

УДК 549.6:635.1/5

СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ КОРНЕОБИТАЕМОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ИОНООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Т.Г. ЯНЧЕВСКАЯ, В.А. БОБРОВ

*Государственное научное учреждение «Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси»
220073 Минск, ул. Академическая, 27
e-mail: t_yanch@mail.ru*

Определена область оптимальных соотношений макроэлементов в гидропонном питательном растворе для получения максимального коэффициента размножения (число клубней на 1 м²) картофеля среднераннего сорта белорусской селекции (сорт Скарб) при проведении многофакторных экспериментов по методу систематических вариантов Омеса. Полученные оптимальные характеристики ионного состава и соотношения макроэлементов в питательном растворе использованы для создания субстрата для размножения растений картофеля — Триона, изготовленного на основе природных и синтетических ионообменных материалов.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., оптимизация минерального питания, меристемные растения, ионообменные материалы, микроклонирование, метод Омеса, многофакторный эксперимент.

Одним из факторов интенсивной культуры растений, особенно в защищенном грунте в связи с ограниченностью объемов среды корнеобитания, является нелимитированное сбалансированное обеспечение элементами питания. Этим требованиям наиболее полно соответствует гидропонная технология, позволяющая полностью управлять данным процессом и обеспечивающая высокую степень его автоматизации. С этой целью в настоящее время используются специальные компьютерные программы и сложное оборудование.

Несмотря на то что в литературе описано более 50 составов питательных сред для выращивания растений, универсального раствора не существует, и в каждом отдельном случае для выращиваемой культуры необходимо разрабатывать и создавать оптимальную питательную среду в зависимости от поставленной цели.

Особый интерес в этом контексте представляет картофель как продовольственная, техническая и кормовая культура, урожайность которой в большой степени зависит от ускорения обновления семенного фонда, связанного, в свою очередь, с размножением безвирусных растений *in vitro* и интенсификацией способов адаптации их в условиях *in vivo*. Существующие методы черенкования и укоренения меристемных растений картофеля на традиционных торфогрунтах в условиях защищенного грунта малопродуктивны, поэтому проблема ускоренного и эффективно размножения новых сортов *in vivo* остается актуальной.

Число экспериментальных работ, посвященных выяснению особенностей минерального питания эксплантатов в процессе микроклониро-

вания и вегетативного размножения растений картофеля в зависимости от соотношения и дозы минеральных элементов в среде корнеобитания, в литературе ограничено.

Целью настоящей работы было определение на основе многофакторного эксперимента оптимального содержания катионов (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) и анионов ($H_2PO_4^-$, SO_4^{2-} , NO_3^-) в инертной среде корнеобитания, а также соотношения макроэлементов, обуславливающие максимальный коэффициент размножения картофеля — количество мини-клубней на $1 м^2$.

Методика

Объектами исследования были меристемные растения картофеля среднераннего сорта Скарб (белорусской селекции), стандартизированные по массе (8 г), высоте (12 см), количеству листьев (8) и междоузлий (6). Растения высаживали по 4 (16×16 см) в пластмассовые контейнеры с перфорированным дном. В каждом варианте было 64 растения (16 контейнеров) на $1 м^2$, в которых поддерживали заданный схемой эксперимента состав гидропонного раствора, вносимого подтоплением. Содержание микроэлементов в растворах всех вариантов было одинаковым и соответствовало рекомендации Мурасиге—Скуга [13].

В вегетационной камере, где находились сосуды, в течение всего вегетационного периода поддерживали температуру $22\text{ }^\circ\text{C}$ днем, $18\text{ }^\circ\text{C}$ ночью, влажность — 70—75 %, освещенность — 20 000 лк (лампы ДНаТ-400), длительность фотопериода — 16 ч.

Растворы для инертных субстратов готовили ежедневно в соответствии с вариантами опыта из маточных растворов бесхлорных солей, хранившихся при $8\text{ }^\circ\text{C}$. Кислотность рабочих растворов поддерживали в оптимальном для растений картофеля диапазоне рН (5,8—6,4) [3, 6].

