки задается уровень насыщения растительностью, он изменяется от 0 (нет корма) до 1 (максимальный уровень корма)); наличие

растительности в ячейке; восстановление количества корма (на каждой итерации во время вегетативного периода корм увеличивается в каждой ячейке на указанную величину); снижение количества корма (когда особь начинает потреблять корм в некоторой ячейке, то уровень насыщения растительностью в ней снижается на указанную величину); вегетативный период (период восстановления растительности). В одном из вариантов модели, если особь питается, то растительность уменьшается на фиксированное число, со временем линейно растет до максимума, в другом растет экспоненциально, но при выедании не может опускаться ниже некоторого минимума.

Объект лемминг. Переменные объекта: случайная величина (результаты некоторых функции случайны, для их расчета нужна эта переменная); координаты особи; потенциал жизнестойкости (ПЖ); снижение ПЖ от стычек (во время стычки потенциал снижается на указанную величину); восстановление ПЖ (в отсутствие стычек потенциал особи восстанавливается на указанную величину); вероятность беременности (если в период размножения встречаются разнополые особи, то этот параметр определяет вероятность самки забеременеть, может быть задана одним числом или таблицей [15]); среднее число новорожденных; сытость (описывает меру сытости, если особь сыта, то она лучше участвует в стычках, а ПЖ быстрее восстанавливается; напротив, при низкой сытости, ПЖ снижается от голода; изменяется от 0 до 1); снижение показателя сытости (каждую итерацию показатель сытости снижается на указанную величину); восстановление показателя сытости (если особь потребляет корм, то показатель сытости увеличится на указанную величину); передвижение (количество итераций, которое особь тратит на активные действия, прежде чем вернуться в нору на отдых); отдых (количество итераций, которые особь пребывает в норе); новорожденная стадия (сколько дней особь находится в норе после рождения); неполовозрелая стадия (сколько дней у особи есть, чтобы найти себе нору, после истечения срока при наличии норы переходит в половозрелую стадию, иначе умирает); возраст особи; предельный возраст (при достижении его особь умирает от старости); срок беременности (описывает, через сколько дней у беременной особи появится потомство, две недели); интервал между беременностями (две недели); генотип особи; генотип самца (если особь беременна, то эта переменная хранит генотип самца); нора (если есть); переменная, определяющая была ли стычка на текущей итерации; тип лемминга (новорожденная особь, неполовозрелая, половозрелая, беременная, понесла потомство); текущий срок беременности.

Опишем параметры модели: количество итераций в одном дне (время выполнения одной

итерации необходимо соотносить с реальным временем в популяции); начальная дата; количество ячеек в высоту и ширину соответственно; процентное отношение ячеек с норами от всех ячеек; начальное количество леммингов; вегетативный период; начальное количество корма в ячейке; восстановление количества корма; снижение количества корма; снижение ПЖ от стычек; восстановление ПЖ; вероятность беременности; среднее число новорожденных; снижение показателя сытости; восстановление показателя сытости; передвижение; отдых; новорожденная стадия; неполовозрелая стадия; предельный возраст; текущий срок беременности; очередная беременность.

ПОДРОБНЫЙ АЛГОРИТМ РАБОТЫ МОДЕЛИ

Начальное распределение. Начальное время в модели – это период сразу после зимы и пика численности, то есть оптимальный биотоп. В этот период еще не началось размножение, и все особи находятся в половозрелой стадии.

На основе введенных параметров составляется сетка пространства, массивы нор, растительности в ячейках, леммингов. Распределение нор происходит случайно. Лемминги норы не выкапывают, поэтому позиции всех нор фиксированы на протяжении всего эксперимента. Все ячейки заполняются растительностью, указанной в параметрах. Начальные лемминги случайно распределяются норами, собственными координатами, полом и генотипом в равных пропорциях, возрастом в несколько месяцев, потенциалом от 0.5 до 1.

После этого начинается работа основного алгоритма.

Каждая особь может перемещаться в случайном направлении на ячейку по вертикали, горизонтали, диагонали или не двигается. Итого 9 исходов. Куда особь пойдет, определяется следующими факторами:

Если особь находится в новорожденной стадии, то не двигается.

Неполовозрелые особи передвигаются в случайном направлении в поисках норы. Особь ищет в первую очередь именно нору, но если рядом нет других особей и есть рядом растительность, то питается.

У половозрелых особей есть три варианта:

Особь передвигается в случайном направлении в поисках пищи.

После окончания поиска пищи (определяется соответствующим параметром модели) особь двигается по направлению своей норы кратчайшим путем, пока не дойдет.

Особь отдыхает в норе и не двигается.

Беременные самки повторяют алгоритм половозрелой особи. Когда срок беременности подходит к концу, то особь при любых факторах идет к своей норе, чтобы понести потомство.

