УДК 004.89

А.И. ШТАНА, В.И. ФЕДОРОВ, В.Г. НЕСТЕРОВ
A.I. SHTANA, VI. FEDOROV, V.G. NESTEROV

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА СТЕРИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛАНТОВ

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CHOOSING AN EFFECTIVE METHOD FOR STERILIZING PLANT EXPLANTS

Статья посвящена созданию адекватных моделей для управления и оптимизации процессов в биотехнологии, используемых при решении задач сохранения биоразнообразия. В работе предложен подход к обеспечению выбора эффективного способа стерилизации растительных эксплантов на основе ситуационного моделирования и нечеткой логики. Приведены результаты экспериментов по определению адекватности моделей.

Ключевые слова: микроклональное размножение растений, ситуационное моделирование, выбор эффективного способа, стерилизация растительных эксплантов, нечеткая логика.

The article is devoted to the creation of adequate models for the management and optimization ofprocesses in biotechnology, used in solving problems of biodiversity conservation. The paper proposes an approach to ensuring the choice of an effective method for sterilizing plant explants based on situational modeling and fuzzy logic. The results of experiments to determine the adequacy of the models are presented.

Keywords: microclonal reproduction of plants, situational modeling, selection of an effective method for sterilizing plant explants, fuzzy logic

Настоящее время характеризуется активным использованием информационных технологий и перспективных методов моделирования для развития различных областей науки, которые обеспечивают возможность получения новых знаний о процессах и явлениях на основе имитационных экспериментов, высокоточных модельных оценок и прогнозов. В данном аспекте крайне актуальными представляются создание и исследование методов и моделей процессов в биотехнологии и систематике растений в целях способствования эффективному решению задач сохранения биоразнообразия растений, продовольственной безопасности, в т.ч. поддержки импортозамещения сельхозпродукции.

Один из новаторских подходов к сохранению и размножению растений - технология микроклонирования. В условиях in vitro растения выращиваются на питательных средах с добавлением регуляторов роста (фитогормонов), при этом крайне важно выявить наиболее эффективные стерилизаторы растительных эксплантов, определить оптимальный состав питательных сред для роста регенерантов (пробирочных растений) и регуляторов роста (фитогормонов) для размножения мини-растений. Решение данных задач в лабораторных условиях является длительным, трудоемким и затратным процессом, требующим постановки значительного числа опытов. Ситуация усложняется необходимостью работы с большим объемом разнородной информации, в том числе слабоструктурированной. Преодоление данного круга проблем возможно при использовании современных методов моделирования и интеллектуального анализа данных.

Авторами предложено создание нечеткой модели выбора эффективного способа стерилизации растительных эксплантов. Состояние культивированного растения в условиях *in vitro*, сложившееся или прогнозируемое при изменении параметров основных этапов модернизированного процесса микроклонального размножения, будем описывать лингвистической переменной следующего вида [1]:

$$\{PlantSit, T, PS, G, H\}, \quad (1)$$

где *PlantSit* - введенное выше имя рассматриваемой переменной, *T* - базовое терм-множество, которое задает множество значений лингвистической переменной *PlantSit*, каждое из которых является нечеткой переменной на некотором числовом множестве *PS;*

PS - набор количественных характеристик, на основании которых возможно определить принадлежность *PlantSit* к значениям, входящим в *T;*

G - множество синтаксических правил для образования имен новых значений *PlantSit*, не входящих в базовое терм-множество, например, «очень хорошее», «более-менее удовлетворительное» и т.п.;

H - математические правила, позволяющие преобразовать новое имя, образованное G, в нечеткую переменную, а именно: задать вид функции принадлежности. Например, если - функция принадлежности для характеристики состояния культивированного растения в условиях *in vitro* «удовлетворительное», *а* $^_2$ - «конфликтное», то функция принадлежности для характеристики «удовлетворительное

или конфликтное» будет V , а для характеристики «не конфликтная» - (1- $^н_2$) и т.д.).