Классическая схема многофакторного эксперимента с использованием стандартных статистических методов обработки данных обычно предполагает наличие большого количества вариантов (для 6 переменных $2^6 = 64$) [2]. Мы при планировании экспериментов использовали метод систематических вариантов Омеса [12], модифицированный в нашей лаборатории [4], который позволял решить задачу уменьшения объема многофакторного эксперимента посредством введения модельных представлений о куполообразной зависимости величины урожая от соотношения и дозы элементов. Так, для определения оптимального соотношения трех макрокатионов при фиксированном соотношении трех макроанионов достаточно провести опыт с 8 вариантами [4].

Результаты и обсуждение

С учетом результатов работ Ринькиса [8], свидетельствующих о различных коэффициентах связывания ионов механическими частицами разных размеров, многофакторные эксперименты по методу систематических вариантов Омеса были проведены на инертном субстрате, состоящем из 1 части прокаленного речного песка и 2 частей промытого агроперлита с размером частиц около 500 нм.

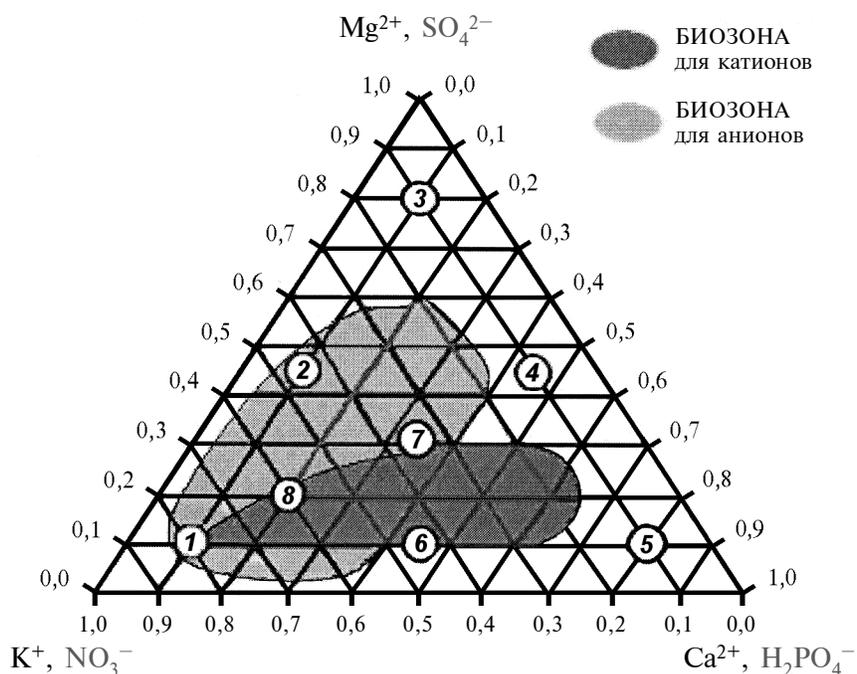
Удобной графической формой отображения совместного влияния трех элементов на параметры продукционного процесса является треугольная матрица [7]. Мы разработали программу, которая дает возмож-

ность проецировать на поле матрицы оптимальное соотношение трех выбранных элементов (по катионам и анионам). Контуры проекции — биозоны, в любой точке которых продукционный параметр равен или больше заданного пользователем значения (например, 90, 95 %) максимальной величины Y_{\max} . В этом употребляемый нами термин «биозона» отличается от предложенного Солдатовым [9], который включал соотношения всех известных стандартных растворов.

Соотношения макроэлементов в растворах (варианты) выбирали так, чтобы соотношения катионов и анионов включали известные из литературных источников соотношения макроэлементов в питательных растворах и симметричные им позиции, представленные в координатах треугольника Гиббса в виде биозон на плоскости треугольника [9].