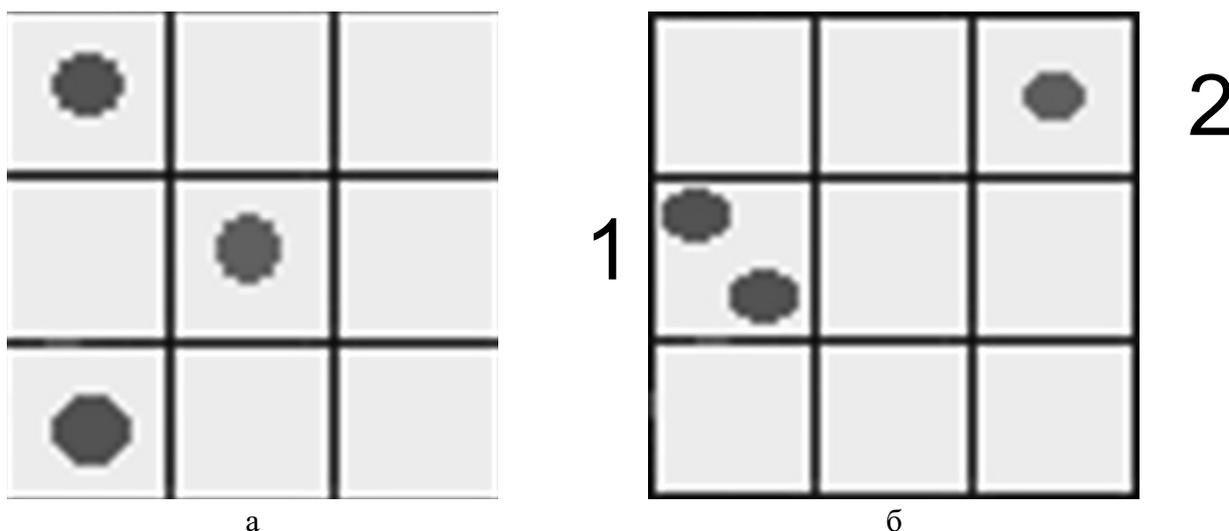


Рис. 1. а) Фаза перемещения. Каждая особь случайно передвигается в соседнюю ячейку; б) В ячейке 1 происходит стычка, так как там 2 особи. В ячейке 2 особь одна, она питается

После окончания первой стадии, каждая особь определяет, что ей делать в новом местоположении:

Если в ячейке находятся более одной однополной особи, то между ними происходит стычка, в результате которой у всех особей снижается ПЖ на соответствующий параметр модели, умноженный на количество особей в ячейке (чем больше особей рядом, тем опаснее, поэтому есть зависимость от количества особей). После каждой такой операции происходит проверка ПЖ на нулевое значение, такие особи считаются мертвыми и удаляются из моделирования. Новорожденные особи и те особи, которые находятся в своей норе, не участвуют в стычках.

Если в ячейке находятся две разнополые половозрелые особи, то в репродуктивный период самка беременеет с вероятностью равной соответствующему параметру модели.

Если в ячейке находится только одна новорожденная особь, то она потребляет корм, находящийся в ячейке, и восстанавливает свою сытость на величину равную соответствующему параметру модели. Количество корма в ячейке снижается на соответствующий параметр модели.

Далее происходит перерасчет оставшихся переменных модели. Увеличивается возраст каждой особи, снижается сытость, снижается ПЖ при низкой сытости, происходит проверка на смерть от голода или возраста, увеличивается срок беременности для беременных особей (если особь понесла потомство, то увеличивается переменная, которая определяет, когда особь сможет опять забеременеть). Происходит проверка достижения возраста, чтобы перейти в другую стадию развития (новорожденная особь, неполовозрелая, половозрелая, беременная, понесла потомство). Если беременная особь достигла предельного срока беременности и находится в норе, то несет потомство. Растительность в вегетативный период восстанавливается.

По окончании каждого дня собирается всевозможная статистика, на основе которой строятся всевозможные графики и распределения.

Переход в пункт 1, если не было достигнуто одного из завершающих условий.

На рис. 1 графически представлен пример расчета одного шага модели. Рассмотрены ситуации расположения особей относительно друг друга. На рис. 1,а представлена ситуация, когда в каждой ячейке находится не более одной особи. Здесь не может проходить ни стычек, ни взаимодействия самцов и самок в процессе размножения. На рис. 1,б представлена ситуация, когда в ячейке находятся две особи. В этом случае в зависимости от пола особей возможна ситуация стычки или спаривания. В конце каждой итерации происходит пересчет всех переменных.

На рис. 2 представлено распределение леммингов и нор в пространстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе подбора параметров модели удалось получить трёхлетние циклы динамики численности. На рис. 3 представлен пример трехлетнего цикла динамики численности. Имеет место нарастание в сезон размножения и спад численности в период перезимовки. В фазе депрессии идет постепенное увеличение численности (в каждом из периодов). Фаза пика имеет резкие отличия. Происходит нарастание в период размножения. При этом возможно достижение максимальной численности в середине лета с последующим уменьшением. Во время перезимовки после пика численности наблюдается резкое снижение численности популяции и затем осуществляется переход в фазу депрессии.