Нечеткие множества, полученные с помощью семантической процедуры H, характеризуются простотой определения функций принадлежности, для расчета которых не требуется применение специализированных методов, а достаточно использовать простые математические операции.

Размерность базового терм-множества определяет выбранную точность оценки [2]. Минимальная точность комплексной качественной оценки состояния культивированного растения в условиях *in vitro* исследуемого вида определяется тремя основными термами: T_1 = «хорошее», *T'* = «удовлетворительное», *T''* = «неудовлетворительное».

Оценка T_1 = «хорошее» ставится в случае, когда наблюдается процент жизнеспособных стерильных проростков более 70 %, при этом выбрана питательная среда с оптимальным составом и концентрацией фитогормонов, обеспечивающих эффективной рост и развитие растения в условиях *in vitro*, полностью соответствующее требуемым критериям.

В зависимости от выбранного набора характеристик, определяющих результат актуализации рассматриваемых этапов (стерилизации и культивирования в питательной среде с добавлением фитогормонов), дифференцируются оценки «неудовлетворительное» (повышается их точность). Исследования по психологии показывают, что обычный человек в состоянии одновременно хранить в памяти от 5 до 9 характеристик объекта, таким образом, число термов в базовом множестве рационально определить равным 3:

$$T = \{ Ti, T', T''\} = \{ Ti, T2, Tз, T4, T5\}. \quad (2)$$

Оценка T_2 = «относительно хорошее» ставится в случае, когда наблюдается приемлемый процент (от 50 до 70 %) жизнеспособных стерильных проростков (в рамках допустимых отклонений от требуемого значения), при этом выбрана питательная среда с оптимальным составом и концентрацией фитогормонов, обеспечивающих эффективной рост и развитие растения в условиях *in vitro*, полностью соответствующее требуемым критериям.

Оценка T_3 = «удовлетворительное» ставится в случае, когда наблюдается от 10 до 50 процентов жизнеспособных стерильных проростков (в рамках допустимых отклонений от требуемого значения), при этом выбрана питательная среда с оптимальным составом и концентрацией фитогормонов, обеспечивающих эффективной рост и развитие растения в условиях *in vitro*, полностью соответствующее требуемым критериям.

Оценка T_4 = «конфликтное». Такая оценка состояния культивированного растения в условиях *in vitro* дается, когда наблюдается до 10 процентов жизнеспособных стерильных проростков (в рамках допустимых отклонений от требуемого значения), при этом выбрана питательная среда с оптимальным составом и концентрацией фитогормонов, обеспечивающих эффективной рост и развитие растения в условиях *in vitro*, полностью соответствующее требуемым критериям.

Проведенный выше анализ показывает, что *PlantSit* является составной лингвистической переменной, соответственно, процесс классификации состояния культивированного растения в условиях *in vitro* исследуемого вида и детализация базового терм-множества связаны с анализом взаимодействия включенных в состав *PlantSit* частей.

Определим следующий вид *PlantSit*.

$$PlantSit = (PlantSit(st), PlantSit(med)), \quad (3)$$

где *PlantSit(st)* - лингвистическая переменная, характеризующая состояние культивированного растения в условиях *in vitro*, полученного на этапе стерилизации исследуемых растительных эксплантов (при определенных параметрах данного этапа: вида, концентрации стерилизующего агента; времени воздействия на семена растений; или после оптимизации данных параметров);

PlantSit(med) - лингвистическая переменная, характеризующая состояния культивированного растения в условиях *in vitro* после реализации этапа культивирования растения на выбранную питательную среду с использованием фитогормонов.