Выбранный ионный состав растворов восьми вариантов эксперимента обозначен цифрами на треугольнике (рисунок). Линии, проведенные параллельно каждой стороне треугольника, графически отражают долю ионов в соответствующих вершинах равностороннего треугольника. Масштабная сетка построена с шагом 0,1 доли. В вершине треугольника доля обозначенного элемента соответствует максимальной в питательном растворе и равна 1. Хотя корректность метода систематических вариантов подтверждена результатами более чем 30-летних исследований, его широкое распространение затруднено сложностями теоретической интерпретации и рутинным способом обработки экспериментальных данных.

Мы разработали компьютерные программы планирования вегетационных и полевых многофакторных экспериментов для оптимизации доз и соотношений макроэлементов с использованием метода систематических вариантов Омеса [12]. Данные многофакторного эксперимента об-



Теругольник Гиббса с известными биозонами катионов и анионов (по [9]):

1–8 — экспериментальные точки по вариантам

работаны симплексным методом нелинейной аппроксимации Нелдера—Мида, описанным Реклейтисом [7].

В качестве основной функции, аппроксимирующей зависимость продукционных показателей Y_{\max} от соотношения макроэлементов в питательном растворе и нахождение оптимального элемента, использовано аналитическое выражение

$$Y_{\max} = \exp(\lg(p4)) + p(1)\lg(X_{\text{opt}}\text{K}^+) + p(2)\lg(X_{\text{opt}}\text{Ca}^{2+}) + p(3)\lg(X_{\text{opt}}\text{Mg}^{2+}), \quad (1)$$

где $p(1)$, $p(2)$, $p(3)$ — параметры, определяющие оптимальную долю элемента для получения максимального заданного продукционного параметра; $(p4)$ — коэффициент пропорциональности, отражающий невязку аппроксимирующей модели и экспериментального значения параметра.

При этом $X_{\text{opt}}\text{K}^+ + X_{\text{opt}}\text{Ca}^{2+} + X_{\text{opt}}\text{Mg}^{2+} = 1$.

Долю катиона i можно выразить как $X(i) = [X(i)]/[X\text{K}^+] + [X\text{Ca}^{2+}] + [X\text{Mg}^{2+}]$.

По аналогичному выражению мы определяли оптимум по анионам:

$$Y_{\max} = \exp(\lg(p4)) + p(1)\lg(X_{\text{opt}}\text{NO}_3^-) + p(2)\lg(X_{\text{opt}}\text{H}_2\text{PO}_4^-) + p(3)\lg(X_{\text{opt}}\text{SO}_4^{2-}). \quad (2)$$

Сумма всех анионов равна 1:

$$X_{\text{opt}}\text{NO}_3^- + X_{\text{opt}}\text{H}_2\text{PO}_4^- + X_{\text{opt}}\text{SO}_4^{2-} = 1.$$

Долю аниона i можно выразить как $X(i) = [X(i)]/[X\text{NO}_3^-] + [X\text{H}_2\text{PO}_4^-] + [X\text{SO}_4^{2-}]$.

Приведенные уравнения удовлетворительно описывают зависимость морфометрических и биохимических показателей от соотношения макроэлементов в растворе, особенно тех, которые коррелируют с приростом биомассы [4]. По рассчитанным параметрам аппроксимации $P(i)$ для изучаемого показателя можно сразу установить оптимальное соотношение элементов в питательном растворе. При этом оптимальную долю k -го элемента как для катионов, так и для анионов вычисляют по формуле

$$X_{\text{opt}}(k) = P(k) / \sum_{i=1}^n P(i), \quad (3)$$

где $P(k)$, $P(i)$ — параметры аппроксимации; n — количество аппроксимируемых ионов.

Концентрации элементов в 8 используемых составах растворов, согласно методу Омеса, охватывают необходимый и достаточный диапазон соотношений элементов для расчета оптимума по выбранному параметру — коэффициента размножения (целевой функции).

