

УДК: 519.8

Модификация модели роста грибов Чантера–Торнли и ее анализ средствами многоподходного имитационного моделирования

В. А. Вигонт^{1,a}, Е. С. Миронычева^{2,b}, А. Г. Топаж^{3,c}

¹Агрофизический НИИ Россельхозакадемии,

Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

²Государственный таврический агротехнологический университет,

Украина, 72310, г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, д. 18

³Агрофизический НИИ Россельхозакадемии,

Россия, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., д. 14

E-mail: ^a vvigand@gmail.com, ^b l_mironycheva@hotmail.com, ^c alex.topaj@gmail.com

*Получено 15 октября 2014 г.,
после доработки 23 февраля 2015 г.*

Классическая математическая модель выращивания грибов Чантера–Торнли модифицирована и реализована в среде имитационного моделирования AnyLogic с одновременным использованием элементов системной динамики, дискретно-событийного и агентного подхода. Проведено численное исследование построенной модели и решена оптимизационная задача нахождения возраста срезания плодовых тел, обеспечивающего максимальный интегральный урожай грибов по всем «волнам» плодообразования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системная динамика, агентные модели, мицелий, спорофоры, субстрат

Modification of Chanter–Thornley mushroom growth model and its analysis by means of multiapproach simulation

V. A. Vigont¹, E. S. Mironycheva², A. G. Topaj³

¹Agrophysical Research Institute RAAS, 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia

²Tavria State Agrotechnological University, 18, B. Khmelniyskiy pr., Melitopol, 72310, Ukraine

³Agrophysical Research Institute RAAS, 14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220, Russia

Abstract. — Classical Chanter–Thornley model of mushroom growth has been modified and implemented in AnyLogic simulation environment by means of system dynamics, discrete-event and agent-based approaches. A numerical case study of the model is presented and the problem of optimum age at harvest, providing the maximum integral yield for all fruiting “waves” is solved.

Keywords: simulation, system dynamics, agent modeling, mycelium, sporophores, substrate

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 375–385 (Russian).

Введение

Роль математического имитационного моделирования в современных научных исследованиях возрастает с каждым годом. Основной целью моделирования является численное исследование описываемых моделью объектов и процессов, а также предсказание результатов будущих наблюдений в натурном опыте. Методология компьютерного эксперимента проникает в самые разные области науки, не только в технические или естественные, но и гуманитарные; с помощью современных математических моделей исследуются социальные явления, такие, например, как формирование в обществе остракизма [Kim, 2014] и конформизма [Краснощеков, 1988], или влияние изменений климата на распространение малярии [Caminade et al., 2014]. Неотрывно связано с математическим моделированием изучение биологических и экологических явлений. Например, в последние годы появилось множество моделей, описывающих рост раковых опухолей [Wang et al., 2014] и ионный гомеостаз в нейронах [Hubel, Scholl, Dahlem, 2014].

В процессе создания имитационной модели как готового инструмента исследования любого изучаемого явления можно выделить три последовательных этапа. Во-первых, это создание математической модели как таковой — формализация определяющих причинно-следственных связей и взаимодействий в изучаемой системе на языке математических соотношений, то есть с использованием стандартной математической нотации. Второй этап — алгоритмизация, то есть перевод модели с языка формул на язык алгоритмов — выбор методов численного решения алгебраических или дифференциальных уравнений, временного шага и способа численного интегрирования динамической системы, замена непрерывных отображений дискретными разностными схемами и так далее. И наконец, последний этап — реализация модели на компьютере.

Научное творчество в чистом виде присутствует в основном на первом этапе моделирования — именно здесь в наибольшей мере проявляется фантазия автора модели, а также требуется серьезная эрудиция и квалификация в изучаемой предметной области. Вторая и тем более третья стадии (программирование) представляют собой в большей степени рутинную ремесленную работу. Тем не менее, именно на алгоритмизацию и программирование тратится, как правило, львиная доля времени, требующегося на разработку модели, и именно технические ошибки, допускаемые на этих этапах, оказываются наиболее критичными и трудноисправимыми. Последнее объяснимо, авторами модели, как правило, являются специалисты в предметной области, реже — математики, но практически никогда — специалисты в области современных информационных технологий. Естественно, при создании своих моделей они уделяют большее внимание написанию формул, нежели вопросам проектирования оптимальной структуры информационной системы. В результате программная реализация, то есть написание кода, остается слабым звеном процесса разработки имитационных моделей.

В этих условиях крайне привлекательной выглядит идея отказа от написания программного кода «с нуля» и использования в качестве инструмента для создания моделей нового поколения того или иного готового высокоуровневого движка имитационного моделирования. Основная выгода этого подхода видится в избавлении разработчиков от погружения в детали алгоритмической реализации конкретных процессов. Вместо этого они могут сконцентрироваться на описании природы изучаемых явлений в более «естественном» виде, то есть, например, в виде, максимально приближенном к традиционной математической нотации.