Аналогично (1) введем описание лингвистических переменных *PlantSit(st)* и *PlantSit(med):*

$$\{PlantSit(st), Tst, PSst, Gst, Hst\}, \quad (4)$$

$$\{PlantSit(med), Tmed, PSmed, Gmed, Hmed\},$$

где Tst и $T_{me}d$ - это базовые терм-множества, которые задают значения лингвистических переменных *PlantSit(st)* и *PlantSit(med)* соответственно. При этом T_{st} является нечеткой переменной на числовом множестве *PSst*, к элементам которого относятся результаты состояния растительных эксплантов после проведения этапа стерилизации и получения стерильных жизнеспособных проростков; *Tmed* является нечеткой переменной на числовом множестве *PSmed*, к элементам которого относятся результаты состояния растений, культивированных на разработанной питательной среде с добавлением фитогормонов.

Оценка состояния культивированного растения в условиях *in vitro* после актуализации каждого из рассматриваемых этапов определяется термами:

$T_{st}i = T_{med}i$ = «полностью соответствующее»;

$Tst2 = Tmed2$ = «приемлемое»;

$T_{st}3 = T_{med3}$ = «неприемлемое».

Таким образом,

$$Tst = \{Tst1, Tst2, Tst3\},$$

$$Tmed = \{Tmed1, Tmed2, Tmed3\}.$$

В результате процесс классификации *PlantSit* разбивается на анализ взаимодействия ряда частей, которые будут включены в состав лингвистической переменной «Состояния культивированного растения в условиях *in vitro*», что позволит сформировать зависимость результата от комбинаций элементов данной переменной (синтезировать результат).

Для задания веденных многомерных зависимостей строятся соответствующие наборы условных правил логического вывода: *если «набор условий», то «вывод»*. Это совокупность соответствующих предикатных правил вида, например, для *PlantSit*.

если (PlantSit(st) есть T_{st1}*) и (PlantSit(med) есть* T_{med1}*)*
или (PlantSit(st) есть T_{stn}*) и (PlantSit(med) есть* T_{stm}*)*
$\wedge$ (5)
то PlantSit есть T/,

где T_{st}„ $(n = 1, 3)$ и $T_{me}d_m$ $(m = 1, 3)$ - нечеткие термы, которыми оцениваются лингвистические переменные *PlantSit(st)* и *PlantSit(med)* соответственно, T_{stn} G T_{st}, $T_{me}d_m$ G

Tmed; PlantSit = Ti (I = 1, 5) - значения, полученные на основе правил нечеткого логического вывода, представляющие собой оценку состояния культивированного растения в условиях *in vitro* по интегральному показателю, определяемому при синтезе знаний о состоянии культивированного растения после проведения соответствующего этапа микроклонального размножения.

Каждому численному значению множеств PS_{st}, $PS_{me}d$ (экспериментально измеренному или спрогнозированному с применением специально разработанных математических моделей), описывающему соответствующее состояние культивированного растения рассматриваемого вида, ставится в соответствие степень принадлежности к терму T_{stn} или T_{medm} согласно заданным определенным образом функциям принадлежности и •

На первом шаге подобных исследований также ставится задача отбора комплекса факторов, формирующих определенное состояние культивированного растения в условиях *in vitro*. Далее выполняется бальная оценка каждого фактора и суммирование частных оценок для получения интегрального показателя качества полученного растения.

При построении функций принадлежности /iTst„, *PTmeam* и *Pt i* следует использовать обобщенные знания и опыт экспертов - специалистов в предметной области. На данной основе определяется вид и параметры соответствующих функций принадлежности.

Характерной особенностью ситуационной модели (модели состояния культивированного растения в условиях *in vitro*), основанной на применении нечетких оценок, является нечеткость границ между отдельными лингвистическими значениями. Гранулированность информации - как о текущем состоянии культивированного растения в условиях *in vitro*, так и о прогнозируемом в результате актуализации оптимизации параметров рассматриваемых этапов - определяется шириной функций принадлежности. Варьирование ею позволяет изменить значения лингвистической переменной: нечеткое множество «очень» получаем с помощью оператора концентрирования (возведение в квадрат), значения при этом будут гораздо ближе к центру; «более или менее» - оператора растяжения (корень квадратный), который приводит к увеличению степеней принадлежности нечеткого множества и т.п.