Для оптимизации катионного состава раствора выбраны 8 вариантов с различным соотношением катионов ($X\text{K}^+ : X\text{Ca}^{2+} : X\text{Mg}^{2+}$) при постоянном соотношении анионов ($X\text{NO}_3^- : X\text{H}_2\text{PO}_4^- : X\text{SO}_4^{2-}$), равном 0,6 : 0,2 : 0,2, и суммарной концентрации анионов либо катионов 20 или 30 мг-экв/л (см. рисунок). При оптимизации анионного состава раствора также выбраны 8 вариантов с различным соотношением анионов ($X\text{NO}_3^- : X\text{H}_2\text{PO}_4^- : X\text{SO}_4^{2-}$) при постоянном соотношении катионов ($X\text{K}^+ : X\text{Ca}^{2+} : X\text{Mg}^{2+}$), равном 0,6 : 0,2 : 0,2 (см. рисунок). Суммарная концентрация анионов либо катионов также составляла 20 или 30 мг-экв/л (табл. 1).

Для сравнения результатов был взят раствор Лебедевой (9К, табл. 2), используемый при выращивании меристемных растений картофеля

ТАБЛИЦА 1. Соотношения ионов в составе питательных растворов, заданные по вариантам опыта

Вариант	Концентрация, мг-экв/л			Сумма [K ⁺ + Ca ²⁺ + Mg ²⁺], мг-экв/л	Относительный коэффициент			Концентрация, мг-экв/л			Сумма [NO ₃ ⁻ + SO ₄ ²⁻ + H ₂ PO ₄], мг-экв/л
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	
1.2	16	2	2	20	0,80	0,10	0,10	12	4	4	20
2.2	9	2	9	20	0,45	0,10	0,45	12	4	4	20
3.2	2	2	16	20	0,10	0,10	0,80	12	4	4	20
4.2	2	9	9	20	0,10	0,45	0,45	12	4	4	20
5.2	2	16	2	20	0,10	0,80	0,10	12	4	4	20
6.2	9	9	2	20	0,45	0,45	0,10	12	4	4	20
7.2	7	7	6	20	0,35	0,35	0,30	12	4	4	20
8.2	12	4	4	20	0,60	0,20	0,20	12	4	4	20
1.3	24	3	3	30	0,80	0,10	0,10	18	6	6	30
2.3	13,5	3	13,5	30	0,45	0,10	0,45	18	6	6	30
3.3	3	3	24	30	0,10	0,10	0,80	18	6	6	30
4.3	3	13,5	13,5	30	0,10	0,45	0,45	18	6	6	30
5.3	3	24	3	30	0,10	0,80	0,10	18	6	6	30
6.3	13,5	13,5	3	30	0,45	0,45	0,10	18	6	6	30
7.3	10,5	10,5	9	30	0,35	0,35	0,30	18	6	6	30
8.3	18	6	6	30	0,60	0,20	0,20	18	6	6	30

[5], и стандартный раствор MS [13] (10К, см. табл. 2), используемый в культуре клеток *in vitro*. Поскольку по молярным концентрациям ионов нельзя учесть стехиометрию трансмембранного переноса ионов через плазматические мембраны клеток корней, зависящую от заряда иона, в настоящей работе расчеты велись на миллиграмм-эквиваленты ионов.

Экспериментальные данные продукционных характеристик при оптимизации соотношения катионов представлены в табл. 2. Результаты экспериментов свидетельствуют, что в зависимости от катионного состава раствора максимальные значения по всем показателям продуктивности, в том числе по урожаю и количеству клубней, получены в варианте 6.2(К). При оптимизации соотношения анионов (табл. 3) наибольший урожай клубней был в варианте 6.3(А), по количеству клубней — в варианте 7.2(А).

Ранее в экспериментах с различными сортами картофеля мы обнаружили, что суммарная концентрация анионов 10 мг-экв/л является недостаточной, а 40 мг-экв/л — избыточной для клубнеобразования. В связи с этим оптимизацию на получение максимального количества мини-клубней проводили при суммарной концентрации анионов (катионов) 20 и 30 мг-экв/л [10].