Конечно, переход от низкоуровневого программирования к разработке моделей в «чужих» внешних средах требует преодоления серьезного психологического барьера. Кажется, что делегирование многих функций закрытому для модификации внутреннему движку высокоуровневой системы имитационного моделирования увеличивает вероятность утраты контроля над поведением модели. Кроме того, присутствует опасение, достаточен ли предоставляемый внешними решениями функционал для реализации всех алгоритмических «фантазий» автора. До недавнего

времени эти сомнения выглядели действительно оправданными. Однако сегодня уровень функциональности актуальных версий наиболее продвинутых решений в этой области таков, что может удовлетворить самые широкие претензии потенциальных пользователей. Современный рынок предлагает большое количество профессиональных систем имитационного моделирования (PowerSim, NetLogo, ModelMaker, AnyLogic и прочие), и примеры законченных успешных разработок моделей сложных экологических систем полностью в рамках выбранной высокоуровневой среды уже существуют [Muller, 1999; Grimm et al., 2005; Grimm et al., 2006; Railsback, Grimm, 2012].

Одним из наиболее мощных и распространенных инструментов для создания имитационных моделей является система отечественной разработки AnyLogic. Уникальной особенностью данного продукта выступает объединение в рамках единой платформы всех трех наиболее распространенных парадигм моделирования: дискретно-событийного (процессного) подхода, агентного моделирования и системной динамики. Несмотря на исключительную гибкость и мощность данной среды моделирования, позволяющей безгранично расширять функциональность модели, в том числе и за счет «ручного» кодирования на Java, число публикаций, демонстрирующих созданные в AnyLogic модели в области биологии и экологии, пока минимально. Так, одна из наиболее репрезентативных биологических баз публикаций Pubmed по запросу «AnyLogic» выдает единственную публикацию [Day et al., 2013]. Вместе с тем представляется, что заложенная в нее функциональность предоставляет разработчику модели множество возможностей как в плане абстрагирования от деталей алгоритмической реализации стандартных динамических процессов, так и в плане всестороннего анализа и исследования готовой модели.

Данная статья преследует двоякую цель. С одной стороны, она призывает обратить внимание на преимущество использования внешних средств моделирования, позволяющих сосредоточиться на описании модели в виде, приближенном к традиционной математической нотации, и освобождающих автора от сложного, требующего высокой квалификации и глубоких знаний в математике и программировании, однако в большинстве случаев рутинного процесса программной реализации модели. С другой стороны, нами сделана попытка продемонстрировать на примере AnyLogic перспективы использования мультипарадигменного метода, то есть «смешения» в рамках единой модели разных техник моделирования — непрерывного системно-динамического описания, дискретно-событийного подхода и агентной методологии.

Появление таких современных мультипарадигменных модельных сред, как, например, AnyLogic, дает возможность пересмотреть многие классические модели. В качестве «полигона» мы реализовали в этой системе соответствующим образом модифицированную математическую модель роста мицелия и спорофоров грибов, взяв за основу классическую работу Чантера и Торнли, опубликованную еще в 1978 г. [Chanter, Thornley, 1978]. Еще одной целью было желание продемонстрировать возможности встроенных в AnyLogic механизмов для анализа реализованной модели (параметрическая идентификация, анализ чувствительности к параметрам и начальным условиям, оптимизация и тому подобное). В частности, этому посвящена часть данной работы, в которой мы средствами AnyLogic (анализ чувствительности) нашли оптимальное значение возраста срезаемого гриба для максимизации суммарного получаемого урожая.

Материалы и методы

Для начала опишем составляющие модель процессы так, как это сделано в оригинальной работе Чантера и Торнли. Прежде всего модель описывает распределение потоков питательного субстрата, на котором осуществляется выращивание грибов. Это распределение осуществляется между так называемым компостом (емкость фиксированного и постоянного объема V_c , на которой осуществляется выращивание грибов), мицелием (грибницей) и плодовыми телами гриба (спорофорами). В начальный момент времени спорофоров нет и заданы начальные

значения S_{c_g} и S_{m_g} для содержания (массы) субстрата в компосте и в мицелии соответственно (таблица начальных значений и величин всех постоянных параметров модели приведена в начале цитируемой статьи [Chanter, Thornley, 1978]).