Ключевой особенностью индивидуального моделирования является возможность проанализировать модель по различным срезам данных: рождение, смертность,

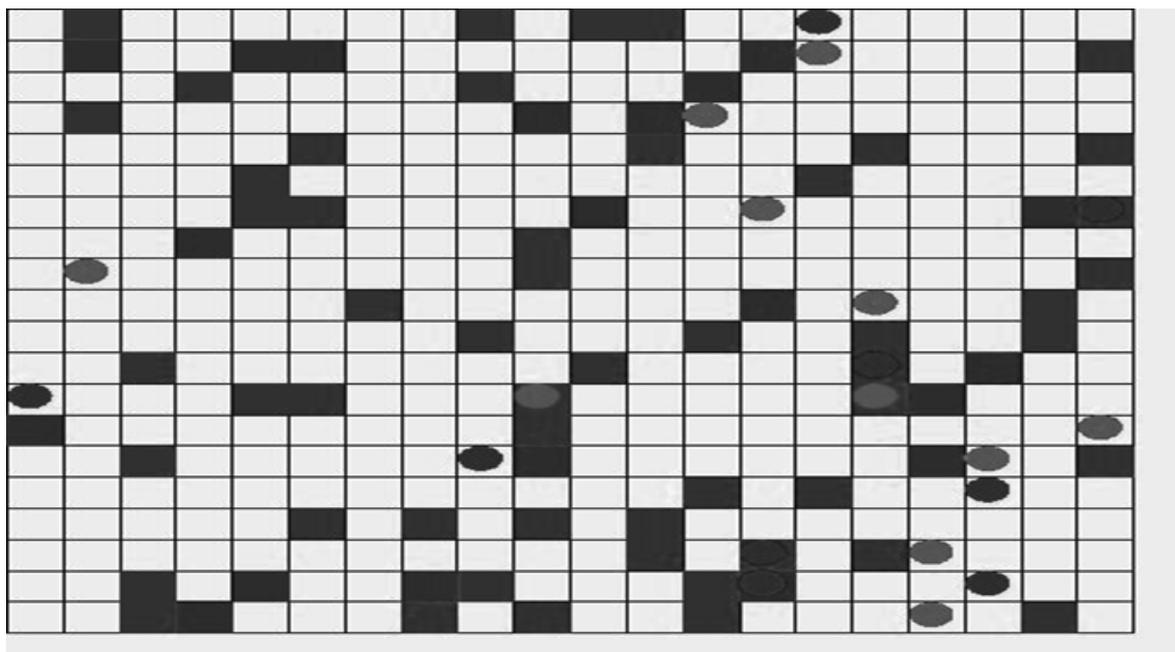


Рис. 2. Распределение объектов в пространстве (квадрат – нора, круг – особь)

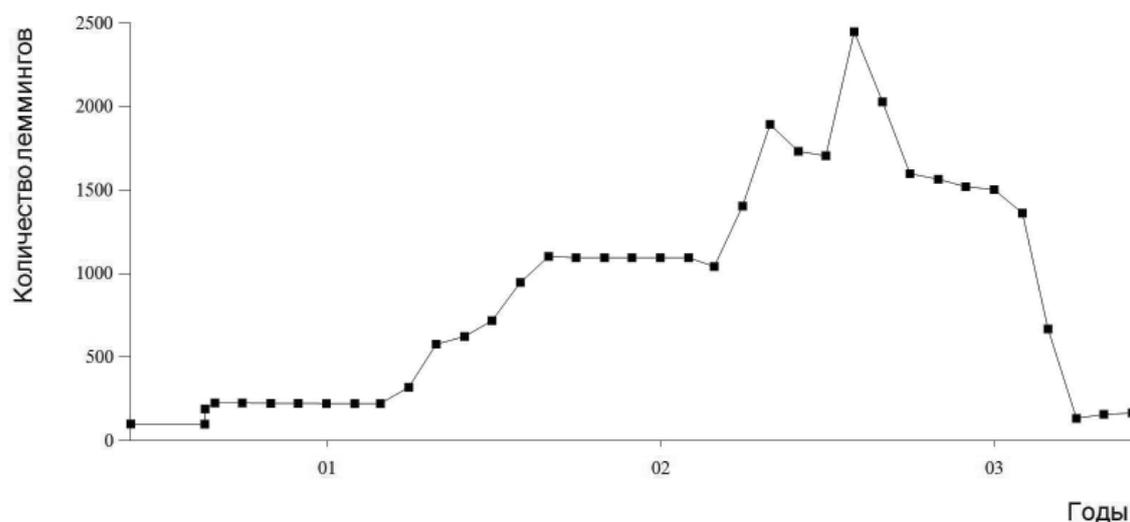


Рис. 3. Динамика численности за три года

влияние стычек и голода на популяцию, средний возраст, средний ПЖ, влияние болезней и т. д. Это позволяет выявить главные характеристики популяции, которые больше всего влияют на динамику численности.

На рис. 4 на график изменения численности наложен график, отображающий средний ПЖ. Из этого графика видно, что достигается максимум ПЖ (в момент окончания фазы нарастания), затем происходит спад показателя, и локальный максимум отмечен в фазу пика, он примерно совпадает с наступлением пика численности популяции. Затем наблюдается резкий спад до минимума (в момент окончания перезимовки) и очередной подъем показателя в фазе депрессии.

На рис. 5 приведено сравнение динамики численности леммингов, самцов и самок. Как видно из рисунка, динамика сильно не отличается.

На рис. 6 показана динамика численности особей различных стадий развития. Из этого рисунка видно, что неполовозрелых мало. В тоже время динамика слепых и половозрелых выражено отчетливо. Имеет место следующий факт, что, когда у половозрелых наблюдается локальный максимум, численность неполовозрелых имеет локальный минимум и наоборот, когда численность неполовозрелых имеет локальный максимум, численность половозрелых имеет локальный минимум. Из этого графика видно, что в период перезимовки все выжившие особи переходят в разряд половозрелых, что совершенно естественно.