При концентрации катионов и анионов 20 мг-экв/л с помощью аппроксимирующей модели рассчитано, что с 95 % максимального значения параметра на 1 м² $Y_{\max} = 520,21 \pm 18,87$ мини-клубней. Полученные экспериментально коэффициенты размножения в растворе Лебедевой [5] и в растворе MS [13] (варианты 9(К) и 10(К)) составляют соответственно 224,0 и 240,0 мини-клубней. Y_{\max} — целевую функцию (в данном случае — максимальное количество мини-клубней на 1 м²) определяли по уравнению (1). Оптимальные соотношения катионов при этом составляли: $X_{\text{opt}} K^+ = 0,458$; $X_{\text{opt}} Ca^{2+} = 0,360$; $X_{\text{opt}} Mg^{2+} = 0,182$.

Оптимальные соотношения катионов для получения максимального урожая с 1 м² — $10,60 \pm 0,49$ кг мини-клубней также были рассчитаны по модели и составляли: $X_{\text{opt}} K^+ = 0,449$; $X_{\text{opt}} Ca^{2+} = 0,311$; $X_{\text{opt}} Mg^{2+} = 0,240$.

Урожай картофеля, полученный экспериментально в растворе Лебедевой [5] и MS [13] (см. табл. 2, варианты 9(К), 10(К)), равен соответственно 2,99 и 3,09 кг клубней на 1 м², что почти в 2,5 раза меньше, чем полученный нами при оптимальном соотношении катионов.

Как следует из анализа рассчитанных соотношений катионов, для получения максимального количества и максимального урожая мини-клубней требуются примерно одинаковые доли катионов K^+ (~0,45). Остальная часть (~0,55), приходящаяся на долю двухвалентных катионов, распределяется неодинаково: для получения максимального урожая необходима уменьшенная доля Mg^{2+} за счет увеличения доли Ca^{2+} по сравнению с раствором, используемым для получения максимального количества мини-клубней. Полученные данные могут отражать закономерности транспорта катионов K^+ при наличии двухвалентных катионов, когда Ca^{2+} задает стехиометрию процессов проницаемости [1, 11].

Компьютерный программный расчет результатов по аппроксимирующей модели оптимального соотношения анионов по четырем параметрам для получения максимальной продуктивности клубней картофеля сорта Скарб при концентрации 20 мг-экв/л проведен аналогично расчету соотношения катионов. При максимальном значении $Y_{\max} = 425,84 \pm$

ТАБЛИЦА 2. Итоговые показатели продуктивности картофеля *in vivo* при оптимизации соотношения катионов