Субстрат переходит из компоста в мицелий с потоком U_c согласно формуле

$$\frac{dS_{c_g}}{dt} = -U_c. \quad (1)$$

Поток U_c выражается в форме закона Фика, то есть полагается пропорциональным разности концентраций субстрата в компосте и мицелии. Более точно формула (1) переписывается в виде

$$\frac{dS_{c_g}}{dt} = -ZW_m(US_c - S_m), \quad (2)$$

где W_m — сухой вес мицелия, S_c и S_m — концентрации субстрата в компосте и в мицелии соответственно (вычисляемые как отношение соответствующих абсолютных содержаний к физическому объему компартментов), Z — константа пропорциональности, а U — фактор, выражающий максимально достижимое отношение плотностей субстрата S_m/S_c . Детальное обоснование вывода формулы (2) приводится в оригинальной статье.

В мицелий субстрат втекает с потоком U_c и вытекает из него с двумя потоками U_m и U_s , первый из которых связан с затратами субстрата на рост и поддержание жизни мицелия, а второй отвечает затратам на рост и поддержание вегетирующих на мицелии плодовых тел (спорофоров).

$$\frac{dS_{m_g}}{dt} = U_c - U_m - U_s. \quad (3)$$

Поток U_m складывается из двух слагаемых (4). Первое из них описывает рост мицелиального компонента, а второе — затраты на поддержание жизнедеятельности мицелия (в основном на дыхание).

$$U_m = \frac{qW_mS_m \frac{A-W_m}{A}}{Y_{G_m}} + M_mW_m, \quad (4)$$

где q представляет собой коэффициент пропорциональности в формуле роста мицелия, A — максимально достижимую величину для сухого веса мицелия, Y_{G_m} — эффективность роста мицелия, а M_m — коэффициент поддержания жизнедеятельности мицелия. Числитель первого слагаемого в формуле (4) одновременно представляет собой величину $\frac{dW_m}{dt}$ — интенсивность роста, то есть приращения сухой биомассы мицелия.

Определение потока субстрата U_s требует введения в модель понятия спорофора или плодового тела гриба. Именно в выборе способа его описания заключается основная модификация исходной модели, произведенная нами с использованием возможностей среды AnyLogic. А именно, в оригинальной модели все плодовые тела были представлены в форме единого функционального компартмента. Однако поскольку и скорость роста конкретного гриба, и требующийся ему ресурс роста в единицах субстрата принимались зависящими от его возраста и величины, то и соответствующие характеристики интегрального компартмента выражались не в виде скалярных величин, а в виде непрерывных распределений. При этом математическим аппаратом, описывающим динамику инициации и роста всех спорофоров, оказывались интегральные уравнения, для решения которых авторы применяли специальные численные методы. Побочным эффектом подобной формализации в исходной модели выступал тот факт, что общее число спорофоров оказывалось по природе такой же характеристикой состояния компартмента, то есть

выражалось величиной вещественного типа, а не целым числом, что соответствует здравому смыслу.

В рамках мультипарадигменного подхода, реализованного в среде AnyLogic, оказывается возможным избежать такого неестественного способа описания и представить в рамках единой модели множество плодовых тел «как есть», то есть как конечное счетное множество индивидуальных объектов одинаковой природы. При этом в каждый момент времени совокупность всех сгенерированных спорофоров представляет собой набор «агентов», параметры состояния и законы поведения которых определены единожды в порождающем классе Mushroom. Каждый из этих агентов нуждается в потоке субстрата из общего пула (мицелия) для своего роста и поддержания жизни. А для определения общего сухого веса спорофоров или текущей потребности их в субстрате мы не решаем интегральное уравнение, а просто суммируем сухие веса спорофоров по всему массиву сгенерированных и вегетирующих в текущий момент агентов. Таким образом, в нашей модели совмещаются традиционное системно-динамическое описание (системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающие динамику вещественных переменных состояния в непрерывном времени) и агентный подход.

Заметим, что агентное моделирование, то есть описание сложной системы путем разбиения ее на множество индивидуально обособленных и взаимодействующих между собой элементарных составных частей, требует, конечно, на порядок больших вычислительных ресурсов, нежели альтернативные «интегральные» подходы. Так как в этом случае при расчете в движке моделирования производится имитация динамического поведения каждого агента, составляющего систему. Зато подобный аналитический метод для широкого класса задач наиболее полно соответствует реальной картине изучаемого процесса. Более того, с его помощью зачастую удается путем усреднения и/или суммирования характеристик по популяции агентов получать законы поведения целостной системы, то есть естественным образом переходить с микро- на макроуровень описания.

С учетом того, что субстрат расходуется на рост и поддержание жизнедеятельности спорофора, интегральный поток субстрата из мицелия в спорофоры U_s может быть определен как

$$U_s = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{Y_{G_s}} \frac{dW_s^i}{dt} + M_s W_s^i \right), \quad (5)$$

где N — текущее количество вегетирующих спорофоров, Y_{G_s} — коэффициент эффективности роста спорофоров (выход сухой массы плодового тела в расчете на грамм потребленного субстрата), M_s — коэффициент поддержания жизнедеятельности спорофоров, а $\frac{dW_s^i}{dt}$ — интенсивность роста единичного спорофора.