На рис. 7 показана динамика численности зараженных особей. Видно, что в пике численности отношение зараженных к общей массе сильно не увеличивается, поэтому при данных параметрах

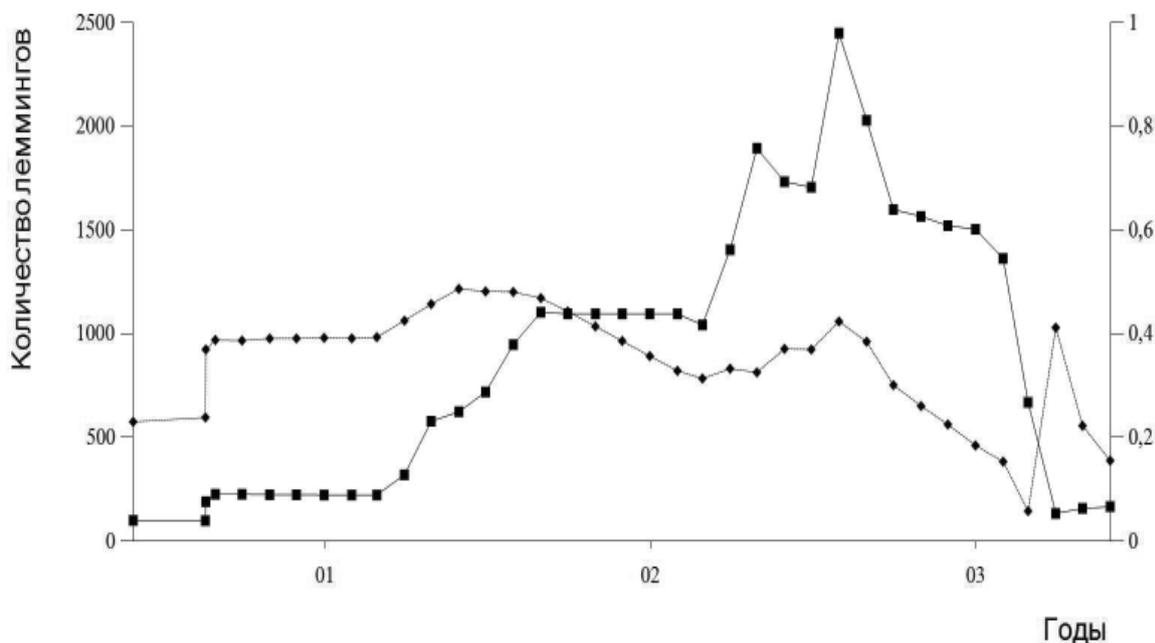


Рис. 4. Динамика численности за три года (квадраты, шкала от 0 до 2500 особей) и средний потенциал жизнестойкости (ромбы, шкала от 0 до 1)

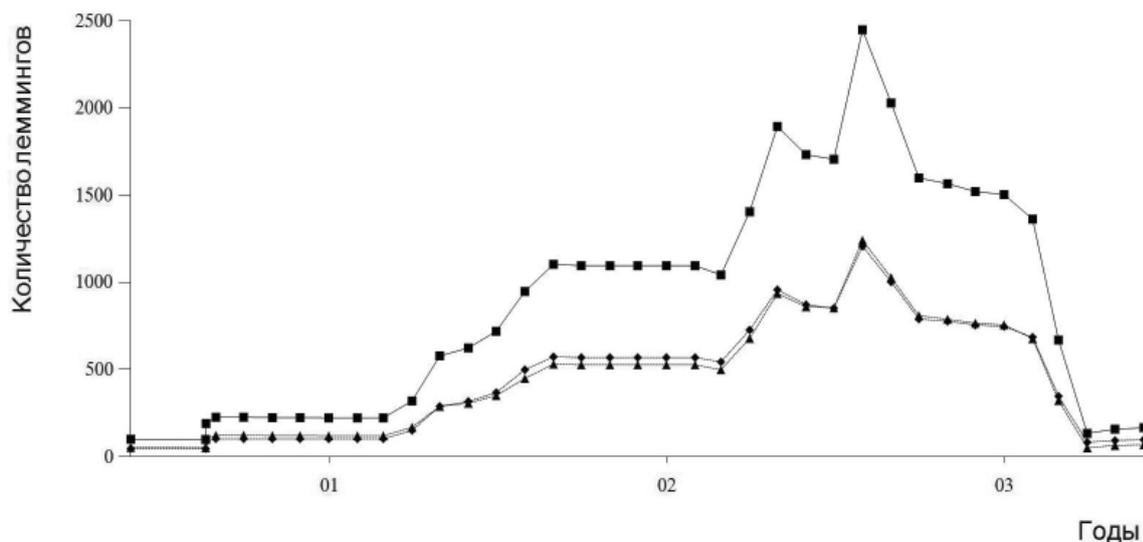


Рис. 5. Динамика численности за три года (квадраты), динамика самцов (ромбы) и самок (треугольники)

модели эпидемии не происходит.

На рис. 8 показано изменение количества особей с различными генотипами. Видно, что оно согласовано с динамикой численности популяции. Из графика следует, что численность особей с генотипом ББ (с повышенной плодовитостью) меняется незначительно, имеет максимум, когда общая численность популяции достигает максимума. Динамика численности особей с генотипом АА и динамика численности особей с генотипом АБ изменятся примерно синхронно до момента, когда численность достигает максимума, и затем начинает снижаться.