Вариант	Урожай, кг/м ²	Количество клубней, шт./м ²	Масса клубней, г/растение	Количество клубней, шт./растение	Средняя масса клубня, г	Содержание абсолютно сухого вещества клубня, %	Содержание крахмала, %
1.2(К)	6,22 ± 0,31	320,0 ± 7,78	97,18 ± 1,79	5,07 ± 0,12	19,44 ± 0,17	16,25 ± 0,09	10,68 ± 0,18
2.2(К)	6,57 ± 0,44	400,0 ± 12,15	102,63 ± 0,28	6,25 ± 0,17	16,42 ± 0,11	16,73 ± 0,11	10,98 ± 0,15
3.2(К)	3,95 ± 0,29	240,0 ± 6,52	63,73 ± 0,02	3,75 ± 0,16	16,46 ± 0,16	11,24 ± 0,19	5,49 ± 0,011
4.2(К)	4,89 ± 0,53	320,0 ± 8,41	73,25 ± 0,17	5,00 ± 0,15	14,65 ± 0,13	11,48 ± 0,09	10,34 ± 0,14
5.2(К)	3,44 ± 0,17	256,0 ± 6,72	53,72 ± 0,02	4,00 ± 0,14	13,43 ± 0,12	12,81 ± 0,08	7,06 ± 0,12
6.2(К)	9,06 ± 0,46	582,4 ± 12,45	138,76 ± 1,24	9,10 ± 0,21	15,55 ± 0,17	18,03 ± 0,46	12,73 ± 0,19
7.2(К)	7,75 ± 0,65	432,0 ± 12,53	121,10 ± 0,94	6,75 ± 0,19	17,94 ± 0,17	14,05 ± 0,12	8,30 ± 0,13
8.2(К)	4,45 ± 0,22	256,0 ± 7,86	69,60 ± 0,88	4,21 ± 0,14	17,40 ± 0,14	16,08 ± 0,48	10,52 ± 0,18
1.3(К)	5,53 ± 0,26	336,0 ± 7,23	86,36 ± 0,79	5,25 ± 0,17	16,45 ± 0,18	15,50 ± 0,18	9,93 ± 0,17
2.3(К)	2,95 ± 0,11	240,0 ± 5,18	46,05 ± 0,23	3,75 ± 0,12	12,28 ± 0,15	11,18 ± 0,60	5,43 ± 0,16
3.3(К)	3,02 ± 0,15	179,2 ± 6,67	47,21 ± 0,64	2,80 ± 0,11	16,86 ± 0,14	11,20 ± 0,28	5,45 ± 0,17
4.3(К)	3,12 ± 0,16	208,0 ± 7,48	48,69 ± 0,77	3,25 ± 0,15	14,98 ± 0,17	11,14 ± 0,24	5,39 ± 0,15
5.3(К)	3,92 ± 0,19	275,2 ± 8,33	61,28 ± 0,85	4,30 ± 0,14	14,25 ± 0,16	14,96 ± 0,32	9,21 ± 0,14
6.3(К)	7,31 ± 0,35	432,0 ± 11,67	114,21 ± 1,03	6,75 ± 0,17	16,92 ± 0,16	17,52 ± 0,25	11,95 ± 0,18
7.3(К)	6,36 ± 0,32	416,0 ± 12,46	99,32 ± 1,24	6,50 ± 0,15	15,28 ± 0,15	12,20 ± 0,28	6,45 ± 0,17
8.3(К)	4,40 ± 0,22	275,2 ± 6,34	68,71 ± 0,98	4,30 ± 0,17	15,98 ± 0,16	12,55 ± 0,08	6,80 ± 0,16
9(К)	2,99 ± 0,19	224,0 ± 6,98	47,43 ± 0,89	3,50 ± 0,014	13,35 ± 0,12	12,61 ± 0,08	6,86 ± 0,16
10(К)	3,09 ± 0,15	240,0 ± 7,67	48,23 ± 0,94	3,75 ± 0,013	12,86 ± 0,11	13,37 ± 0,65	7,82 ± 0,14

ТАБЛИЦА 3. Показатели продуктивности картофеля при оптимизации соотношения антонов