Рост спорофора, как и в оригинальной модели, описывается согласно уравнению роста гомпертцовского типа:

$$\frac{dW_s}{dt} = a \frac{S_m}{1 + hS_m} W_s \exp^{-kAge}, \quad (6)$$

где W_s — это текущий сухой вес спорофора (его начальное значение в момент инициации в рамках исходной модели полагается равным 0.1 грамму), a , h и k — параметры кривой роста спорофора, а Age — возраст спорофора (время, прошедшее от момента инициации).

Последние два вопроса, которые необходимо решить для замыкания модели, — это описание процессов начала и конца жизни плодовых тел грибов (спорофоров), иными словами определение правил инициации нового и срезания созревшего гриба. В статье Чантера и Торнли инициация спорофоров происходила тогда, когда концентрация субстрата в мицелии S_m достигала некоего критического значения S_m^{crit} . Эта же гипотеза используется и в модифицированной

нами модели. Однако в исходном варианте инициация новых спорофоров представляла собой непрерывный процесс, постоянно увеличивавший вещественную переменную состояния «число спорофоров» с переменной, но известной интенсивностью. В рамках дискретного, а конкретнее агентного, подхода необходимо подменить непрерывную генерацию новых спорофоров на дискретный случайный процесс. Мы использовали для этой цели третью компоненту мультипарадигменного подхода AnyLogic — дискретно-событийное моделирование, одновременно введя в модель стохастическую составляющую.

В нашем случае генерация новых спорофоров при соблюдении достижения критической плотности субстрата в мицелии представляет собой поток случайных событий пуассоновского типа с интенсивностью *InitiationRate*:

$$InitiationRate = \begin{cases} \lambda(S_m - S_m^{crit}), & S_m > S_m^{crit}, \\ 0, & S_m \leq S_m^{crit}, \end{cases} \quad (7)$$

где λ — коэффициент пропорциональности.

Действием, происходящим при наступлении единичного события, поток которых описывается случайным процессом (7), является генерация нового единичного объекта класса *Mushroom* (спорофора), который в дальнейшем будет жить своей отдельной модельной жизнью.

Вопросы «сбора урожая», то есть модельный алгоритм «срезания» созревших плодовых тел подробно рассматривается в следующей статье Чантера [Chanter, 1979]. Эта часть модели была воспроизведена нами практически без изменений. В состав характеристик состояния спорофора вводится логическая переменная *Matured*, показывающая, считается ли данный спорофор спелым и готовым к срезанию. Способ ее вычисления может варьироваться в зависимости от исследуемого варианта модели. Так, в простейшем случае:

$$Matured = \begin{cases} 1, & Age > AgeOfMaturing, \\ 0, & Age \leq AgeOfMaturing, \end{cases} \quad (8)$$

то есть спорофор считается готовым к срезанию при достижении определенного возраста *AgeOfMaturing*. Альтернативным вариантом (отражающим, например, факт сложности визуального определения возраста гриба), может быть ориентация не на возраст, а на размер (массу) спорофора:

$$Matured = \begin{cases} 1, & W_s > WeightOfMaturing, \\ 0, & W_s \leq WeightOfMaturing. \end{cases} \quad (9)$$

Далее, в рамках математической модели можно элементарно реализовать триггерную операцию срезания гриба сразу же по достижении им порога спелости. Однако в статье Чантера справедливо замечается, что на практике представляется нецелесообразным устраивать круглосуточные дежурства, для того чтобы срезать грибы в тот момент, как только они достигнут спелости. Поэтому, держа в уме дальнейшие перспективы практического применения данной модели, логика уборки сделана в ней периодической. В начале каждого модельного дня выполняется проверка условия спелости для всех имеющихся спорофоров. Если условие спелости для спорофора выполнено, то он исключается из массива агентов класса *Mushroom* и добавляется в массив «срезанных» грибов класса *HarvestedMushroom*. При этом его потребности роста более не учитываются в уравнениях динамики субстрата, а биомасса на момент уборки используется только для накопления статистики об общем полезном урожае.

Результаты и обсуждение

В настоящем разделе представлены некоторые результаты численного анализа построенной модели, демонстрирующие возможности реализованных в среде AnyLogic средств автоматизации стандартных процедур проведения компьютерного эксперимента. На основании результатов проведенных исследований выявлены «тонкие места» модели и проведена ее дальнейшая модификация.