На рис. 9 сравниваются графики смертности по различным причинам с графиком динамики

численности. Из графика видно, что от возраста смертность растет постепенно, а от голода резко после пика, в условиях отсутствия пищи.

Рис.10. Динамика численности за три года (квадраты, шкала от 0 до 2500 особей) и средняя доступность корма (ромбы, шкала от 0 до 1)

На рис. 10 сравниваются график динамики численности и график средней доступности корма. Как видно, корм не восстанавливается в зимний период, а восстанавливается в вегетативный. В конце пика численности леммингов корм снижается до минимума.

На рис. 11 представлено сравнение за-

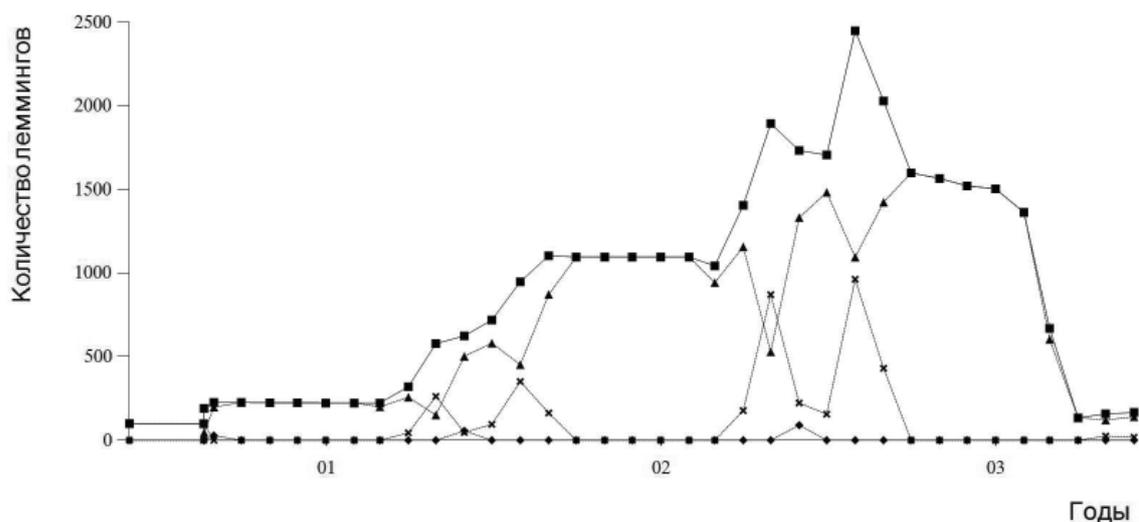


Рис. 6. Динамика численности за три года (квадраты), динамика неполовозрелых особей (кресты), половозрелых (треугольники) и слепых (ромбы)

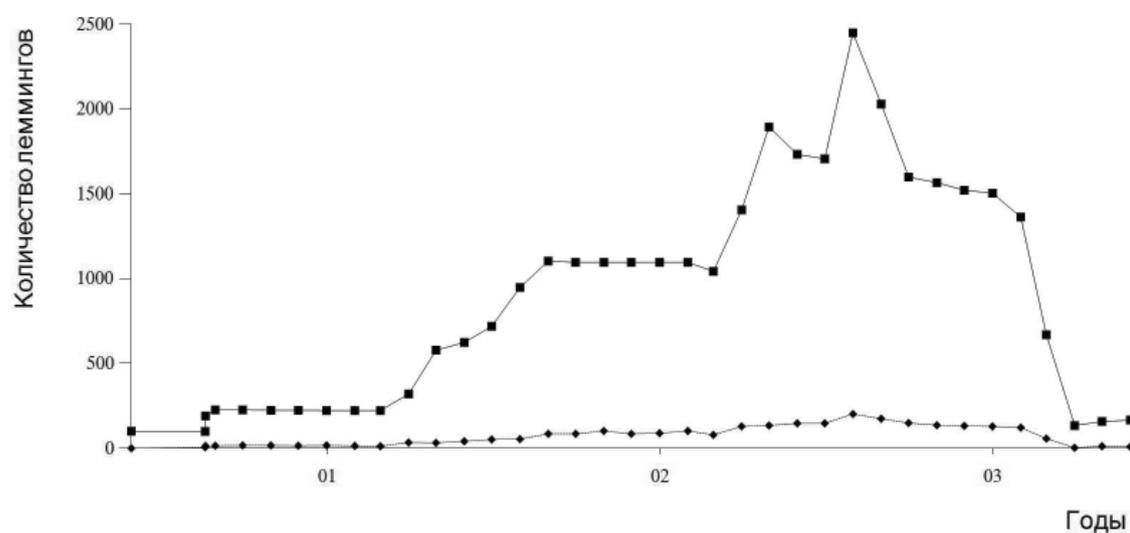


Рис. 7. Динамика численности за три года (квадраты) и динамика больных особей (ромбы)