Вариант	Урожай, кг/м ²	Количество клубней, шт/м ²	Масса клубней, г/растение	Количество клубней, шт/растение	Средняя масса клубня, г	Содержание абсолютно сухого вещества клубня, %	Содержание крахмала, %
1.2(А)	3,29 ± 0,64	156,1 ± 6,41	51,4 ± 4,32	2,44 ± 0,08	21,08 ± 0,11	14,97 ± 0,07	9,21 ± 0,04
2.2(А)	4,07 ± 0,53	194,55 ± 5,81	63,59 ± 5,25	3,04 ± 0,10	20,92 ± 0,11	19,07 ± 0,09	13,32 ± 0,06
3.2(А)	1,57 ± 0,19	277,1 ± 8,22	24,6 ± 3,57	4,33 ± 0,15	5,67 ± 0,02	11,42 ± 0,05	6,80 ± 0,09
4.2(А)	2,19 ± 0,23	140,8 ± 7,33	34,32 ± 4,21	2,2 ± 0,11	15,6 ± 0,07	16,47 ± 0,04	10,72 ± 0,04
5.2(А)	2,35 ± 9,42	210,6 ± 9,28	36,7 ± 4,24	3,29 ± 0,12	11,17 ± 0,05	21,32 ± 0,03	15,57 ± 0,04
6.2(А)	6,55 ± 0,29	313,0 ± 11,33	100,3 ± 7,02	4,89 ± 0,16	20,94 ± 0,10	21,62 ± 0,86	15,87 ± 0,06
7.2(А)	5,84 ± 0,33	488,0 ± 12,61	83,8 ± 7,88	7,0 ± 0,19	11,97 ± 0,05	19,38 ± 0,07	13,63 ± 0,08
8.2(А)	4,52 ± 0,82	260,0 ± 8,78	69,60 ± 4,88	4,00 ± 0,13	17,38 ± 0,09	16,02 ± 0,08	10,51 ± 0,19
1.3(А)	2,58 ± 9,45	160,0 ± 8,69	40,3 ± 5,44	2,5 ± 0,09	16,12 ± 0,08	22,47 ± 0,11	16,72 ± 0,08
2.3(А)	1,84 ± 0,21	201,0 ± 7,31	27,9 ± 3,78	3,14 ± 0,11	8,88 ± 0,04	21,65 ± 0,10	16,16 ± 0,08
3.3(А)	1,15 ± 0,18	247,04 ± 10,87	17,95 ± 3,79	3,86 ± 0,14	4,65 ± 0,02	13,01 ± 0,07	9,71 ± 0,03
4.3(А)	2,47 ± 0,24	71,4 ± 6,92	38,4 ± 2,34	1,11 ± 0,08	34,62 ± 0,16	13,95 ± 0,09	8,20 ± 0,06
5.3(А)	2,19 ± 0,15	128,0 ± 8,56	34,2 ± 1,18	2,04 ± 0,04	17,11 ± 0,08	18,47 ± 0,09	12,72 ± 0,05
6.3(А)	6,96 ± 0,44	256,0 ± 6,81	108,8 ± 4,97	4,06 ± 0,05	27,2 ± 0,13	15,55 ± 0,19	9,80 ± 0,19
7.3(А)	5,77 ± 0,67	241,2 ± 7,15	90,5 ± 5,33	3,78 ± 0,11	23,94 ± 0,11	19,15 ± 0,09	13,40 ± 0,08
8.3(А)	6,33 ± 0,74	326,0 ± 9,31	97,20 ± 1,86	4,23 ± 0,013	19,42 ± 0,09	16,21 ± 0,08	10,68 ± 0,02

$\pm 18,77$ шт/м² оптимумы для анионов составили: $X_{\text{opt}}\text{H}_2\text{PO}_4^- = 0,403$, $X_{\text{opt}}\text{NO}_3^- = 0,365$, $X_{\text{opt}}\text{SO}_4^{2-} = 0,232$ (при общей концентрации катионов и анионов по 20 мг-экв/л). Эти соотношения катионов и анионов мы использовали для насыщения ионообменных материалов и создания оптимизированного ионообменного субстрата с товарным знаком Триона, в состав которого входят природные и синтетические ионообменные материалы.

Интегрирующим расчетом НРК при аппроксимации по 7 параметрам (3 катиона, 3 аниона и аппроксимирующий параметр модели) определено соотношение N : P : K = 0,42 : 0,13 : 0,45 (при общей концентрации катионов и анионов по 20 мг-экв/л) для максимального клубнеобразования.

Таким образом, в результате многофакторного эксперимента, проведенного по методу систематических вариантов Омеса, определены оптимальные соотношения макроэлементов питательного раствора для картофеля (на примере сорта Скарб). Применение полученных соотношений при создании оптимизированного субстрата многоразового использования в ионитопонной технологии круглогодичного получения исходного безвирусного материала картофеля на основе ионообменных материалов в биотехнических комплексах *in vivo* даст возможность значительно интенсифицировать процессы ускоренного размножения исходного материала картофеля для первичного семеноводства.