На рисунке 1 представлены графики, демонстрирующие «волны» генерации спорофоров, происходящие при достижении критической концентрации субстрата в мицелии (рис. 1, а) для значения параметра $AgeOfMaturing = 4.6$ (соответствующая величина указана в статье Чантера [Chanter, 1979] в качестве характерного возраста спелости шампиньонов); а также графики, показывающие динамику роста мицелиального компонента и накопления урожая грибов (рис. 1, б).

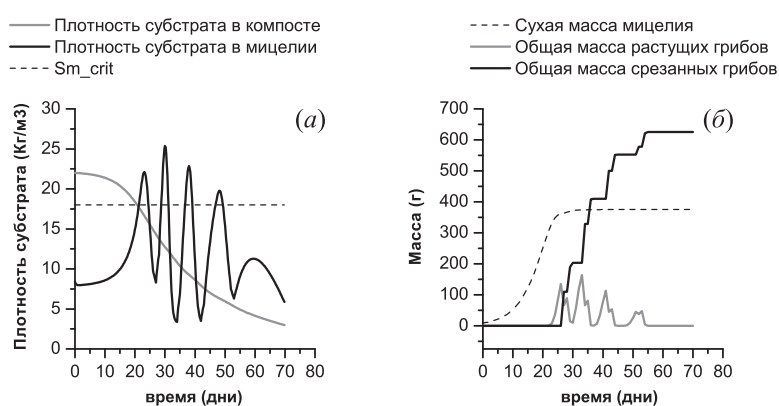


Рис. 1. Динамика переменных состояния на макроуровне описания в модели роста грибов

Отметим два обстоятельства, относящиеся к представленным на рисунке результатам простого имитационного эксперимента. Во-первых, динамика концентраций субстрата в компосте и мицелии и качественно, и количественно практически полностью повторяет соответствующие кривые, полученные при численном исследовании авторами оригинальной модели (см. рис. 1 в статье [Chanter, 1979]). Последнее свидетельствует о близости «интегральной» и «агентной» формализаций процесса инициации и развития спорофоров. Во-вторых, несмотря на присутствие в модели стохастической компоненты (инициация спорофоров описывается случайным потоком событий), то есть на неполную воспроизводимость компьютерного эксперимента, кривые интегральных показателей динамики рассматриваемой системы (концентрации субстрата в мицелии и компосте) сохраняют свой вид практически неизменным для независимых прогонов модели. Иными словами, несмотря на то, что количество спорофоров заметно варьируется (от 640 до 680 штук) при различных прогонах модели, макрохарактеристики системы остаются практически неизменными. Отчасти это объясняется логистическим ограничением на кривую роста, которая одинакова для всех плодовых тел. Однако эффект постоянства интегральных характеристик при различных последовательных запусках модели сохраняется в том числе для вариантов расчета с ранним срезанием спорофоров, когда их кривая роста не успевает выйти на плато. Здесь скорее можно говорить о проявлении «буферного» характера статистического закона больших чисел.

Дополнительным преимуществом использования внешних инструментов имитационного моделирования выступает возможность использования встроенных в них стандартных механизмов исследования динамических моделей: анализа чувствительности, оптимизации, параметрической идентификации и так далее. В частности, в рамках изучаемой модели роста грибов мож-

но поставить и решить задачу нахождения оптимального значения параметра *AgeOfMaturing* — возраста грибов, при котором следует осуществлять их уборку для достижения наибольшего интегрального урожая (то есть суммарного для всех полученных «волн» спелости выхода биомассы плодовых тел).

Однако попытка непосредственного осуществления подобного прямого оптимизационного эксперимента над построенной моделью приводит к неожиданным, хотя и объяснимым результатам. Оказывается, что формальный максимум интегральной урожайности достигается при значении *AgeOfMaturing*, равном нулю, то есть при немедленном срезании новообразованных спорофоров. Простой анализ объясняет полученный краевой эффект. Действительно, в модели роста единичного гриба (6) начальная масса инициированного спорофора полагается равной постоянному значению $W_{s_0} = 0.1$. Это отвечает случаю, когда на производство «точки роста» спорофора в нашей модели не требуется ни времени, ни ресурсов субстрата. Она образуется как бы ниоткуда, и поэтому мгновенное срезание новообразованных спорофоров позволяет максимизировать урожай за счет практически неограниченного накопления этой малой, но зато «бесплатной» биомассы. Заметим, что вопрос задания начальных значений в моделях экспоненциального или логистического характера является типичной «головной болью» разработчиков моделей биологических систем. Так как положить ее равной нулю не позволяет выбранная математическая формализация (при этом рост становится невозможен), а в присваивании ей некоего конкретного малого значения неизбежно присутствует произвол. Однако существует достаточно простой способ избежать проявления описанного артефакта путем незначительной модификации модели. Для этого достаточно переписать формулу (6) в виде дифференциального уравнения

$$\frac{dW_s}{dt} = a \frac{S_m}{1 + hS_m} (W_s + W_{s_0}) \exp^{-kAge}, \quad (10)$$

для которого начальный вес спорофора в начальный момент времени может быть положен равным нулю. Иными словами, та же, что и в первичной постановке, начальная интенсивность роста обуславливается не наличием взявшейся «ниоткуда» биомассы гриба, а некими внешними причинами — например, наличием питающего центра постоянной малой интенсивности в соответствующей точке мицелия.