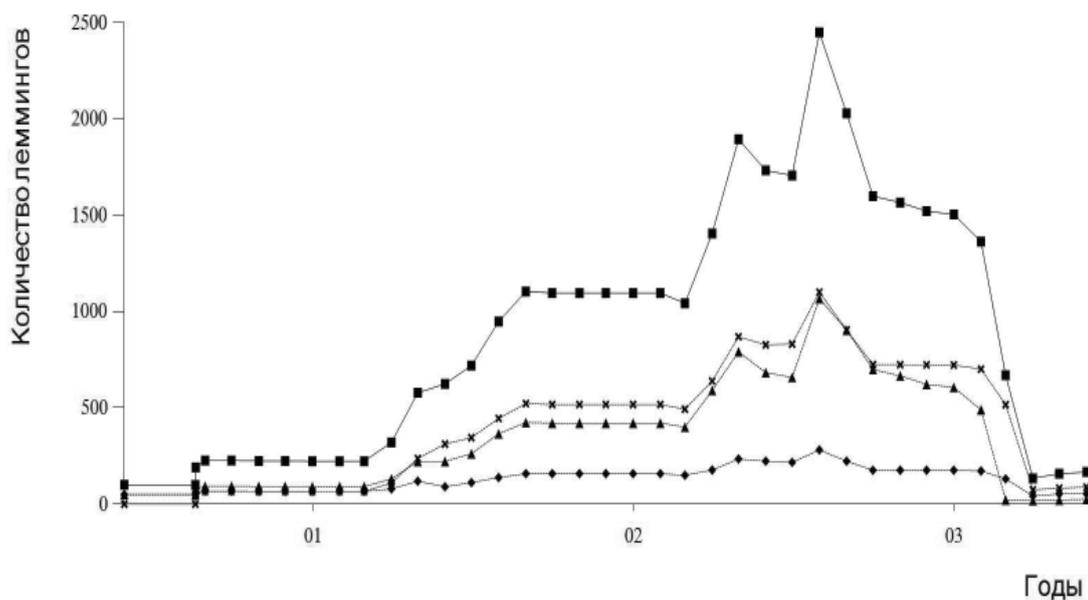


Рис. 8. Динамика численности за три года (квадраты) и динамика генотипов. Генотип "А" – доминантный, большее выживание в стычках, "Б" – повышенная плодовитость. АА (треугольники), АБ (кресты), ББ (ромбы)

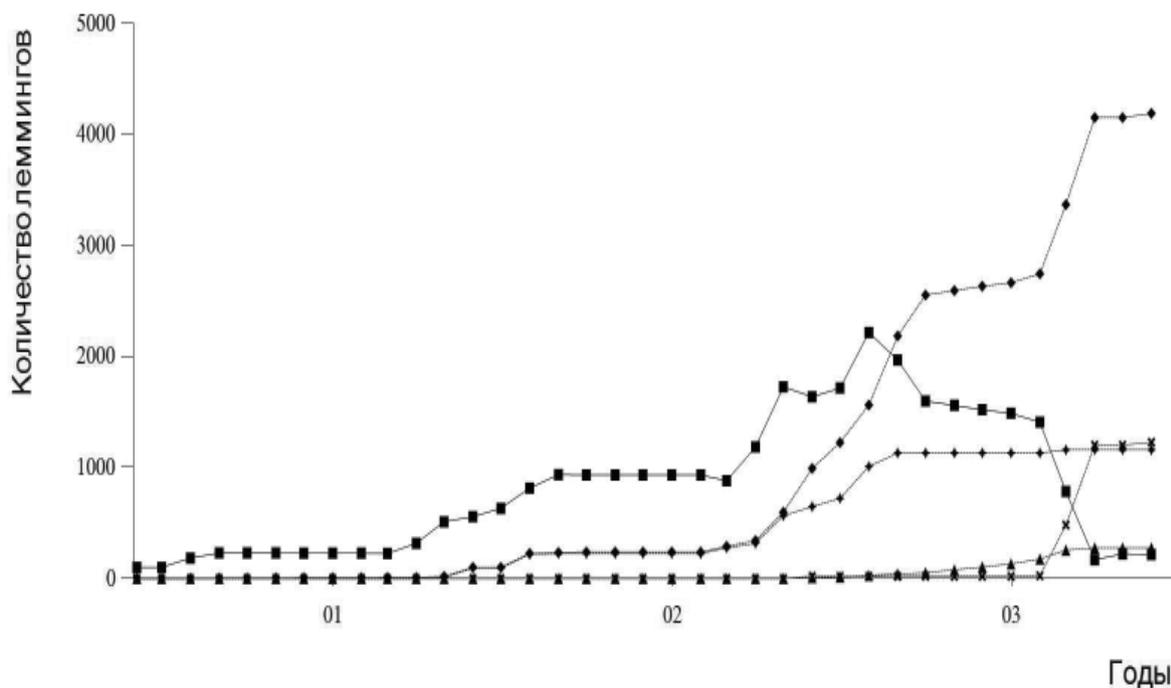


Рис. 9. Динамика численности за три года (квадраты), общая смертность за все время (ромбы), смерть от стычек (треугольники), смерть от голода (кресты), смерть из-за предельного возраста (звезды)