1. Вахмистров Д.Б., Мазель Ю.Я. Поглощение и передвижение солей в клетках корня // Итоги науки и техники. Сер. Физиология растений. — М., 1973. — Т. 1: Физиология корня. — С. 164—212.
2. Вильямс М.В., Шарма Г., Ягодин Б.А., Вахмистров Д.Б. Оптимизация соотношения N:P:K в питательной смеси для песчаной культуры ячменя // Физиология и биохимия культ. растений. — 1986. — 18, № 3. — С. 222—231.
3. Гончарик М.Н., Урбанович Т.А. О влиянии ионов хлора на сопряженность окисления и фосфорилирования в листьях картофеля // Докл. АН БССР. — 1968. — 12, № 6. — С. 553—555.
4. Ермолаев Ю.С., Ольшаникова А.Л., Вербицкая Н.А., Доброхотова Н.Г. Компьютерные математические модели влияния дозы и соотношения элементов минерального питания на рост, развитие и продуктивность растений // Весці Акад. навук БССР. Сер. біял. навук. — 1991. — № 4. — С. 92—95.
5. Лебедева Е.В., Симонов В.М., Вильямс М.В. Технология и перспектива культивирования картофеля в искусственных условиях среды // Принципы управления производственными процессами в агроэкосистемах. — М.: Наука, 1976. — С. 144—152.
6. Получение безвирусной рассады картофеля по ионитопонной технологии в биотехнических комплексах / Т.Г. Янчевская и др. — Минск: БелАниГал, 2004. — 52 с.
7. Реклейтис Г., Райвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. — М., 1986. — Т. 1—2. — С. 56—72.
8. Ринькис Г.Я., Рамане Х.К., Паэгле Г.В., Куницкая Т.А. Система оптимизации и методы диагностики минерального питания растений. — Рига, 1989. — 196 с.
9. Солдатов А.С., Перишкина Н.С., Хорошко В.И. Ионитные почвы. — Минск: Наука и техника, 1978. — С. 111.
10. Янчевская Т.Г., Бобров В.А. Оптимизация содержания макроэлементов в среде корнеобитания для достижения максимального коэффициента размножения картофеля *in vivo* // Ботаника: Исследования. — 2008. — № 35. — С. 317—328.
11. Янчевская Т.Г. Особенности транспорта ионов NO_3^- и NH_4^+ в клетки корней меристемных растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) из гидропонного раствора // Весці НАНБ. Сер. біял. навук. — 2006. — № 4. — С. 47—52.
12. Homes M.V., VanSchoor G.H. Alimentation et Fumure Minerales des Vegetaux. — Bruxelles: Palais des Academies, 1982. — 360 p.
13. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures // Physiol. Plant. — 1962. — 15, N 3. — P. 473—497.

Получено 26.06.2009

СТВОРЕННЯ ШТУЧНОГО КОРЕНЕЗАСЕЛЕНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ
ОПТИМІЗАЦІЇ ІОНООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Т.Г. Янчевська, В.А. Бобров

Державна наукова установа «Інститут експериментальної ботаніки ім. В.Ф. Купревича
Національної академії наук Білорусі», Мінськ

Визначено інтервал оптимальних співвідношень макроелементів у гідропонному поживному розчині для отримання максимального коефіцієнта розмноження (число бульб на 1 м²) картоплі середньораннього сорту білоруської селекції (сорт Скарб) під час проведення багатofакторних експериментів за методом систематичних варіантів Омеса. Отримані оптимальні характеристики іонного складу і співвідношення макроелементів у поживному розчині використано для створення субстрату для розмноження рослин картоплі — Тріона, що виготовлений на основі природних і синтетичних іонообмінних матеріалів.

THE CREATION OF ARTIFICIAL ROOT MEDIUM ON THE BASES OF
OPTIMIZATION OF ION EXCHANGE PROCESSES

T.G. Yanchevskaya, V.A. Bobrov

V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus
27 Akademicheskaya St., Minsk, 220073, Belarus

Areas of optimum ratio of mineral elements for obtaining maximal quantity of potato tubers have been revealed on the basis of multi-factorial experiment, using principles of the theory of optimization on a classical method of regular Homes variants. Received optimized characteristics of ionic composition of nutrition medium are used as basic value for creation of artificial substratum on the basis of materials with cations- and anions exchanging properties.

Key words: *Solanum tuberosum* L., optimization of a mineral nutrition, meristematic plants, ion-exchange soils, microcloning, multifactorial experiment.