Измененная подобным образом модель допускает исследование в стандартном оптимизационном эксперименте среды AnyLogic, давая невырожденное решение задачи поиска максимума для выбранного функционала цели. Причем для рассматриваемого случая стохастической модели представляется разумным использовать в алгоритме оптимизации дополнительный механизм репликаций или повторностей.

Если бы мы оптимизировали детерминированную модель, в которой не присутствовала бы стохастика (то есть случайные процессы, описанные с помощью вероятностных распределений), то любые два «прогона» с одними и теми же значениями оптимизационных параметров всегда имели бы одно и то же значение оптимизируемой функции на выходе (в момент окончания «прогона»). В этом случае оптимизатору достаточно выполнить всего лишь один «прогон» для каждой итерации оптимизации (то есть для каждого набора значений параметров, предлагаемого оптимизатором). В нашем случае мы имеем дело с моделью, в которой инициация спорофоров описывается случайным потоком событий, то есть в ней имеется стохастическая компонента. Поэтому результаты «прогонов» будут уникальными и значения оптимизируемой функции, полученные для различных «прогонов», произведенных при одних и тех же значениях оптимизационных параметров, скорее всего, будут отличаться. В этом случае мы не можем производить всего лишь один «прогон», принимать его результат в качестве результата для данной итерации и продолжать оптимизацию дальше, проверяя другие значения параметров. Чтобы получить репрезентативные данные, необходимо провести несколько «прогонов» (называемых

в данном контексте репликациями) для одного набора значений параметров и принимать в качестве значения целевой функции на итерации среднее значение результатов всех репликаций. Среда AnyLogic содержит встроенные механизмы осуществления компьютерных экспериментов с репликациями, позволяющие проводить статистическое моделирование исследуемой системы методом Монте-Карло.

В результате процедуры оптимизации оказывается, что экономически оптимальный возраст гриба для его сбора составляет около 4.1 суток, что удивительным образом оказывается весьма близким к величине 4.6, принятой в оригинальной модели за физиологический возраст спелости шампиньонов.

Вид гипотетической кривой «возраст срезания — суммарный урожай», для которой ищется максимум в оптимизационном эксперименте, можно визуализировать в другой надстройке AnyLogic, так называемом эксперименте варьирования параметров (близком, по сути, к стандартной процедуре анализа чувствительности). Мы провели соответствующий эксперимент по варьированию параметра *AgeOfMaturing* (от 0.1 до 10 с шагом 0.1) и проанализировали влияние этого параметра на суммарный вес урожая грибов. Результаты представлены на рисунке 2.

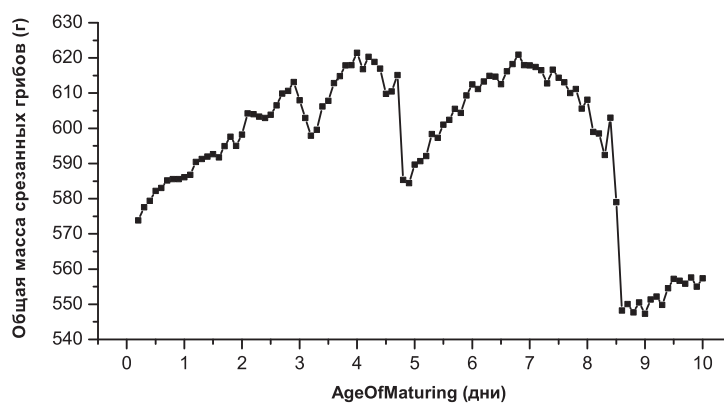


Рис. 2. Зависимость средней величины суммарного урожая грибов от возраста «спелости» отдельного спорофора

На приведенном графике можно наблюдать слева и справа от максимума чуть более низкие локальные максимумы в областях $AgeOfMaturing = 2.8$ и $AgeOfMaturing = 7.0$. Можно показать, что данные локальные максимумы соответствуют оптимальным значениям в интервале изменения параметра *AgeOfMaturing* для областей, характеризующихся другим количеством волн генерации спорофоров. Сравнительная динамика макрохарактеристик изучаемой системы для этих случаев приведена на рисунке 3. Так, видно, что локальный максимум в области $AgeOfMaturing = 2.8$ наблюдается в случае 5 «волн» генерации спорофоров (рис. 3, а), а максимум в области $AgeOfMaturing = 7.0$ для 3 «волн» (рис. 3, в). Основной же максимум достигается, если число «волн» образования спорофоров равно 4 (рис. 3, б).