Рассмотрим получение значения *PlantSit* на основе синтеза знаний о состояниях *PlantSit(st)* и *PlantSit(med)* на основе использования алгоритма *Mamdani.*

Введем *P* нечетких правил RULE, организующих необходимую базу знаний, каждое из которых имеет вид (6), с условием, что предпосылки, разделенные логическим *«или»*, образуют отдельные правила:

RULEi: *если (PlantSit(st) есть* T j^^) *и (PlantSit(med) есть* Tj^g *dmi) то PlantSit есть* T *i*

RULEp! *если (PlantSit(st) есть* T j^^) *и (PlantSit(med) есть* Tj^g $_d$^^) *то PlantSit есть* T $_l$^, (6)

RULE$_P$: *если (PlantSit(st) есть* T j^^) *и (PlantSit(med) есть* Tj„$_{gd}$^^) *mp* *то PlantSit есть* T $_l$^,

где p = 5, *P*, *n* = 5, 5 , *m* = 5, 5 , *I* = 5, 5;

Tsc„ - терм из базового терм-множества, составленного для *PlantSit(st)*, выбранный для определения нечеткого значения данной лингвистической переменной в соответствующей предпосылке правила с номером *p*, T G T_{st};

Tjn$_g$d„i - терм из базового терм-множества, составленного для *PlantSit(med)*, выбранный для определения нечеткого значения данной лингвистической переменной в соответствующей предпосылке правила с номером *p*, *Tmed*;

- терм из базового терм-множества, составленного для *PlantSit*, определяющий ее нечеткое значение в правиле с номером p, T i ^ GT.

На рисунке 1 представлен алгоритм реализации комплексной оценки как текущего, так и прогнозного состояния культивированного растения в условиях *in vitro*, реализующий предложенный и описанный выше метод и позволяющий сделать научно-обоснованный вывод о параметрах оптимального способа стерилизации [3].

Рисунок 1 - Алгоритм реализации комплексной оценки текущего / прогнозного состояния культивированного растения в условиях *i'n vitro*, определяющий выбор эффективного способа стерилизации

Разработанная модель выбора эффективного способа стерилизации растительных эксплантов на основе нечеткой логики позволит значительно сократить расходы на этапе стерилизации микроклонального размножения растений. Результаты исследования позволят селекционным организациям и агропромышленным комплексам применять экономически целесообразные современные методы моделирования процессов в биотехнологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивацук О.А. Ситуационное моделирование в автоматизированных системах мониторинга и управления экологической безопасностью. [Текст] / О.А. Иващук, О.Д. Иващук, Д.А. Кванин, В.И. Федоров // Информационные системы и технологии. - 2015. - № 2 (88) март-апрель. - С. 57-64.

2. Olga A. Ivashchuk, Igor S. Konstantinov, Natalia V. Shcherbinina, Denis A. Kvanin, Roman P. Gakhov. Automated Management of Biotechnosphere of Local Urban Areas / International Business Management. - 2015. - Volume: 9. - Issue: 7. - Page No.: 1598-1603.

3. Ivashchuk, O.A. Modeling and optimization of parameters of biotechnological processes for implementing situational management of biotechnical territories (on the example of microclonal reproduction of rare and decaying plant species) / Ivashchuk, O.A., Batlutskaya, I.V., Maslova, E.V., Fedorov, V.I., Zhuravlev, M.D., Shamraeva E.O., Degtyareva K.A. // Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences, 20(2), 2018.

Штана Альберт Игоревич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Аспирант кафедры информационных и робототехнических систем
E-mail: 1335477@bsu.edu.ru

Федоров Вячеслав Игоревич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород.
К.т.н., доцент кафедры информационных и робототехнических систем
E-mail: fedorov_v@bsu.edu.ru

Нестеров Валерий Георгиевич
Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
К.м.н., доцент кафедры медико-биологических дисциплин
E-mail: nesterov@bsu.edu.ru