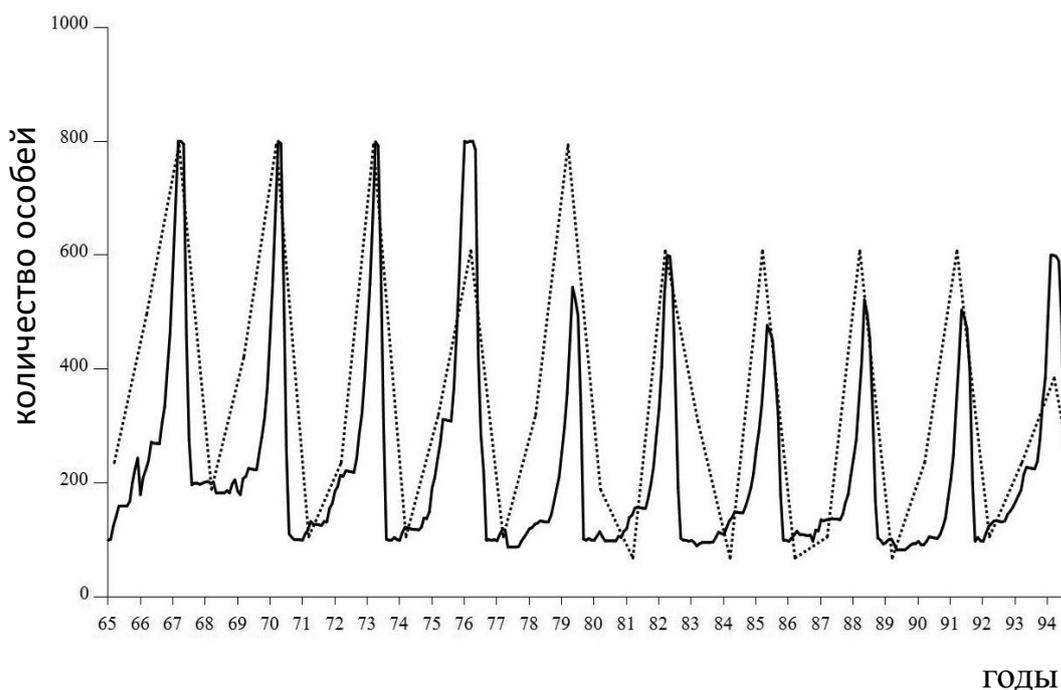


Рис. 11. Динамика численности за длительный промежуток времени. Сплошная линия – динамика из модели. Пунктир – зарегистрированные данные [15]

зарегистрированных данных [15] и результат работы модели.

На рис. 12 показано пространственное распределение доступности корма в разное время. Более темный участок соответствует низкой доступности, более светлый – высокой. Черный цвет – нет растительности.

Во время депрессии (начальная стадия) особей мало и происходит рост популяции. С течением

времени особей становится больше, плотность повышается, а значит и количество стычек, сумма которых влияет на средний ПЖ. В некоторый момент растительность, пригодная для пищи, не успевает восполниться за вегетативный период, и при большом количестве стычек происходит резкая смертность популяции, после которой остается небольшое количество особей. И популяция возвращается в начальную фазу депрессии. Потом все опять повторяется.