Увеличение возраста срезания гриба уменьшает количество «волн» генерации новых спорофоров, число которых может сократиться до 2 или 1. Однако при стремлении этой величины к бесконечности, то есть когда происходит исключение из модели факта срезания грибов на достаточно больших временах проявляется эффект ухода значений концентрации субстрата в мицелии в отрицательную область. Последнее, безусловно, лишено физического смысла и является артефактом, вызванным логическими ошибками модели. Анализ показывает, что этот эффект обуславливается не вполне корректным описанием в исходной модели потоков субстрата, направленных на поддержание жизнедеятельности мицелия и спорофоров. Действительно,

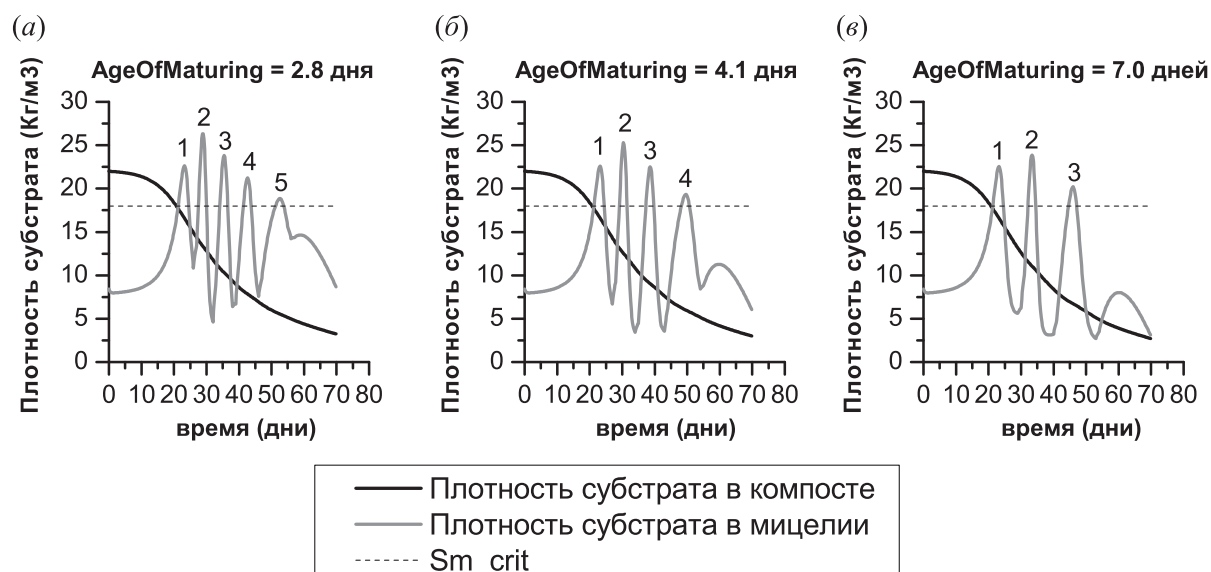


Рис. 3. Зависимость числа «волн» плодоношения от возраста «спелости» отдельного спорофора

в модели Чантера и Торнли эти потоки определяются исключительно потенциальными потребностями мицелия и спорофоров в субстрате, но не наличием необходимого количества субстрата в мицелии.

Для исправления этой неточности можно учесть тот факт, что в реальности потребности живого организма могут обеспечиваться не только внешними источниками питания, но и при необходимости распадом собственной биомассы с высвобождением необходимых ресурсов, то есть иммобилизацией. При этом естественно положить, что отношение внутренних и внешних затрат однозначно определяется доступностью внешнего ресурса (концентрацией субстрата в мицелии). С учетом сказанного формулы (4), (5), (10) переписываются в виде

$$U_m = \frac{qW_m S_m \frac{A-W_m}{A}}{Y_{G_m}} + \frac{M_m W_m}{1 + \alpha/S_m}, \quad (11)$$

$$U_s = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{Y_{G_s}} \frac{dW_s^i}{dt} + \frac{M_s W_s^i}{1 + \alpha/S_m} \right), \quad (12)$$

$$\frac{dW_s}{dt} = a \frac{S_m}{1 + hS_m} (W_s + W_{s0}) \exp^{-kAge} - M_s W_s \frac{\alpha/S_m}{1 + \alpha/S_m} Y_{G_s}. \quad (13)$$

Соответствующим образом модифицированная модель демонстрирует «физичное» поведение на всей области допустимых значений определяющих параметров и на произвольных динамических режимах функционирования. Здесь необходимо отметить, что все приведенные выше графики (рис. 1–3) построены именно для окончательной версии модели.

Заключение

Настоящая статья носит в основном методический характер и призвана продемонстрировать преимущества использования внешних инструментов и сред, а также мультипарадигменного подхода в решении задач имитационного моделирования экологических систем. Среди дальнейших перспектив развития модели необходимо отметить, что в настоящий момент реализованная

нами модель является одномерной, то есть не описывает какую-либо пространственную структуру грибницы, однако возможности выбранной среды имитационного моделирования позволяют как формально визуализировать процесс роста грибов, так и отразить их пространственное взаимодействие, учитывая, например, диффузию субстрата между точками образования спорофоров в заданной системе координат. Также в дальнейшем нами планируется развитие построенной модели в направлении повышения ее адекватности с целью использования ее как инструмента исследований и поддержки технологических решений в промышленной микологии. Для этого, в частности, планируется ввести в модель учет различных экологических факторов процесса выращивания грибов, таких как температура, влажность и т. п., расширить сферу применимости для описания онтогенеза альтернативных видов и штаммов, используемых в производстве (вешенки, шиитаке и т. д.), а также провести параметрическую идентификацию и верификацию модели на основе экспериментальных данных лабораторных опытов, проводимых специалистами Государственного таврического агротехнологического университета (Мелитополь, Украина) [Бандура, Миронычева, 2013].

Список литературы

- Бандура И. И., Миронычева Е. С. Биологическая эффективность штаммов вешенки обыкновенной *Pleurotus ostreatus* (Jacq:Fr) Kumm при низкотемпературном культивировании // Земледелие и защита растений. — 2013. — 5 (90). — С. 33–34.
- Краснощекоев П. С. Простейшая математическая модель поведения. Психология конформизма // Математическое моделирование. — 1998. — Т. 10 (7). — С. 76–92.
- Caminade C., Kovats S., Rocklöv J., Tompkins A. M., Morse A. P., Colon-Gonzalez F. J., Stenlund H., Martens P., Lloyd S. J. Impact of climate change on global malaria distribution // Proc Natl Acad Sci USA. — 2014. — Vol. 111 (9). — P. 3286–3291.
- Chanter D. O. Harvesting the Mushroom Crop: a Mathematical Model // Journal of General Microbiology. — 1979. — Vol. 115 (1). — P. 79–87.
- Chanter D. O., Thornley J. H. M. Mycelial Growth and the Initiation and Growth of Sporophores in the Mushroom Crop: a Mathematical Model // Journal of General Microbiology. — 1978. — Vol. 106 (1). — P. 55–65.
- Day T. E., Rav N., Xian H., Brugh A. An Agent-Based Modeling Template for a Cohort of Veterans with Diabetic Retinopathy // PLoS One. — 2013. — Vol. 8 (6). — e66812.
- Grimm V., Revilla E., Berger U., Jeltsch F. L., Mooij W. M., Railsback S. F., Thulke H. H., Weiner J., Wiegand Th., DeAngelis D. L. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology // Science. — 2005. — Vol. 310. — P. 987–991.
- Grimm V., Berger L., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., Goss-Custard J., Grand T. K., Heinz S., Huse G., Huth A., Jepsen J. U., Jorgensen Chr., Mooijh W. M., Muller B., Peer G., Piou C., Railsback S. F., Robbins A. M., Robbins M. M., Rossmannith E., Ruger N., Strand E., Souissi S., Stillman R. A., Vabo R., Visser U., DeAngelis D. L. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models // Ecol. Model. — 2006. — Vol. 198. — P. 115–126.
- Hubel N., Scholl E., Dahlem M. A. Bistable dynamics underlying excitability of ion homeostasis in neuron models // PLoS Comput Bio. — 2014. — Vol. 10 (5). — e1003551.
- Kim P. A simple model of ostracism formation // PLoS One. — 2014. — Vol. 29 (4). — e94333.
- Muller C. Modelling soil-biosphere interactions. — N.Y.: CABI Publishing., 1999. — 300 p.
- Railsback S. F., Grimm V. Agent-based and Individual-based Modeling: a practical introduction. — Princeton N.Y.: Princeton University Press., 2012. — 330 p.
- Wang Z., Butner J. D., Kerketta R., Cristini V., Deisboeck T. S. Simulating cancer growth with multiscale agent-based modeling // Semin Cancer Biol. — 2014. — pii: S1044-579X(14)00049-2.