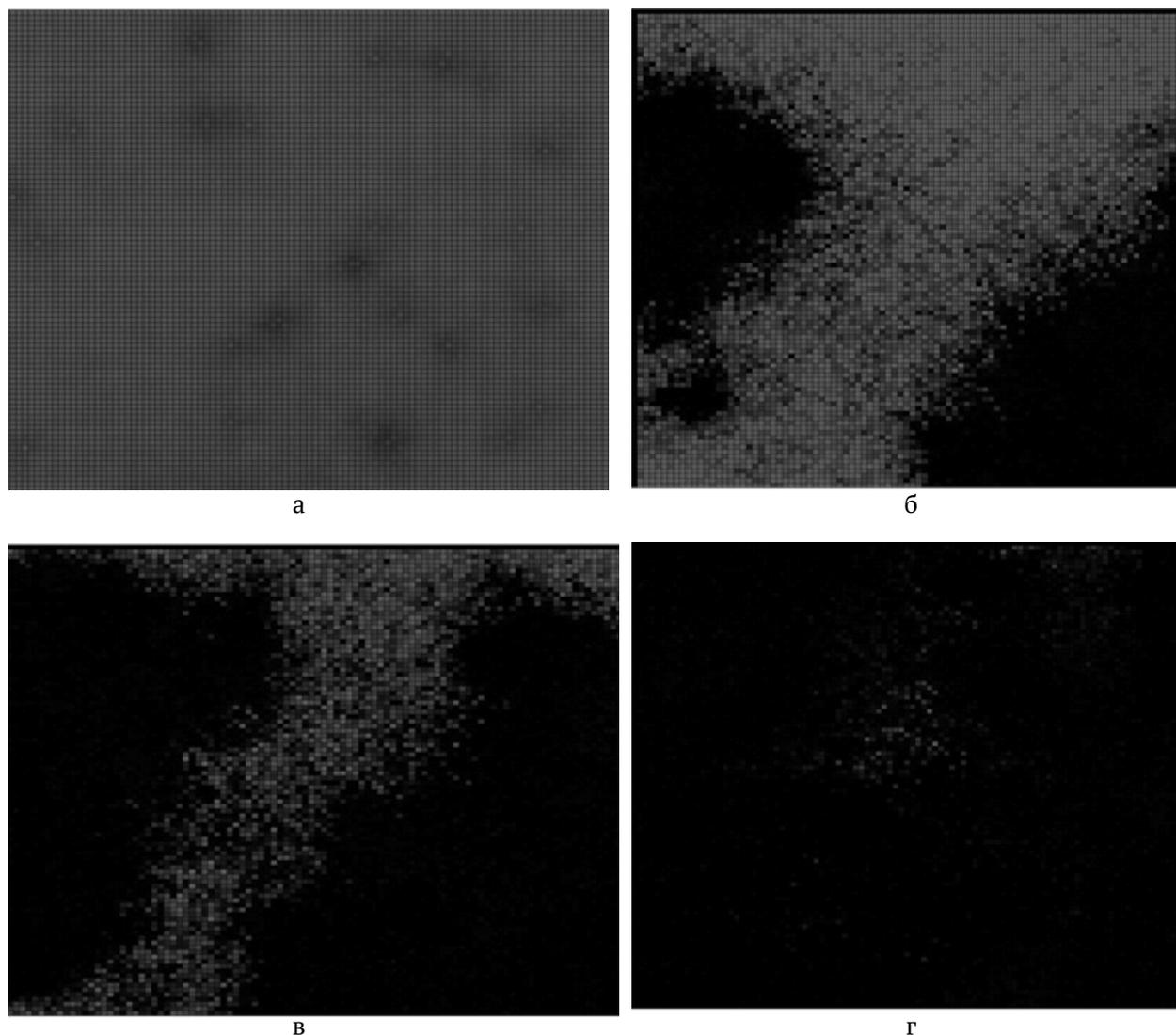


Рис. 12. Пространственное распределение биомассы растительности:
а) начальное распределение, б) нарастание, в) пик, г) депрессия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена модель динамики численности леммингов и найдены параметры, при которых появляются стабильные трехлетние циклы динамики численности. Были получены результаты, хорошо совпадающие с зарегистрированными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саранча Д.А. Количественные методы в экологии. Биофизические аспекты и математическое моделирование. - М.: МФТИ, 1996. - 251 с.
2. Бибик Ю.В., Попов С.П., Саранча Д.А. Неавтономные математические модели экологических систем. - М.: ВЦ РАН, 2004. - 120 с.
3. Саранча Д.А., Сорокин П.А., Фролова А.А. Математическое моделирование динамики численности популяций животных. - М.: ВЦ РАН, 2005. - 27 с.
4. Глушков В.Н., Недоступов Э.В., Саранча Д.А., Юферова И.В. Компьютерные методы анализа математических моделей экологических систем. - М.: ВЦ РАН, 2006. - 74 с.
5. Saranča D.A. Mathematical modeling of tundra communications and populations // Systems analysis and simulation. Math. Res. -1985. -Vol. 27. -P. 377-379.
6. Глушков В.Н., Саранча Д.А. Комплексный метод математического моделирования биологических объектов // Автоматика и телемеханика. -2013. -№2. С. 94-108.
7. Перминов В. Д., Саранча Д. А. Об одном подходе к решению задач популяционной экологии // Математическое моделирование. -2003. - №11. -С.45-53.
8. Bird G. A. Molecular gas dynamics. - Oxford: Clarendon Press, 1976. -78 p.
9. Ojeda A. A., Novillo A., Ojeda R. A., Roig-Juñent S. Geographical distribution and ecological diversification of South American octodontid rodents // Journal of Zoology. -2013. -Vol. 289. - P. 285-293.
10. Horvilleur B. and Lartillot N. Monte Carlo algorithms for Brownian phylogenetic models // Phylogenetics. -2014. -Vol. 30. -№. 21. -P. 3020-3028.
11. Amori G., Luiselli L. Null model analyses of small mammal community structure in tropical islands // Tropical Ecology. -2013. -Vol. 54. -№. 1. -P. 23-31.
12. Loos M., Ragas A.M.J., Plasmeijer R., Schipper A. M., Hendriks A. J. Eco-SpaCE: An object-oriented,

- spatially explicit model to assess the risk of multiple environmental stressors on terrestrial vertebrate populations // *Science of the Total Environment*. -2010. -Vol. 408. -P. 3908-3917.
13. Liu C., Sibly R. M., Grimm V., Thorbek P. Linking pesticide exposure and spatial dynamics: An individual-based model of wood mouse (*Apodemus sylvaticus*) populations in agricultural landscapes // *Ecological Modelling*. -2013. -Vol. 248. - P. 92-102.
14. Dalkvist T., Sibly R. M., Topping C.J. Landscape structure mediates the effects of a stressor on field vole populations // *Landscape Ecol.* -2013. -Vol. 28. -P. 1961-1974.
15. Орлов В.А., Саранча Д.А., Шелепова О.А. Математическая модель динамики численности популяции леммингов (*Lemmus Dicrostonyx*) и ее использование для описания популяций Восточного Таймыра // *Экология*. -1986. -№2. -С. 43-51.

ABOUT ONE OPTION OF INDIVIDUAL-BASED MODEL FOR POPULATION OF LEMMINGS

© 2015 O. P. Lyulyakin, D. A. Sarancha, Yu. S. Yurezanskaya

Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow

On the basis of numerical modeling by means of the Monte-Carlo method used earlier in model of gas dynamics the individual-based model of interaction of hoofed lemmings (*Dicrostonyx torquatus chionopyes*) with a fodder resource is designed. Parameters at which there are stable three-year cycles of dynamics for number of lemmings are found. Good coincidence to natural data is received.

Keywords: method of random walks, models with seasonality, genotype, lemmings, imitating modeling.

Oleg Lyulyakin, Engineer-Researcher.

E-mail: oleg217@yandex.ru

Dmitry Sarancha, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: saran@ccas.ru

Yulia Yurezanskaya, Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Research Fellow. E-mail: july@ccas.ru